



Laurea triennale in Fisica  
a.a. 2011 - 2012

# CORSO DI ASTRONOMIA

Prof. Angelo Angeletti

## Tecniche per la rilevazione

### Metodi indiretti

#### **METODI DINAMICI**

- Metodo astrometrico
- Metodo della velocità radiale (559 sistemi, 701 pianeti, 94 sistemi multipli)
- Metodo del Pulsar Timing (11 sistemi, 16 pianeti, 4 sistemi multipli)

#### **METODI FOTOMETRICI**

- Metodo di microlensing (14 sistemi, 15 pianeti, 1 sistema multiplo)
- Metodo del transito (196 sistemi, 230 pianeti, 29 sistemi multipli)

#### **METODI ALTERNATIVI**

- Tracce di dischi di polveri
- Emissione radio
- Emissione di onde gravitazionali

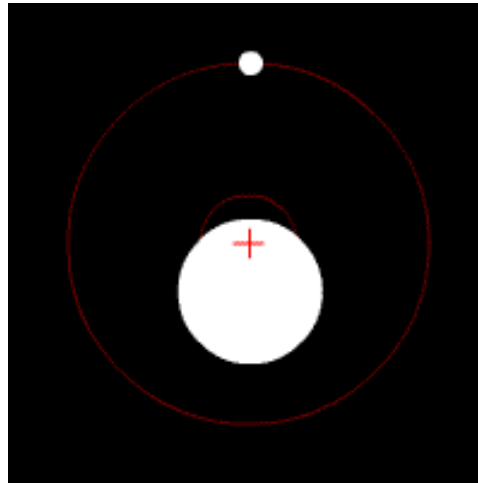
Dati aggiornati al 24 aprile 2012

## 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.



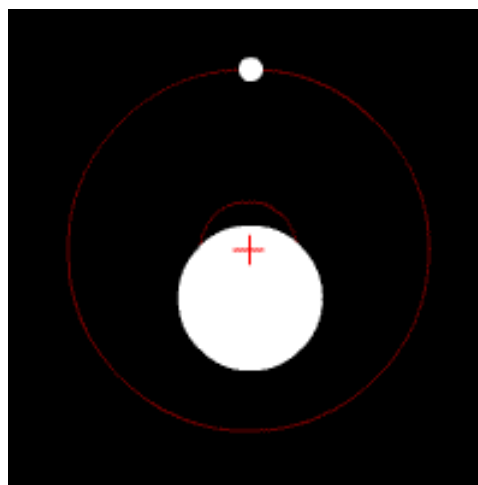
## Tecniche per la rilevazione

### 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***



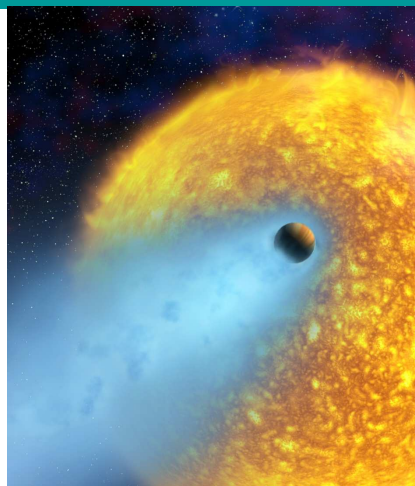
## Tecniche per la rilevazione

### 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.

Il lancio, previsto per la primavera del 2012, è stato rinviato all'agosto 2013.

Il satellite occuperà un'orbita attorno a L2.



*Rappresentazione artistica della missione dell'ESA GAIA*

## Tecniche per la rilevazione

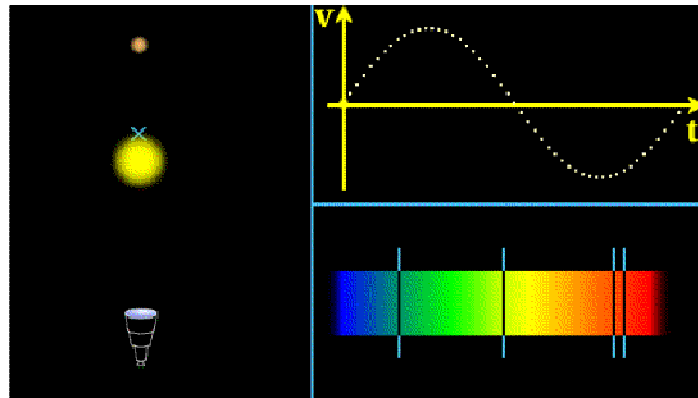
### Metodo della velocità radiale

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!*

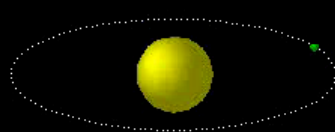
*Giove produce sul Sole uno spostamento delle righe di  $\sim 10^{-5}$  nm.*



## Tecniche per la rilevazione

### Metodo della velocità radiale

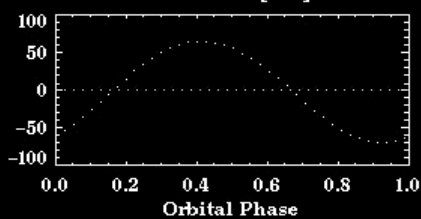
Circular Orbit: rho CrB



$$K = 67.4 \text{ m/s} \quad e = 0.03$$

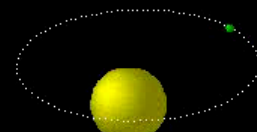
$$\omega = 210.0 \text{ deg.} \quad \sin(i) = 0.3 \text{ (*)}$$

Radial Velocity Curve of the Star [m/s]



S.G. Korzennik (CfA, © 1997)

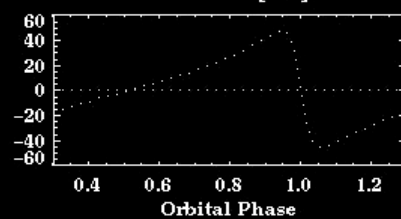
Highly Eccentric Orbit: 16 Cyg B



$$K = 46.6 \text{ m/s} \quad e = 0.67$$

$$\omega = 86.8 \text{ deg.} \quad \sin(i) = 0.3 \text{ (*)}$$

Radial Velocity Curve of the Star [m/s]

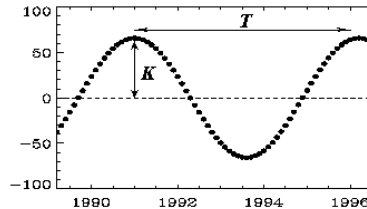


S.G. Korzennik (CfA, © 1997)

## 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.

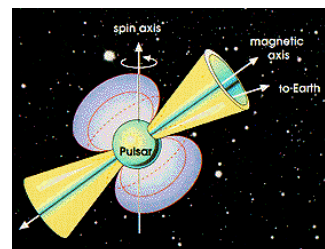
***Fino ad oggi è la tecnica che ha dato i maggiori risultati.***

## 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.

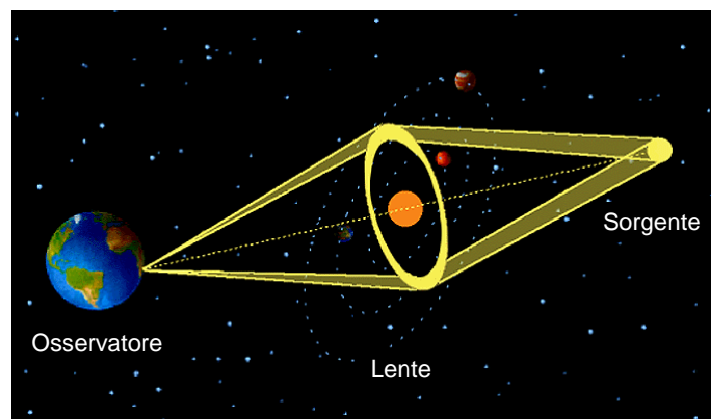
Grazie alla precisione delle attuali misure nelle radiofrequenze si può apprezzare una variazione della frequenza d'arrivo dell'ordine  $\Delta\nu/\nu \approx 10^{-11}$  che equivale ad una velocità radiale di 1 cm/s.

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*).

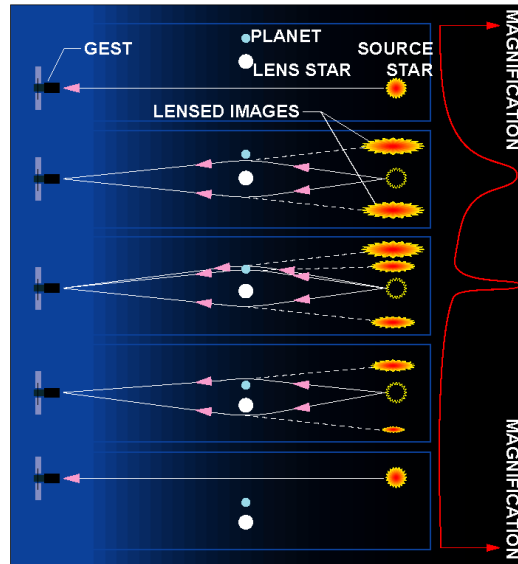


## Tecniche per la rilevazione

### Metodo di microlensing

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

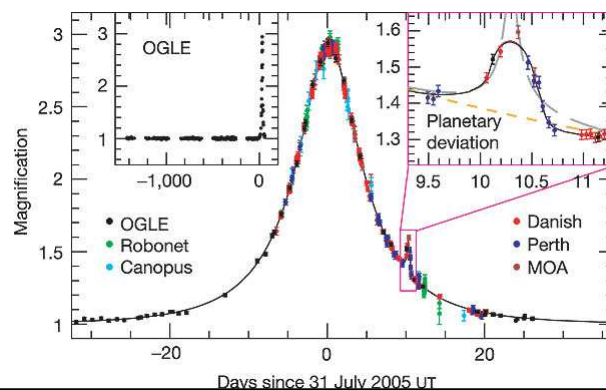
Quando si scopre un evento di microlensing si analizza la curva di luce della stella alla ricerca di difetti della lente dovuti alla presenza di un pianeta



## 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

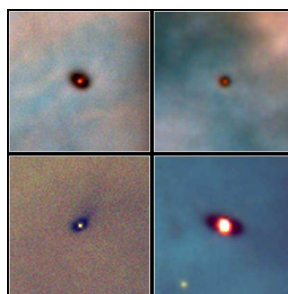
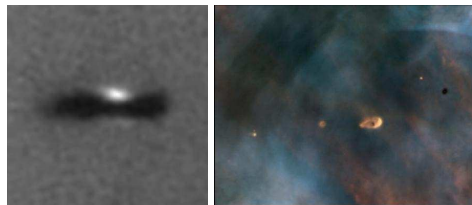
### Tracce di dischi di polveri

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.



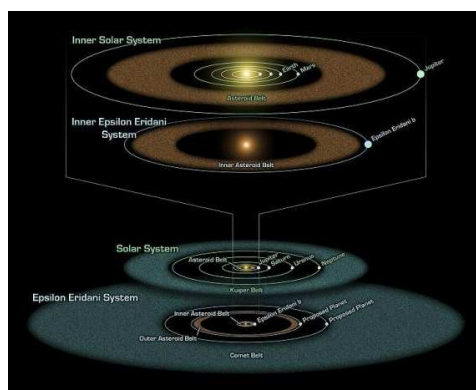
Dischi protoplanetari nella nebulosa di Orione

## Tecniche per la rilevazione

### Tracce di dischi di polveri

La rilevazione di polvere indica un continuo rimpiazzamento 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.



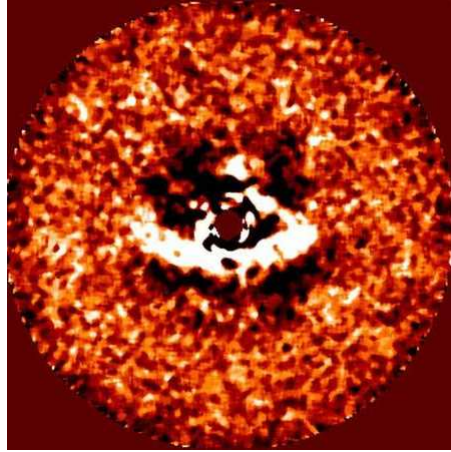
Entrambe queste caratteristiche sono presenti nel disco di polvere che circonda  $\epsilon$  Eridani e suggeriscono la presenza di un pianeta con un raggio orbitale di circa 40 UA.

## 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.

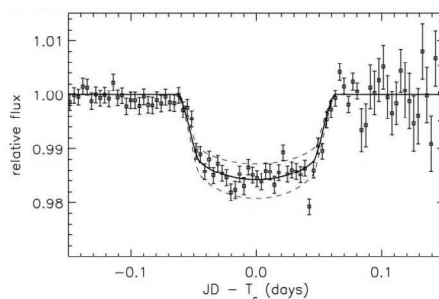


*Immagine del Telescopio Subaru del disco protoplanetario intorno alla stella LkCa 15, una stella di pochi milioni di anni, situata a circa 450 a.l. Precedenti osservazioni avevano rilevato la presenza di un vuoto al centro del disco; le nuove immagini mostrano una forte luce brillare dalla superficie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

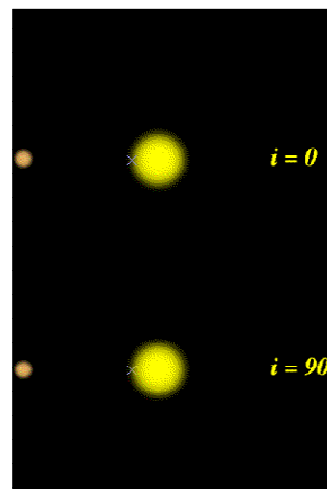
## Tecniche per la rilevazione

### 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 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 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

### 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

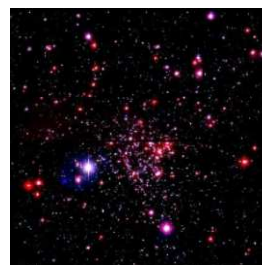
### Sistemi basati a terra

#### 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: 7x7°

Detector: 4096x4096 CCD (9  $\mu$ 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

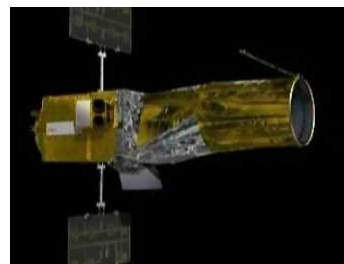
### CoRoT

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

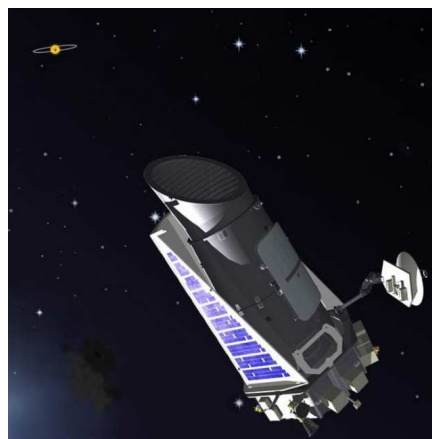
La Missione Kepler è un programma della NASA.

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.

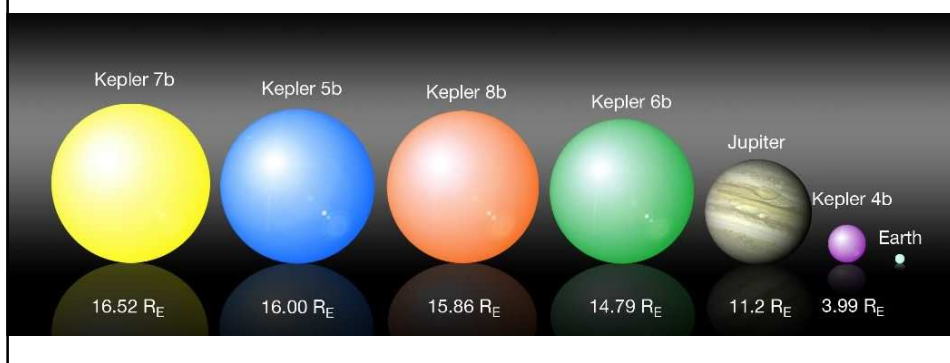


## Metodo del transito

### 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.

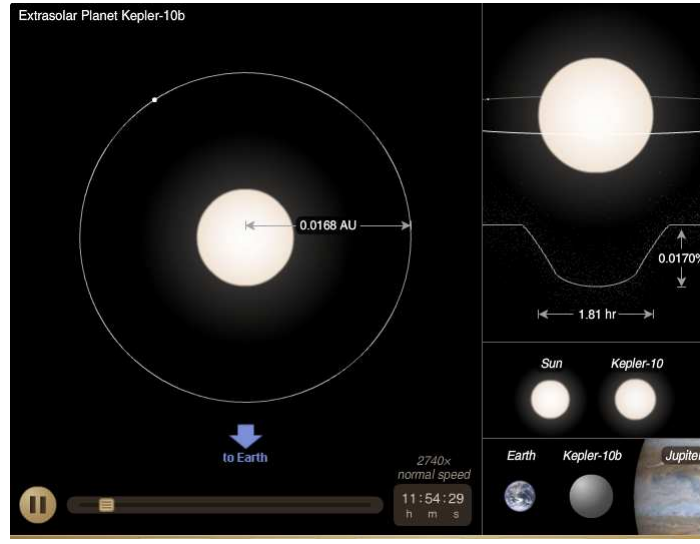




## Metodo del transito

### Kepler10

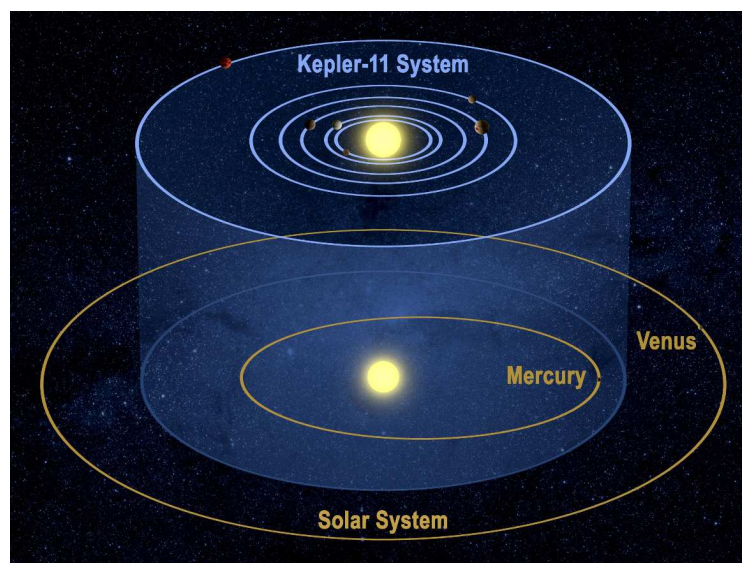
L'11 gennaio 2011 la NASA ha annunciato la scoperta del pianeta roccioso di tipo terrestre Kepler-10b, con diametro 1,4 volte quello della Terra. Orbita attorno al suo sole (molto simile al Sole e distante 560 anni luce), ad una distanza di 1/20 quella di Mercurio dal Sole, per cui è del tutto improbabile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



## Metodo del transito

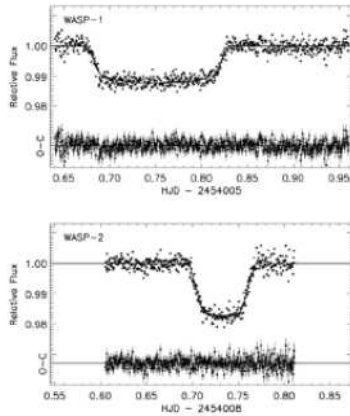
### Kepler11

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.

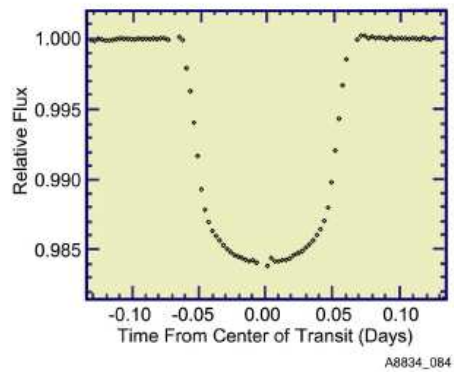


## Metodo del transito

Sistemi basati a Terra

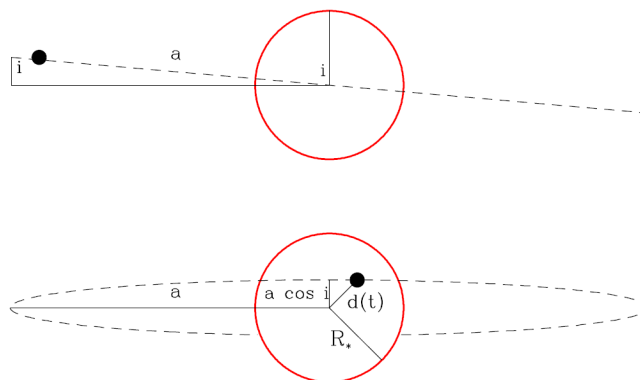


Sistemi nello spazio



## 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:

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

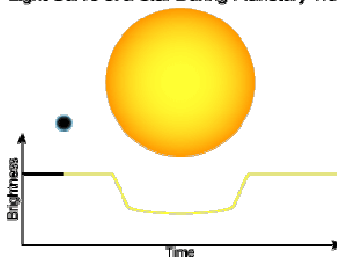
## Metodo del transito

### 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:

$$\max \frac{\Delta F_{\lambda,*}}{F_{\lambda,*}} = \frac{\pi F_{\lambda,*} R_p^2}{\pi F_{\lambda,*} R_*^2 + \pi F_{\lambda,p} R_p^2} \approx \left( \frac{R_p}{R_*} \right)^2$$

Light Curve of a Star During Planetary Transit

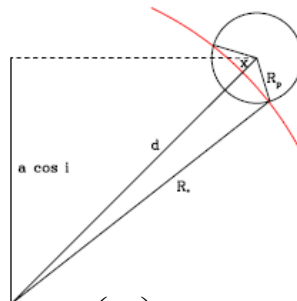


La forma del profondità del transito dipenderà l'angolo di inclinazione, il rapporto tra del pianeta e le dimensioni della stella e il grado di oscuramento al bordo nella banda di osservazione.

## Metodo del transito

### 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:



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

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

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

## Metodo del transito

### Metodo del transito

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

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

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

## 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)

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

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

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

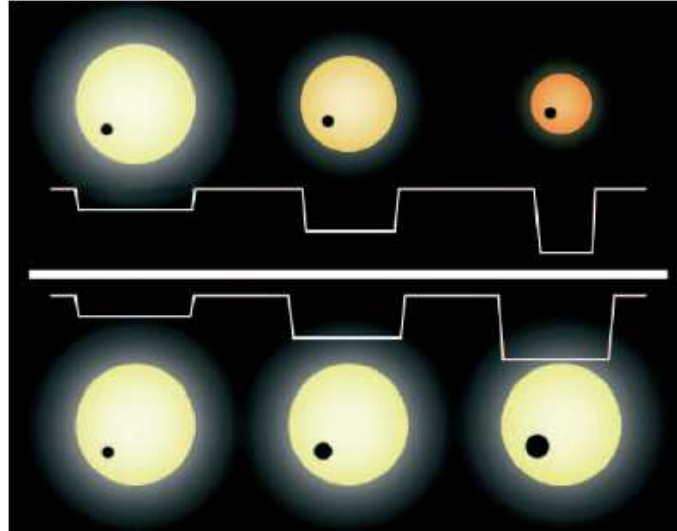
***È impossibile rilevare transiti di pianeti di taglia terrestre da Terra!***

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

## Metodo del transito

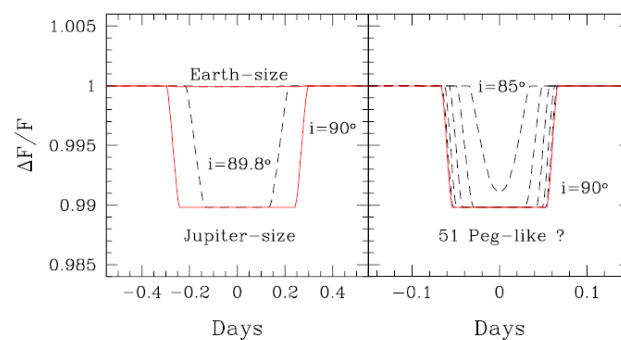
### Metodo del transito

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 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

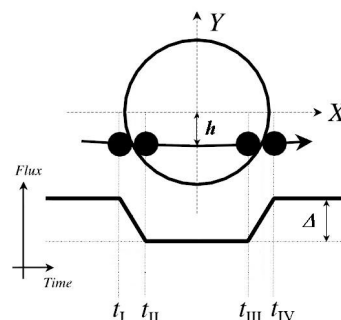
### Durata del transito

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.

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

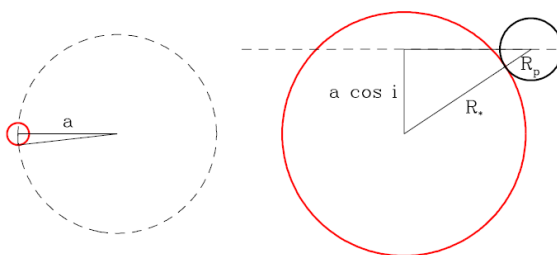


$h$  è il **parametro di impatto**

## 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

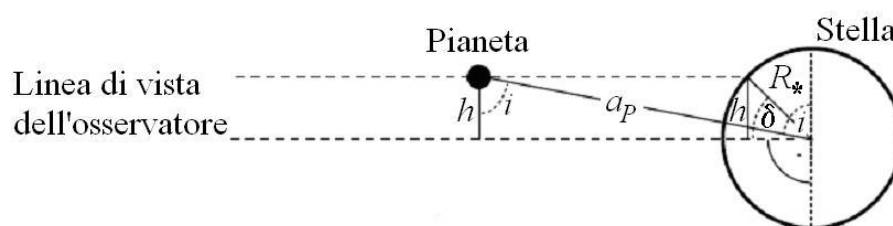
### Metodo del transito

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

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

### 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.

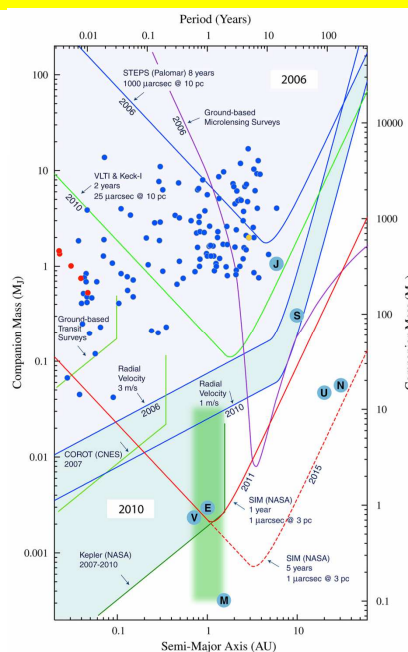
## Programmi futuri

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*

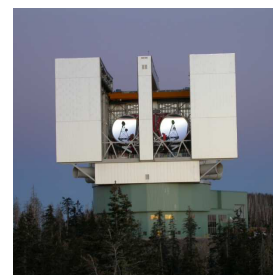


*Keck Telescope*

## Programmi futuri

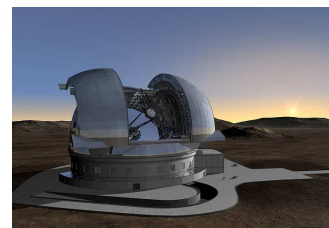
Per l'osservazione diretta da Terra

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*

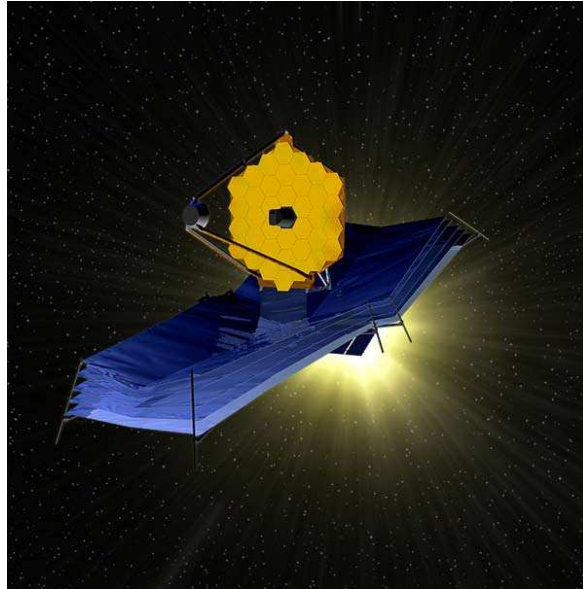
## Programmi futuri

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.



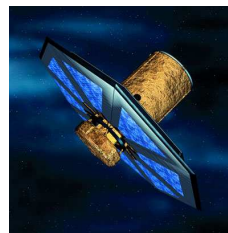
## Programmi futuri

Progetti a medio termine per l'osservazione diretta dallo spazio

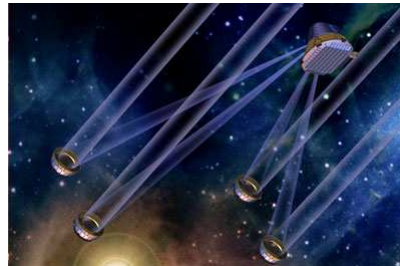
Un interferometro è composto da un numero di telescopi compreso fra 3 e 6, ognuno di 3 metri di diametro e distanti fra loro da qualche diecina e qualche centinaio di metri.

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.



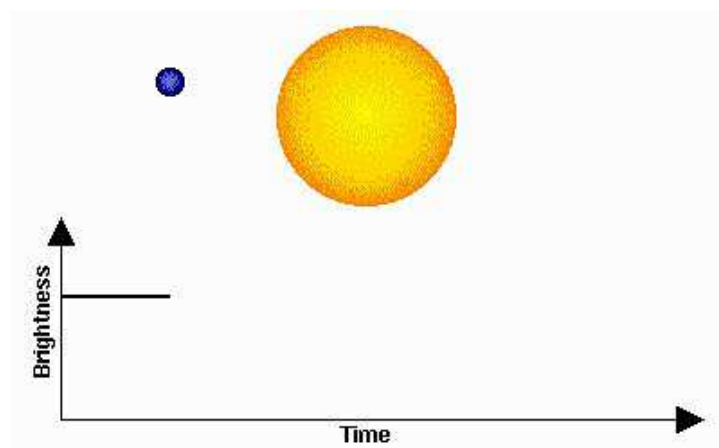
*Uno dei quattro o cinque telescopi del progetto Darwin*



*TPF-I – Terrestrial Planet Finder Interferometer*

## Rilevazione del transito di un pianeta extrasolare

Il transito di un pianeta extrasolare davanti alla propria stella altro non è che un'eclisse.



## Rilevazione del transito di un pianeta extrasolare

Rilevare un transito significa acquisire una serie di immagini della stella davanti alla quale passa il pianeta al fine di misurarne il calo di luminosità in funzione del tempo.

Costruire cioè la cosiddetta **curva di luce del transito**.

È quindi necessario effettuare una serie di riprese del campo della stella in esame e confrontarne poi la luminosità con delle stelle di riferimento, notoriamente non variabili. In altri termini è necessario fare una **fotometria** della stella.

Poiché il calo di luminosità della stella, per la maggior parte delle stelle finora osservate da Terra, è dell'ordine del **centesimo di magnitudine** è necessario lavorare con una precisione di almeno **2 millesimi di magnitudine**.

Il che significa estrema precisione.

## Rilevazione del transito di un pianeta extrasolare

Per definire le corrette modalità di ripresa, in alta precisione fotometrica, di un transito di un pianeta extrasolare, è necessario spendere qualche parola sui diversi tipi di **rumore** che sono presenti in un'immagine astronomica acquisita con un CCD e che possono far degenerare, anche in modo sostanziale, la qualità delle misure.

Per queste misure ci accontenteremo di raggiungere una precisione fotometrica dell'ordine di 0.002 magnitudini (che è un buon target, in genere il 10% di quanto si deve misurare), ma per ottenere ciò occorre rendere minime tutte le sorgenti d'errore.

Gli errori che bisogna tenere sotto controllo sono:

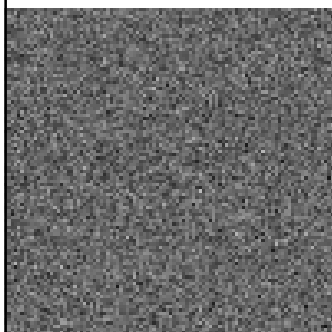
- 1) il **Poisson noise**  $\sigma_p$ ,
- 2) l'errore prodotto dalla **scintillazione atmosferica**  $\sigma_s$
- 3) l'**errore stocastico standard**  $\sigma_{ST}$ .

## Il Poisson Noise

Chiamato anche **photonic noise**, o **noise from photon statistics**, o **Photon noise** è provocato dall'arrivo casuale dei fotoni sul rivelatore.

Ogni fotone è un evento indipendente e il suo arrivo può essere previsto solo in termini di probabilità. Su una data area del sensore arriva in media un certo numero di fotoni al secondo (flusso di fotoni), ma ci sono fluttuazioni attorno a questa media.

La legge statistica che governa queste fluttuazioni è una distribuzione di Poisson da cui il nome.



Le fluttuazioni nel numero di fotoni da pixel a pixel è completamente scorrelata.

Questo rumore appare maggiormente quando i fotoni in arrivo sono pochi; si può ridurre aumentando il numero di fotoni in arrivo con una esposizione più lunga.

Poisson noise di un cielo azzurro sul canale del verde (tratto da Emil Martinec)

## Il Poisson Noise

L'incertezza introdotta nelle misure della magnitudine del Poisson Noise è

$$\sigma_p = \frac{1}{\sqrt{N}}$$

dove  $N$  è il numero totale di fotoelettroni raccolti nell'area di misura.

Affinché l'accuratezza sia sull'ordine di 0.002 magnitudini dovremo conteggiare

$$N = \frac{1}{\sigma_p^2} \geq 250000$$

fotoelettroni. Si ricordi che il numero complessivo di fotoelettroni provenienti dalla stella è dato da  $N = G \cdot I$  dove  $G$  è il guadagno del CCD e  $I$  è l'intensità della stella espresso in ADU.

Per il CCD che utilizzeremo  $G = 2.2$ , quindi

$$I \geq 114000$$

## Scintillazione atmosferica

La scintillazione atmosferica induce un errore che in genere è quello più consistente.

È opportuno prestargli attenzione particolare se si vogliono ottenere dei risultati validi dal punto di vista scientifico.

Tale errore può essere espresso sotto forma di errore nelle magnitudini, determinabile con la formula approssimata (ma sufficiente per i nostri scopi) dovuta a Radu Corlan (è la stessa impiegata dall'AAVSO):

$$\sigma_p = 0.09 \frac{A^{1.75} e^{-H/8000}}{D^{2/3} \sqrt{2t}}$$

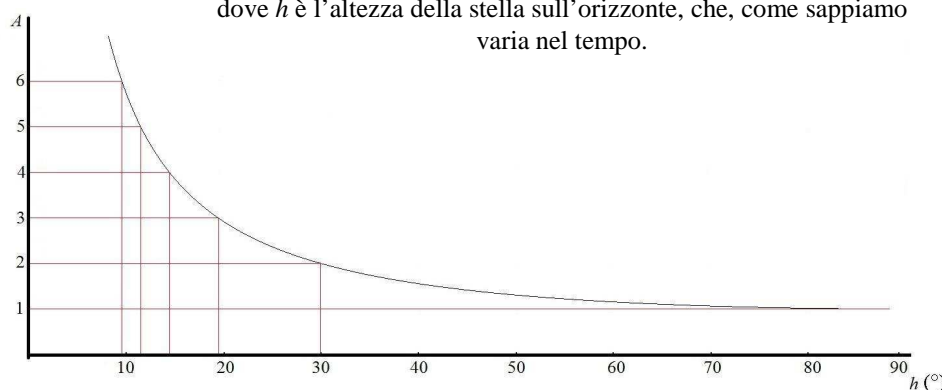
dove  $A$  è la **massa d'aria**,  $D$  è il diametro in cm del telescopio,  $H$  l'altezza sul livello del mare (in metri) e  $t$  il tempo di esposizione in secondi.

## Scintillazione atmosferica

La massa d'aria è una funzione della distanza zenitale  $z$ ; dipende quindi dalla posizione della stella e può essere determinata, con buona approssimazione, dalla relazione

$$A \approx \frac{1}{\cos z} = \frac{1}{\operatorname{sen} h}$$

dove  $h$  è l'altezza della stella sull'orizzonte, che, come sappiamo varia nel tempo.



## Scintillazione atmosferica

Nelle tabelle vengono riportati alcuni valori di  $\sigma_s$  per alcuni diametri di telescopio e tempi di esposizione variabili tra 10 e 60 secondi.

Tabella 1

$\sigma_s$  dovuto dalla scintillazione atmosferica in funzione del diametro del telescopio e del tempo d'esposizione per  $A = 1$  (altezza della stella tra  $45^\circ$  e lo zenit)

t (secondi)	20 cm	25 cm	30 cm	40 cm	50 cm
10	0,0028	0,0024	0,0021	0,0018	0,0015
20	0,0020	0,0017	0,0015	0,0012	0,0011
30	0,0016	0,0014	0,0012	0,0010	0,0009
40	0,0014	0,0012	0,0011	0,0009	0,0008
50	0,0012	0,0011	0,0010	0,0008	0,0007
60	0,0011	0,0010	0,0009	0,0007	0,0006

Tabella 2

$\sigma_s$  dovuto dalla scintillazione atmosferica in funzione del diametro del telescopio e del tempo d'esposizione per  $A = 2$  (altezza della stella tra  $25^\circ$  e  $45^\circ$ )

t (secondi)	20 cm	25 cm	30 cm	40 cm	50 cm
10	0,0083	0,0071	0,0063	0,0052	0,0045
20	0,0058	0,0050	0,0045	0,0037	0,0032
30	0,0048	0,0041	0,0037	0,0030	0,0026
40	0,0041	0,0036	0,0032	0,0026	0,0023
50	0,0037	0,0032	0,0028	0,0023	0,0020
60	0,0034	0,0029	0,0026	0,0021	0,0018

## Errore stocastico standard

Per migliorare l'accuratezza delle misure è necessario valutare anche l'**errore stocastico standard** che è legato al **rapporto segnale/rumore** ( $S/N$ ) dalla relazione:

$$\sigma_{ST} = \frac{k}{(S/N)}$$

Dove  $k$  è una opportuna costante.

## Rapporto segnale/rumore

In elettronica il rapporto segnale/rumore, spesso abbreviato con la sigla inglese *SNR* (Signal to Noise Ratio) o  $S/N$ , è una grandezza numerica definita da:

$$(S/N) = \frac{\text{potenza del segnale}}{\text{potenza del rumore}}$$

Per determinare ( $S/N$ ) in una immagine CCD per effettuare misure fotometriche si può adottare la formula:

$$(S/N) = \frac{N_{OBJ}}{\sqrt{\frac{N_{OBJ}}{G} + n \cdot \sigma_{CIELO}^2 + \frac{n}{p} \sigma_{CIELO}^2}}$$

$$N_{OBJ} = N_{TOT} - n \cdot \bar{N}_{CIELO}$$



## Rapporto segnale/rumore

Quando si effettuano misure fotometriche di una stella è necessario valutare il numero effettivo di conteggi dovuti ai fotoni che arrivano dalla stella.

Dal conteggio complessivo va quindi tolto il fondo-cielo.

Nei software che si utilizzano per fare queste misure viene quindi definito un cerchio che contiene l'oggetto che vuol misurare e un anello in cui misurare il fondo-cielo

$N_{TOT}$  è il numero totale dei conteggi nel cerchio

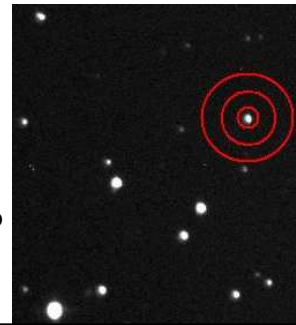
$\overline{N}_{CIELO}$  è la media dei conteggi nell'anello

$n$  è il numero di pixel nel cerchio

$p$  è il numero di pixel nell'anello

$\sigma_{CIELO}$  è la deviazione standard dei pixel nell'anello

$G$  è il guadagno del sensore



## Rapporto segnale/rumore

I software commerciali che in genere si utilizzano per fare fotometria danno un  $(S/N)$  doppio rispetto a quello calcolato con la formula data sopra.

Si ha pertanto che:

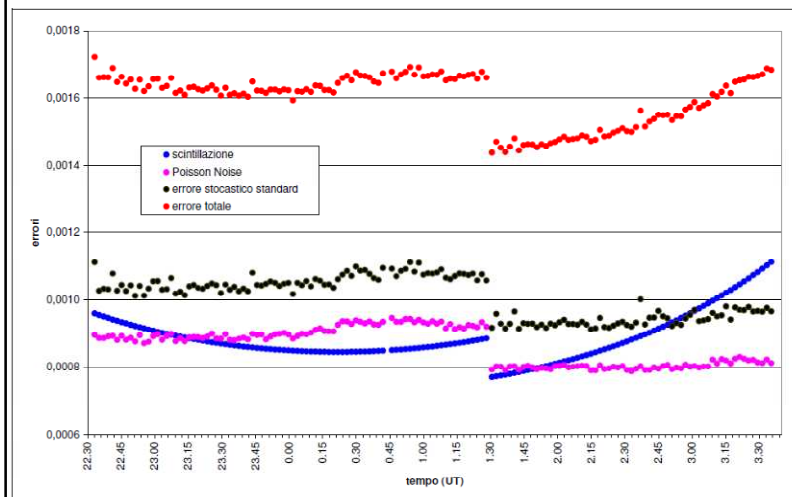
$k = 1.09$  se  $(S/N)$  viene calcolato con la formula

$k = 2.18$  se per  $(S/N)$  si prende il valore fornito dal software.

## Errore totale

L'errore totale è dato da:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_P^2 + \sigma_S^2 + \sigma_{ST}^2}$$



Andamento degli errori misurati durante il transito del pianeta WASP-1 del 14.09.07.

Il salto è dovuto alla modifica della durata dell'esposizione, resasi necessaria per mantenere basso l'errore di scintillazione che stava aumentando per l'abbassamento della stella sull'orizzonte.

## Software da utilizzare

Nelle misure che faremo verrà utilizzato il software MaxIm DL.

È possibile richiedere una demo di MaximDL5 (durata 30 giorni) dalla pagina

[http://www.cyanogen.com/maximdl\\_dl.php](http://www.cyanogen.com/maximdl_dl.php)

## SBIG – ST9XE

Specifiche CCD	
CCD	Kodak Enhanced KAF-0261E (Class 1) + Texas Instruments TC-237
Pixel Array	512 x 512 pixels, 10.2 x 10.2 mm
Total Pixels	262,144
Pixel Size	20 x 20 $\mu\text{m}$
Full Well Capacity	150,000 $e^-$
Dark Current	4 $e^-$ /pixel/s at 0° C
Antiblooming	Non-ABG only



Specifiche di lettura	
Shutter	Electromechanical
Exposure	0.11 to 3600 seconds, 10ms resolution
A/D Converter	16 bits
A/D Gain	2.2 $e^-$ /ADU
Read Noise	15 $e^-$ RMS
Binning Modes	1 x 1, 2 x 2, 3 x 3
Full Frame Acquisition (including digitization and download) with high speed USB interface	< 1 s

## Tecniche di ripresa

**PER LA DETERMINAZIONE DELLA CORRETTA ESPOSIZIONE SI CONSIGLIA DI EFFETTUARE TUTTE LE PROCEDURE IN UNA NOTTE PRECEDENTE IL TRANSITO.**

- A. Stabilizzare termicamente la strumentazione.
- B. Puntare il telescopio sul campo della stella.
- C. Inserire l'autoguida: è fondamentale perché riduce l'errore fotometrico introdotto dal "mosso" stellare.
- D. Individuata la stella, impostare il tempo di integrazione (secondo le tabelle indicate); è comunque sconsigliato scendere al di sotto di 60 s, qualunque sia il telescopio od il CCD impiegato.
- E. Eseguire alcune riprese di test e verificare che con il tempo di integrazione scelto (S/N) della stella con pianeta in transito e delle stelle di confronto si adeguato (>1000).

## Tecniche di ripresa

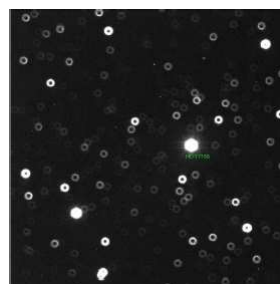
### **FONDAMENTALE: LA STELLA CON IL PIANETA IN TRANSITO E LE STELLE DI RIFERIMENTO NON DEVONO AVERE PIXEL SATURI**

Una delle condizioni chiave affinché la precisione fotometrica sia sufficiente per rilevare con chiarezza il transito è che il livello ADU del pixel più luminoso della stella sia intorno a **25000-30000** (per una camera CCD a 16 bit).

Nel caso in cui la luminosità della stella fosse troppo elevata, si potrà interporre un filtro (R oppure V).

In alternativa si potrà anche sfocare l'immagine stellare di 2 o 3 volte la FWHM, ma anche fino ad ottenere delle immagini a ciambella.

Ciò crea però potrebbe creare problemi nell'uso dell'autoguida.



## Tecniche di ripresa

### **NELLA NOTTE DEL TRANSITO**

1. Stabilizzare termicamente la strumentazione prima di iniziare le riprese.
  2. Accendere il CCD e attendere il raggiungimento della temperatura d'esercizio.
- RICORDATE CHE LE RIPRESE DOVRANNO COMINCIARE ALMENO 30 MINUTI PRIMA DELL'INIZIO DEL TRANSITO E TERMINARE 30 MINUTI DOPO LA FINE.**
3. Puntare il telescopio sul campo della stella con il pianeta in transito, un'ora prima dell'evento. Inserire l'autoguida che, per l'intera durata dell'evento, non dovrà mai essere disattivata.
  4. Eseguire alcune riprese di test con il tempo di integrazione precedentemente determinato e verificare che il rapporto S/N della stella con pianeta in transito e delle stelle di confronto sia adeguato (>1000).

## Tecniche di ripresa

Nel caso che S/N non raggiunga il valore indicato, non aspettiamoci una precisione fotometrica molto elevata.

Se vogliamo un risultato ragionevole ognuna delle tre componenti deve essere al più di 0.002 magnitudini.

**A QUESTO PUNTO SI POSSONO AVVIARE LE RIPRESE.**

## Tecniche di ripresa

Al termine del transito si devono realizzare i bias (almeno una ventina), i dark (tra 20 e 40) ed i flat field (il loro numero deve essere di diverse decine).

La qualità del FLAT FIELD incide in modo determinante sull'accuratezza delle misure fotometriche

Più bias, dark e flat field si fanno e più si riduce l'errore di Poisson.

Questa fase può essere MOLTO lunga, per cui è buona norma provvedere a realizzarli nelle notti precedenti (almeno i dark e i bias).

Quando il tempo di integrazione del flat è di alcuni secondi è opportuno effettuare dei dark anche per questi tempi di integrazione e applicare dark e bias anche ai flat field.

***CIO' CONCLUDE LA FASE DI ACQUISIZIONE***

## Tecniche di ripresa

Per la riduzione delle immagini i passi sono pochi e tutti automatici.

*Calibrazione delle immagini*

*Allineamento delle immagini*

*Fotometria*

## Tecniche di ripresa

### *Calibrazione delle immagini*

Consiste nel correggere le immagini eliminando i vari “rumori”, in pratica è necessario applicare bias, dark e flat field alle immagini.

I software normalmente utilizzati effettuano questo lavoro in automatico.

Sostanzialmente bisogna crearsi: un **MASTER BIAS** facendo la *mediana* dei bias e un **MASTER DARK FLAT** facendo la *mediana* dei dark fatti con i tempi dei flat field.

Calibrare i flat field con i MASTER appena creati e quindi creare un **MASTER FLAT** facendo la *mediana* dei flat field.

Creare quindi un **MASTER DARK IMAGE** mediando i dark fatti con i tempi delle immagini.

Applicare il **MASTER DARK IMAGE**, il **MASTER FLAT** e il **MASTER BIAS** a tutte le immagini.

Le procedure saranno messe a disposizione.

## Tecniche di ripresa

### *Allineamento delle immagini*

Consiste nell'allineare le immagini alla stella in esame per eliminare eventuali slittamenti.

Anche in questo caso i software utilizzati hanno una funzione che effettua questa operazione.

## Tecniche di ripresa

### *Fotometria*

La procedura di MaxIm permette di avere rapidamente la curva di luce.

Dopo aver selezionato i raggi dei cerchi per la fotometria, basta indicare qual è la stella da misurare (***NEW OBJECT***) e quali sono le stelle di confronto (***NEW REFERENCE STAR***).

Il comando ***VIEW PLOT*** ci permette di visualizzare il grafico della curva di luce.

Il comando ***SAVE DATE*** ci permette di salvare i dati per successive rielaborazioni con un foglio elettronico (Excel o Origin).

## Tecniche di ripresa

Per la determinazione degli errori è necessario avere a disposizione dei dati che sono contenuti nella finestra "Information" di MaxIm.

Tali informazioni possono essere salvate su un file utilizzando un script che contiene la funzione di MaxIm

***Document.CalcInformation*** che verrà resa disponibile.

