

# Metodi osservativi di pianeti extrasolari

Lezione SP 5

G. Vladilo

Astronomia Osservativa C, SP 5, Vladilo (2011)

1

## Importanza dello studio di pianeti extrasolari

- **Lo studio dei pianeti extrasolari ha forti motivazioni scientifiche, tra le quali ne citiamo due:**
  - Mettere alla prova modelli di formazione ed evoluzione di sistemi planetari in un gran numero di sistemi extrasolari
    - Il Sistema Solare potrebbe non essere rappresentativo dei sistemi planetari
  - Quantificare la frequenza di pianeti con condizioni fisiche atte a sostenere la vita
- **Le osservazioni di pianeti extrasolari richiedono un notevole sforzo di affinamento delle tecniche osservative astronomiche**
  - Imaging, coronografia, spettroscopia ad alta risoluzione, fotometria, interferometria, e altre ancora

Astronomia Osservativa C, SP 5, Vladilo (2011)

2

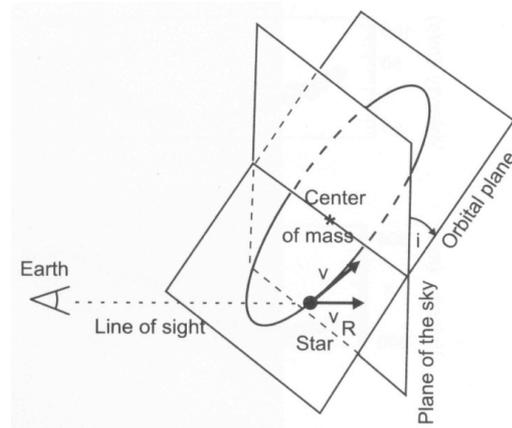
# Metodi di rivelazione di pianeti extrasolari

- **Metodi diretti**
  - Immagine diretta del pianeta
- **Metodi indiretti**
  - Sostanzialmente riconducibili a due effetti:
    - Perturbazione gravitazionale del moto stellare
    - Variazioni di luminosità stellare

Prima di addentrarci nei singoli metodi  
facciamo alcune considerazioni introduttive

## Metodi di rivelazione di pianeti extrasolari Introduzione

- **Configurazione geometrica dell'osservazione**
  - Chiamiamo  $i$  l'angolo tra l'asse di rivoluzione orbitale e la linea di vista (ossia l'angolo tra il piano orbitale e il piano del cielo)  
Con tale convenzione  
il vettore velocità del moto della stella nel piano orbitale del pianeta  
viene proiettato sulla linea di vista con un fattore  $\sin i$   
e sul piano del cielo con un fattore  $\cos i$



## Introduzione

- **Derivazione dei principali parametri orbitali**

- Si utilizza la terza legge di Keplero

$$P^2 = \frac{4\pi^2 a^3}{G(M_* + m_p)}$$

- Si assume che la massa del pianeta sia trascurabile rispetto a quella della stella:  $m_p \ll M_*$
- Si stima la massa della stella,  $M_*$ , da uno studio spettroscopico e da modelli di evoluzione stellare
- A questo punto restano due incognite:
  - Il semiasse maggiore dell'orbita,  $a$
  - Il periodo orbitale del pianeta,  $P$
- I diversi metodi riescono a misurare o l'una o l'altra delle due grandezze; nota una si ricava l'altra

## Metodi diretti

- **Immagine diretta**

- Si cerca l'immagine del pianeta nel campo della stella

- **Difficoltà osservative**

- Contrasto elevatissimo  
 $10^9$ - $10^{10}$  nel visibile ;  $10^6$ - $10^7$  nell'IR ( $\sim 10 \mu\text{m}$ )
- Separazione angolare estremamente piccola  
Frazione di arcsec, decisamente inferiore a "seeing"  
Esempio: separazione Terra-Sole vista da 20 pc: 50 mas

- **Bias osservativi**

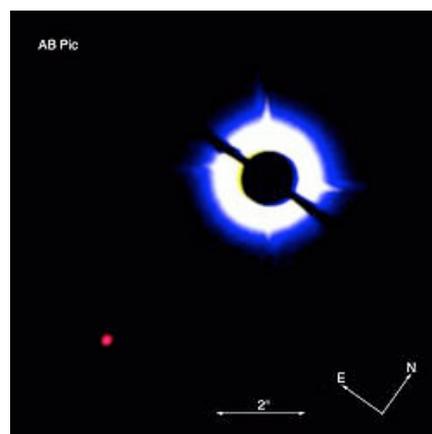
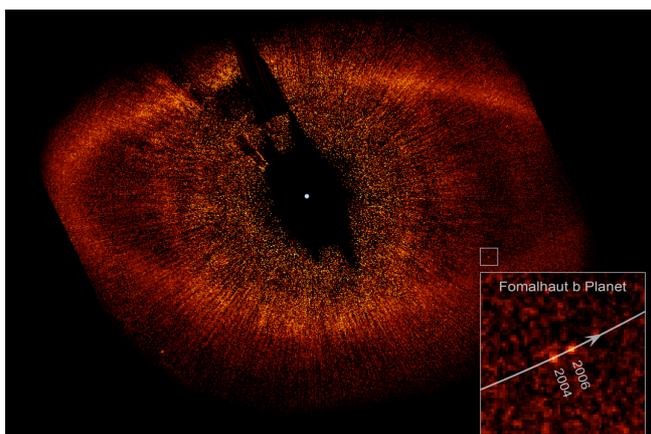
- Si selezionano preferenzialmente pianeti
  - a grandi distanze dalla stella
  - di maggior luminosità intrinseca
  - con rapporto  $m_p/M_*$  relativamente alto

## Metodi diretti

- **Parametri misurabili**
  - Parametri orbitali  
Nota la distanza della stella si misura direttamente il semiasse maggiore,  $a$ , e si ricava quindi il periodo  $P$  dalla terza legge di Keplero
  - Temperatura effettiva  
Dal colore misurato fotometricamente
- **Parametri misurabili indirettamente (model-dependent)**
  - Massa e dimensione del pianeta  
Si misura l'emissività e si assume un modello di evoluzione planetaria  
L'errore sulle masse è grande, legato alle incertezze sull'età del sistema
- **Vantaggi rispetto ad altri metodi**
  - Studi di pianeti lontani dalla stella  
In principio, uno dei metodi più promettenti per ottenere informazioni dirette sulle proprietà del pianeta

## Metodi diretti

- **Esempi**
  - Fomalhaut b  
scoperto nel 2008 rianalizzando dati HST  
 $d = 115 \text{ UA}$  ;  $e \sim 0.11$  ;  $M \sim 1 M_J$  ;  $P \sim 870$  anni
  - AB Pic  
Scoperto un compagno planetario utilizzando un coronografo (VLT, NACO)



## Metodi diretti

- **Prospettive future**
  - Duplice obiettivo
    - Separazione pianeta stella
    - Aumento del range dinamico
- **Tecniche**
  - Per oscurare la stella
    - Coronografia
    - “Occulters”
  - Per aumentare la risoluzione spaziale
    - Interferometria
  - Per diminuire il contrasto
    - Utilizzo della banda infrarossa



## Metodi indiretti

- **Principali parametri orbitali**
  - Si misura direttamente il periodo orbitale del pianeta,  $P$ , dalla modulazione del segnale osservato
    - Il segnale modulato può essere di tipo temporale, spettroscopico, fotometrico o di posizione angolare
  - Noto  $P$  si ricava il semiasse maggiore,  $a$ , dalla terza legge di Keplero

$$P^2 = \frac{4\pi^2 a^3}{G(M_\star + m_p)}$$

## Metodi indiretti

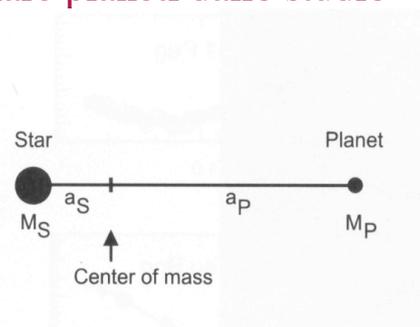
- **Bias osservativo legato alla baseline temporale delle osservazioni**
  - Gli esempi di valori di  $P$  riportati in tabella per i pianeti del Sistema Solare ci indicano che sono necessarie basi temporali osservative estremamente lunghe per trovare pianeti con  $a > \sim 5$  AU in stelle di tipo solare
- **Qualsiasi sia il metodo utilizzato, ci sarà un bias osservativo che favorisce il rivelamento di pianeti con periodi brevi e quindi valori piccoli dei semiassi maggiori**
  - Questo è un motivo per cui vengono facilmente trovati pianeti con periodi orbitali di pochi giorni, quindi con orbite più vicine alla stella di quanto non lo sia Mercurio al Sole

Pianeta	$a$ [AU]	$P$ [anni]
Mercurio	0.387	0.24
Venere	0.723	0.62
Terra	1.000	1.00
Marte	1.523	1.88
Giove	5.203	11.86
Saturno	9.537	29.42
Urano	19.191	83.75
Nettuno	30.069	163.72

## Metodi indiretti:

### Perturbazione gravitazionale del moto stellare

- **Il campo gravitazionale del pianeta induce una perturbazione sul moto della stella**
  - Il moto stellare riflesso della perturbazione gravitazionale del pianeta viene chiamato “reflex motion”
- **Esistono diversi metodi indiretti per rivelare pianeti dallo studio delle perturbazioni del moto stellare**
  - Metodo del timing di pulsars
  - Metodo delle velocità radiali
  - Metodo astrometrico



## Metodo del timing di pulsars

- È il metodo che per primo ha portato alla scoperta di pianeti extrasolari
  - Wolszczan & Frail (1992)  
Prima di una serie di sorprese che ci hanno fatto capire che i pianeti extrasolari possono esistere in una varietà di situazioni, anche inaspettate; in questo caso si sono trovati pianeti attorno ad una stella di neutroni
- Si utilizza l'estrema regolarità temporale degli impulsi emessi da una pulsar nella banda radio
  - Stelle di neutroni rotanti con periodi dell'ordine dei millisecondi
  - Si cercano variazioni nel tempo di arrivo (TOA) degli impulsi, generate dalle perturbazione del moto della stella di neutroni indotte da pianeti orbitanti attorno ad essa  
TOA: "time-of-arrival"

## Metodo del timing di pulsars

- **Derivazione della massa del pianeta**
  - Per una tipica massa di una pulsar,  $M_{\text{psr}} = 1.35 M_{\odot}$ , la relazione tra la massa del pianeta,  $m_2$ , il suo periodo orbitale,  $P_b$ , e la semi-ampiezza,  $\Delta t$ , delle variazioni di TOA, si ha la seguente relazione  
Wolszczan (1999)  
$$m_2 \sin i = 21.3 M_{\oplus} \left( \frac{\Delta t}{1 \text{ ms}} \right) \left( \frac{P_b}{1 \text{ day}} \right)^{-2/3}$$
  - Si ricava un limite inferiore della massa del pianeta
- **Vantaggi del metodo**
  - Grazie all'estrema precisione delle misure si riescono a rivelare pianeti di massa terrestre e sistemi multipli  
Sistema con due pianeti di massa terrestre rivelato già nel 1992
- **Svantaggi**
  - Utilizzabile in maniera molto limitata, solo per le pulsar

## Metodo delle velocità radiali (Metodo Doppler)

- **Misura spettroscopica**

- Consiste nella misura di variazioni della componente radiale del moto stellare indotto dal pianeta

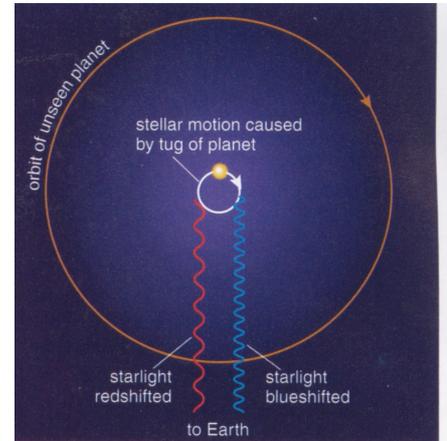
La velocità radiale della stella contiene un termine,  $V_* \sin i$ , variabile nel tempo, dovuto alla proiezione del vettore del “reflex motion” stellare lungo la linea di vista

Mediante l’effetto Doppler si misurano le variazioni di velocità radiale dallo spostamento periodico delle righe fotosferiche nello spettro stellare

- Si costruisce quindi una curva di velocità radiale in funzione del tempo

- **Metodo estremamente efficiente**

- Ha permesso di trovare il maggior numero di esopianeti (attualmente circa 500 esopianeti in più di 400 sistemi planetari)
- Segnale maggiore quando la linea di vista cade nel piano dell’orbita ( $\sin i \cong 1$ )



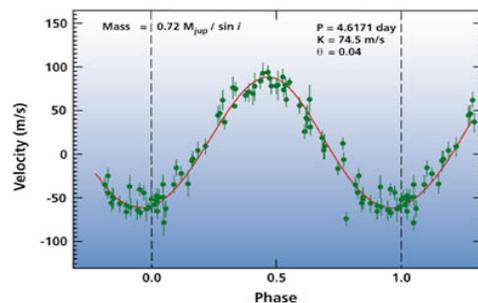
## Metodo delle velocità radiali

- **Principali parametri ricavabili dalla curva di velocità radiale**

- La semi-ampiezza,  $K$ , e il periodo,  $P$   
L’ampiezza corrisponde alla variazione di  $V_* \sin i$  misurata nel corso di un periodo

- Nel caso di orbite circolari la semi-ampiezza  $K$  è data da

$$K = (2\pi G/P)^{1/3} M_p \sin i / (M_* + M_p)$$



## Metodo delle velocità radiali

- **Effetti selettivi**
  - A parità di massa della stella, il “reflex motion” della stella è proporzionale a  $M_p P^{-1/3}$   
Più facile rivelare il moto stellare quando i pianeti sono massicci e hanno un breve periodo orbitale (piccoli semiassi maggiori)
  - A parità di massa del pianeta la perturbazione sulla stella aumenta con  $M_*^{-1}$   
Più facile rivelare il moto di stelle di bassa massa (ad esempio stelle M)

## Metodo delle velocità radiali

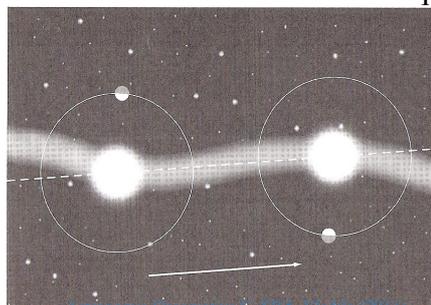
- **Relazione con parametri orbitali e planetari**
  - Assumendo  $M_p \ll M_*$  si ricava, nel caso di un'orbita circolare,  
$$M_p \sin i \cong K (P/2\pi G)^{1/3} M_*^{2/3}$$
  - Dai parametri della curva di velocità radiale si ricava quindi un limite inferiore della massa del pianeta
  - Dal periodo si ricava, mediante la terza legge di Keplero, il semiasse maggiore,  $a$
  - Con un'analisi più raffinata si ottiene anche l'eccentricità  $e$   
$$M_p \sin i \cong K (P/2\pi G)^{1/3} M_*^{2/3} (1-e^2)^{1/2}$$

## Metodo delle velocità radiali

- Valori tipici dell'effetto doppler per pianeti di diverse masse posti ad una distanza di 1 AU attorno a una stella solare
  - 12.4 m/s per un pianeta tipo Giove
  - 9 cm/s per una pianeta tipo Terra
- Attuali limiti di misura:  $\sim 0.4$  m/s
  - È certamente possibile raggiungere il livello di precisione di  $\sim 10$  cm/s e forse arrivare alla capacità di rilevazione di un pianeta terrestre
  - Sono in fase di sviluppo miglioramenti tecnologici atti ad aumentare la precisione delle misure in velocità radiali e ad aumentare la stabilità di tali misure su lunghi periodi di tempo
- Limiti per applicazioni future del metodo
  - Effetti Doppler dovuti a fenomeni di attività stellare potrebbero mascherare il segnale Doppler indotto dal pianeta
    - Pulsazioni intrinseche stellari, variabilità magnetica (spots, flares)

## Metodo astrometrico

- Misura astrometrica
  - Consiste nella misura di oscillazioni del moto proprio della stella attorno al centro di massa del sistema stella-pianeta
  - Segnale maggiore quando la linea di vista cade è perpendicolare al piano dell'orbita ( $\sin i \approx 0$ )
- Parametri orbitali e planetari
  - Le oscillazioni del moto proprio della stella sono proporzionali a  $(M_p/M_*)(a/l)$ 
    - $a$ : semiasse maggiore;  $l$ : distanza dalla Terra
  - Dalla ricostruzione dell'orbita di ricavano il periodo  $P$  e i parametri orbitali  $a$  ed  $e$
  - Da una stima della massa e distanza della stella si ricava quindi  $M_p$

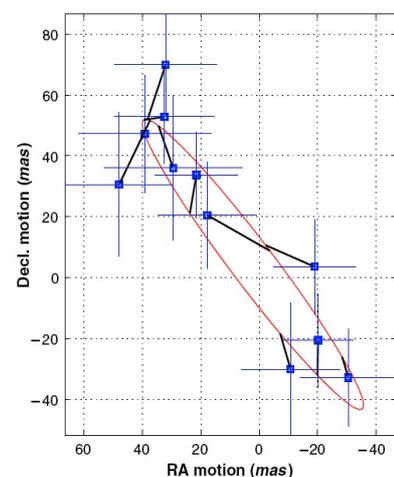


## Metodo astrometrico

- Esempi di variazioni del moto proprio attesi per pianeti attorno a una stella di tipo solare situata a una distanza di 10 pc di distanza
  - 500  $\mu\text{as}$  for un pianeta tipo Giove
  - 0.33  $\mu\text{as}$  per un pianeta tipo Terra
- Misurare tali variazioni è un grossa sfida tecnologica
  - Attualmente riusciamo misurare moti propri con precisioni astrometriche dell'ordine del milliarcsec

## Metodo astrometrico

- Esempio di possibile rivelazione di un esopianeta attorno a una stella di sequenza principale con il metodo astrometrico
  - Segnale astrometrico relativamente intenso grazie a una combinazione di fattori favorevoli:
    - distanza dalla stella relativamente piccola, massa stellare molto piccola, massa del pianeta relativamente grande
  - le variazioni di moto proprio sono dell'ordine delle decine di milliarcsec
    - $D \sim 6 \text{ pc}$   $M_{\text{star}} \sim 0.08 M_{\text{sun}}$   $M_{\text{plan}} \sim 6M_{\text{Jup}}$
    - Pravdo & Shaklan 2009
- Il risultato non è però stato confermato da una successiva analisi condotta con il metodo delle velocità radiali nel vicino infrarosso
  - Bean et al. 2010



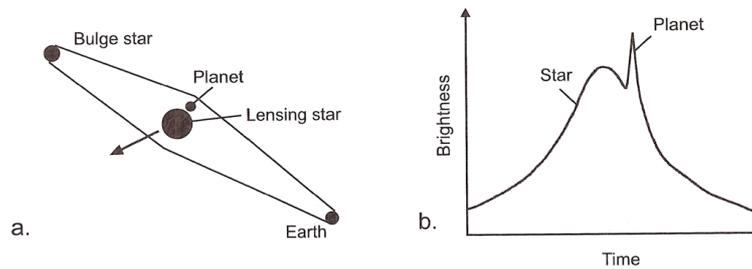
# Metodo astrometrico

- **Vantaggi del metodo astrometrico**
  - È sensibile a pianeti con grandi valori del semiasse maggiore
  - È pressochè immune ai problemi di variabilità e attività stellare che costituiranno il limite futuro di applicazione del metodo Doppler
- **Potenziali problemi per la rivelazione di pianeti di tipo terrestre**
  - In un sistema multiplo contenete pianeti terrestri e giganti il segnale astrometrico dei pianeti giganti sarebbe estremamente più forte di quello dei pianeti terrestri
- **Progetti futuri finalizzati a rivelare un numero grande di pianeti con il metodo astrometrico**
  - Esempio: missione GAIA dell'ESA è finalizzata a ottenere precisioni di  $\sim 20 \mu\text{as}$   
Con tale missione si spera di riuscire a rivelare alcune decine di migliaia di pianeti nelle vicinanze del Sole

## Metodi indiretti: Variazioni del flusso luminoso stellare

- **Si misurano variazioni della curva di luce stellare**
  - Tali metodi indiretti funzionano unicamente per particolari configurazioni geometriche
- **Metodi**
  - **Microensing gravitazionale**  
Curva di luce di una stella di fondo non associata al pianeta
  - **Metodo dei transiti**  
Curva di luce della stella che ospita il pianeta

## Metodo del microlensing gravitazionale



- **Configurazione geometrica**

- Una stella con pianeta attraversa la visuale di una stella di fondo come conseguenza del moto proprio relativo tra le due stelle
- Nel corso dell'attraversamento di tale visuale, la stella con pianeta agisce da lente gravitazionale su quella di fondo
  - La stella di fondo mostra un episodio temporale di aumento di luminosità
- Se la configurazione geometrica lo permette, il pianeta orbitante la prima stella può intensificare l'effetto lente nel corso del suo movimento orbitale
  - La stella di fondo mostra una breve intensificazione di luminosità sovrapposta al profilo di emissione nella curva di luce

Astronomia Osservativa C, SP 5, Vladilo (2011)

25

## Metodo del microlensing gravitazionale

- **La probabilità dell'evento aumenta con il quadrato della densità delle stelle di fondo**
  - È possibile trovare eventi di microlensing studiando campi affollati di stelle
  - Dal confronti di varie immagini di un campo affollato prese in tempi diversi, vi è una certa probabilità di trovare un evento
    - Richiede una collaborazione internazionale per osservare in maniera continua la regione di cielo d'interesse
- **Esempio di campo affollato utilizzato**
  - Il Bulge (rigonfiamento centrale) della nostra Galassia
    - Richiede una collaborazione continua tra osservatori dell'emisfero sud
- **Parametri misurabili**
  - Si misura direttamente massa e raggio del pianeta
    - Pur in assenza dello spettro della stella con pianeta

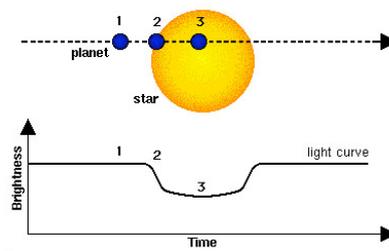
Astronomia Osservativa C, SP 5, Vladilo (2011)

26

## Metodo del microlensing gravitazionale

- **Vantaggi**
  - È sensibile a pianeti di piccola massa, anche di tipo terrestre
  - Si possono trovare sistemi planetari in un singolo evento
  - Si possono trovare oggetti di tipo planetario che non orbitano una stella
  - Si riescono a trovare pianeti molto lontani
    - L'effetto lente gravitazionale è massimo quando la lente è a una distanza grossomodo intermedia tra l'osservatore e la stella di fondo
    - Poichè le stelle di fondo del Bulge si trovano a vari kiloparsec, le stelle con pianeta vengono trovate tipicamente a distanze di alcuni kiloparsec
- **Svantaggi**
  - Evento unico, impossibile da predire
    - Impossibile fare osservazioni di follow up
  - La stella che fa da lente non è osservabile
  - Non si riescono a vincolare bene i parametri orbitali

## Metodo dei transiti



- Se l'orbita del pianeta è allineata con la linea di vista si può rivelare la presenza del pianeta dallo studio delle variazioni della curva di luce dovute al transito del pianeta di fronte alla stella
  - Configurazione geometrica:  $i \approx 90^\circ$

## Metodo dei transiti

- **Profondità del profilo della curva di luce**

- trascurando il flusso emesso dal pianeta e l'oscuramento al bordo del disco stellare (“limb darkening”) si ha

$$\Delta F = (F - F_{tr}) / F = (R_p/R_*)^2$$

$F$ : flusso osservato quando il pianeta è fuori dal transito

$F_{tr}$ : flusso osservato nel transito (minimo della curva di luce)

$R_p$ : raggio del pianeta

$R_*$ : raggio della stella

- **Raggio del pianeta**

- Il metodo dei transiti è l'unico che da' una misura del raggio del pianeta  $R_p$
- Il raggio  $R_p$  si ottiene dalla profondità del profilo, data una stima indipendente del raggio stellare  $R_*$

Per stimare  $R_*$  si fa un'analisi dettagliata della stella

In realtà  $R_*$  può essere vincolato anche da altri parametri ricavabili dalla curva di luce

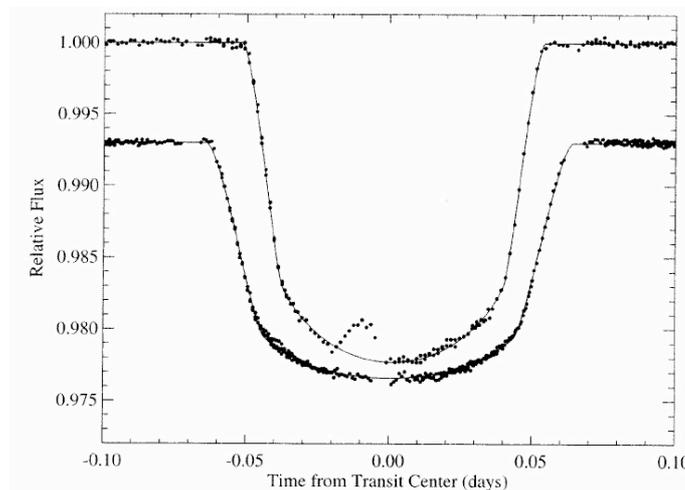
## Metodo dei transiti

- **Richiede un'alta precisione fotometrica**

- Esempi di profondità centrali attese per pianeti di diverso raggio in transito di fronte ad una stella di tipo solare ( $R_*=R_\odot$ )

Per un pianeta gigante  $R_p=R_{\text{giove}} \Rightarrow \Delta F=1\%$

Per un pianeta terrestre  $R_p=R_{\text{terra}} \Rightarrow \Delta F=0.01\%$



## Metodo dei transiti

- **Altri parametri della curva di luce**
  - Durata del transito
  - Durata dell'ingresso
  - Intervallo tra transiti successivi
- **Relazione con parametri orbitali e planetari**
  - L'intervallo tra transiti successivi è il periodo orbitale  $P$
  - La durata del transito e la durata dell'ingresso sono proporzionali a  $(1-b^2)^{1/2}$ , dove  $b$  è il parametro d'impatto:  $b = (a/R_*) \cos i$ 
    - Distanza proiettata tra il centro del pianeta e il centro del disco stellare
  - Combinando le diverse espressioni per la durata del transito e quella dell'ingresso si ottengono vincoli su  $R_*$ ,  $M_*$ ,  $a$ ,  $R_p$  e  $\cos i$ 
    - Si stimano  $R_*$  e  $M_*$  anche in maniera indipendente, da un'analisi dettagliata della stella (spettroscopia e modelli di evoluzione stellare)

## Metodo dei transiti

- **Effetti selettivi**
  - La probabilità geometrica di trovare un pianeta con il metodo dei transiti è proporzionale a  $R_*/a$ 
    - $R_*$ : raggio della stella;  $a$ : semi-asse maggiore orbitale
    - Valore tipico di probabilità:  $P \sim 0.0045 (1 \text{ AU}/a) (R_*/R_\odot)$
    - Charbonneau et al. (2007)
  - Conseguenze
    - Privilegiati piccoli valori di semiasse maggiore e quindi periodi brevi
    - Si trovano facilmente pianeti molto vicini alla stella
    - ad esempio “hot-Jupiters”
    - Estremamente difficile trovare oggetti a distanze maggiori di 5 - 10 AU
  - Tale effetto selettivo rafforza purtroppo quello dovuto alla limitata baseline temporale delle osservazioni, che già di per se' ci porta a selezionare pianeti con periodi brevi

## Metodo dei transiti

- **Necessità di surveys osservative**
  - Per ovviare alla bassa probabilità di trovare un transito planetario sono necessarie surveys osservative che seguano simultaneamente un grande numero di stelle
- **Necessità di monitoraggio continuo**
  - Osservazioni di lungo termine con copertura continua per non perdere l'evento del transito
    - Collaborazioni tra vari osservatori internazionali per garantire la copertura continua mediante osservazione da telescopi a diverse longitudini geografiche