

Metodi indiretti di rivelazione di esopianeti: Il metodo astrometrico

Metodo astrometrico

- **Misura astrometrica**
 - Consiste nella misura di oscillazioni del moto proprio della stella attorno al centro di massa del sistema stella-pianeta
 - Il segnale astrometrico si compone di tre termini:
 - 1) moto proprio del baricentro
 - 2) effetto di parallasse (riflesso del moto orbitale della Terra)
 - 3) reflex motion della stella
 - Il segnale è maggiore quando la linea di vista è perpendicolare al piano dell'orbita ($\sin i \approx 0$)

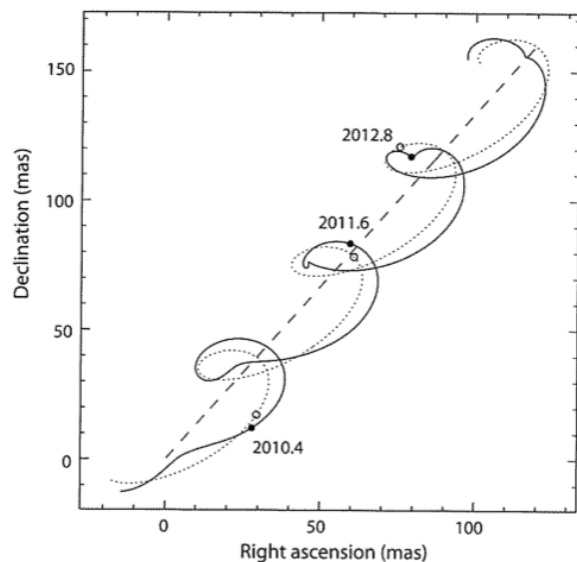


Figure 3.1: Schematic of the path on the sky of a star at $d = 50$ pc, with a proper motion of 50 mas yr^{-1} , and orbited by a planet of $M_p = 15 M_J$, $e = 0.2$, and $a = 0.6 \text{ AU}$. The straight dashed line shows the system's barycentric motion viewed from the solar system barycentre. The dotted line shows the effect of parallax (the Earth's orbital motion around the Sun, with a period of 1 year). The solid line shows the motion of the star as a result of the orbiting planet, the effect magnified by $\times 30$ for visibility. Labels indicate (arbitrary) times in years.

Metodo astrometrico

- **Parametri orbitali e planetari**

- Le oscillazioni del moto proprio della stella hanno ampiezza angolare

$$\alpha \cong (M_p/M_*)(a/d)$$

a : semiasse maggiore; d : distanza dalla Terra

- Dalla ricostruzione dell'orbita si ricavano:

il periodo P e i parametri orbitali a ed e

l'inclinazione del piano orbitale, i

- Da una stima della massa M_* e distanza d si ricava quindi M_p

- **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 μas for un pianeta tipo Giove
- 0.33 μas 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

3

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

- **Potenziati problemi per la rivelazione di pianeti di tipo terrestre**

- In un sistema multiplo contenente pianeti terrestri e giganti il segnale astrometrico dei pianeti giganti sarebbe estremamente più forte di quello dei pianeti terrestri

4

- **Esempio**

- Segnale astrometrico di un pianeta a lungo periodo:

ϵ Eri b ($d=3\text{pc}$)

$\alpha = 1.88 \text{ mas}$

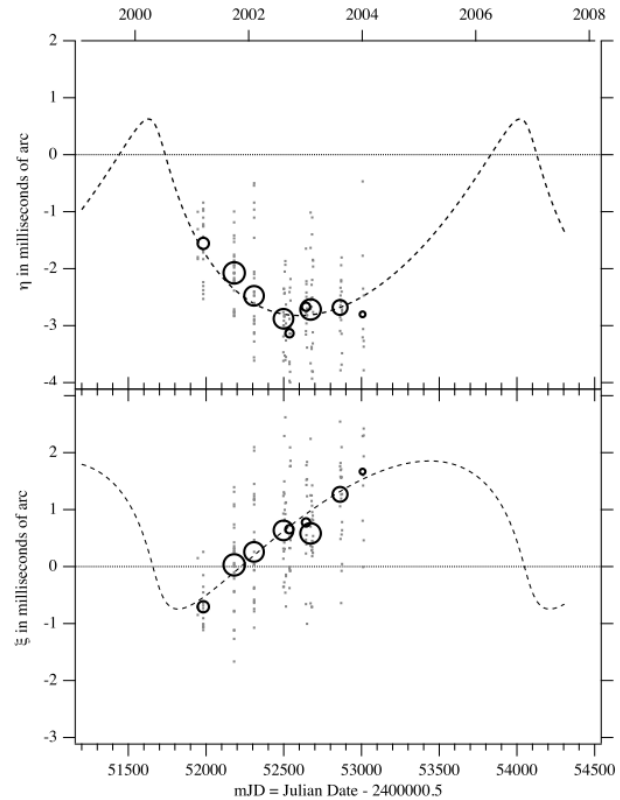
$M_p = 1.55 M_J$

$P = 6.85 \text{ yr}$

$a = 3.39 \text{ AU}$

Benedict et al. 2006

Risultato ottenuto combinando dati ottenuti con il metodo delle velocità radiali e dati astrometrici da Terra e dallo spazio (HST)



5

Esempio di fit simultaneo di dati di velocità radiale e astrometrici

La combinazione dei due tipi di misura permette di vincolare la massa

GJ 317b (Anglada-Escudè et al. 2012)

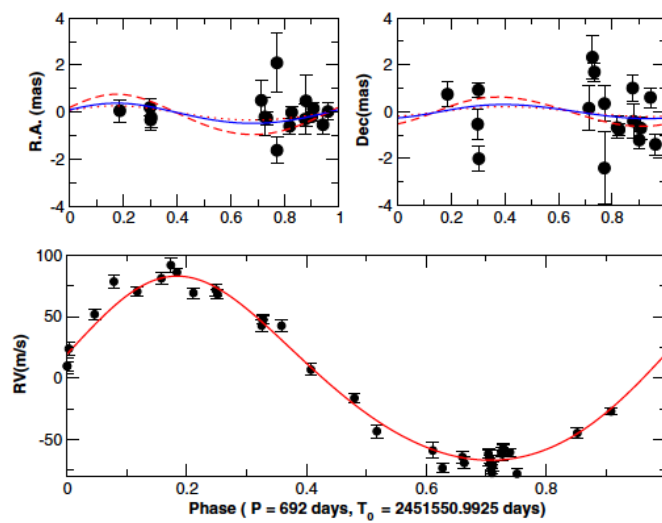


Figure 5. Best-fit astrometry + RV joint solution for GJ 317b. Top panels are R.A. and decl. as a function of time. The dashed red line corresponds to the signal of a $4.0 M_{Jup}$ mass planet. The dotted red line corresponds to the signal of a planet with the minimum mass allowed by the radial velocities ($1.8 M_{Jup}$). The best-fit solution is plotted as a blue line. Bottom panel: the radial velocity data plotted with the best-fit solution after removing the signal of planet c.

6

Metodo astrometrico: progetti osservativi

- Missione Gaia (ESA)
 - <http://gaia.esa.int>
 - Survey senza pre-selezione (unbiased) di 10^9 sorgenti puntiformi Galattiche (6-20 mag)
 - Precisione astrometrica, fino 10 μ as per le sorgenti più brillanti
 - Spettri di risoluzione intermedia per circa 150×10^6 stelle
- Dovrebbe permettere la rivelazione di alcune decine di migliaia di pianeti nelle vicinanze del Sole con il metodo astrometrico
 - Esempi di precisioni ottenibili:
6 μ as (a V=6 mag) e 200 μ as (a V=20 mag) per una stella G2V

Gli studi di pianeti extrasolari beneficeranno dei dati Gaia anche in maniera indiretta

Miglioramento sensibile nella calibrazione delle grandezze fisiche stellari

- ➔ Determinazione accurata dei raggi e masse stellari
- ➔ Determinazione accurata dei raggi e masse planetari con i metodi indiretti

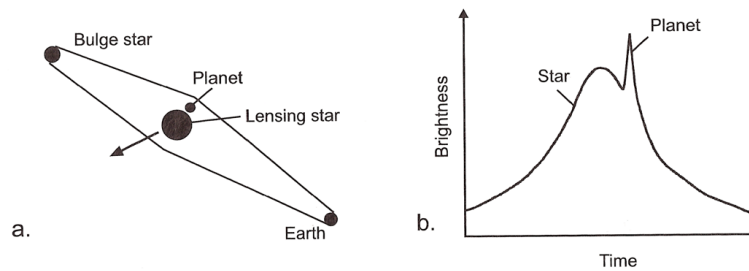
7

Metodi indiretti di rivelazione di esopianeti:

Variazioni del flusso luminoso stellare

- Si misurano variazioni della curva di luce stellare
 - Tali metodi indiretti funzionano unicamente per particolari configurazioni geometriche
- Metodi
 - Microlensing 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 stella interposta 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

9

Metodo del microlensing gravitazionale

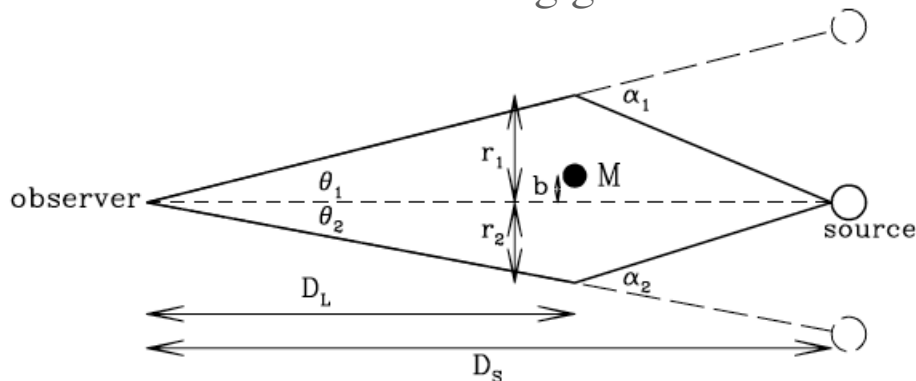


Fig. 1.1. The geometry of gravitational lens of mass, M , that is offset by a distance, b , from the line of sight to the source. The observer sees two images that are offset by angles, θ_1 and θ_2 from the line of sight to the source star.

Einstein ring radius

$$R_E \equiv \theta_E D_L \equiv \sqrt{\frac{4GM D_L (D_S - D_L)}{c^2 D_S}}$$

Bennet (2009)

L'effetto lente è massimo quando $D_L \sim 0.5 D_S$

Metodo del microlensing gravitazionale

- **Parametri misurabili**

- Rapporto di masse pianeta/stella, $q=M_p/M_*$
- Distanza stella-pianeta, d , in unità del raggio dell'Einstein ring, R_E

- Nota la massa della stella e la configurazione geometrica della lente, si determinano massa e raggio del pianeta

La massa della stella può essere stimata anche in assenza di uno spettro della stella che ospita il sistema planetario

11

Metodo del microlensing gravitazionale

- **La probabilità di avere una configurazione geometrica adeguata aumenta con il quadrato della densità delle stelle di fondo**

- Per trovare eventi di microlensing si studiano campi affollati di stelle
- Si confrontano immagini di un campo affollato prese in tempi diversi

Richiede una collaborazione internazionale per osservare continuamente la regione di cielo d'interesse da osservatori posti a diverse longitudini

- **Esempio di campo affollato utilizzato**

- Il Bulge (rigonfiamento centrale) della nostra Galassia
- Richiede una collaborazione tra osservatori dell'emisfero sud

Esperimento OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment)

<http://ogle.astrouw.edu.pl>

Originariamente pensato per scoprire eventi di microlensing dovuti alla presenza di dark matter lungo la linea di vista

12

Metodo del microlensing gravitazionale

- **Vantaggi**

- È sensibile a pianeti di piccola massa, anche di tipo terrestre
- Si possono trovare sistemi planetari multipli 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 (solo una stima del semiasse maggiore)

13

Esempio di evento di microlensing planetaria

OGLE-2005-BLG-390Lb (Beaulieu et al. 2006)

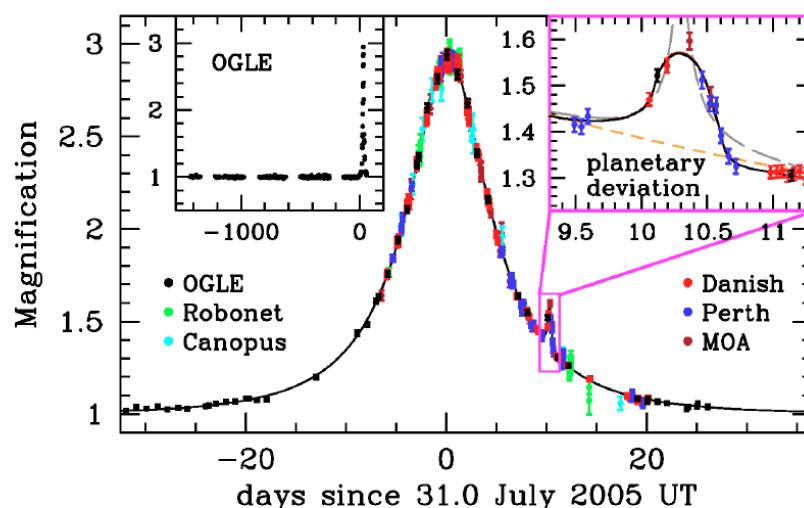


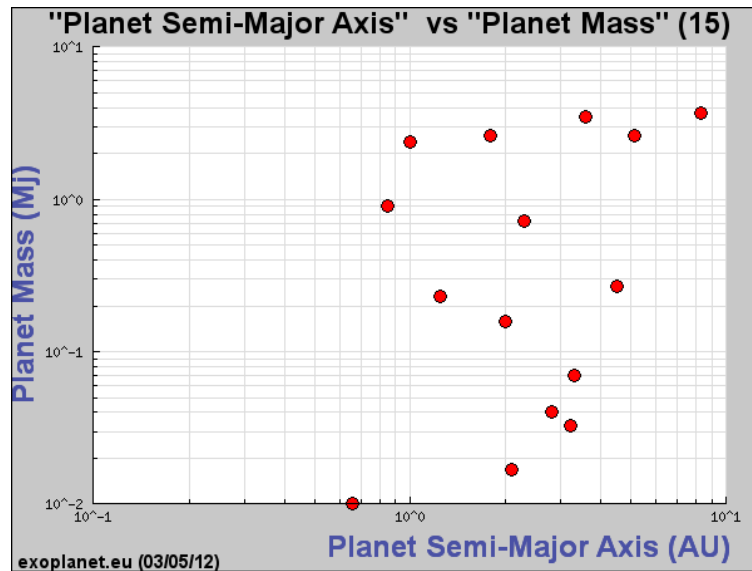
Figure 1 : The observed light curve of the OGLE-2005-BLG-390 microlensing event and best fit model plotted as a function of time. The data set consists of 650 data points from PLANET Danish (ESO La Silla, red points), PLANET Perth (blue), PLANET Canopus (Hobart, cyan), RoboNet Faulkes North (Hawaii, green), OGLE (Las Campanas, black), MOA (Mt John Observatory, brown).

14

Metodo del microlensing gravitazionale

Diagramma massa – semiasse maggiore di pianeti scoperti con il microlensing gravitazionale (15 pianeti a maggio 2012)

Coprono un notevole intervallo di semiasse maggiori e di masse



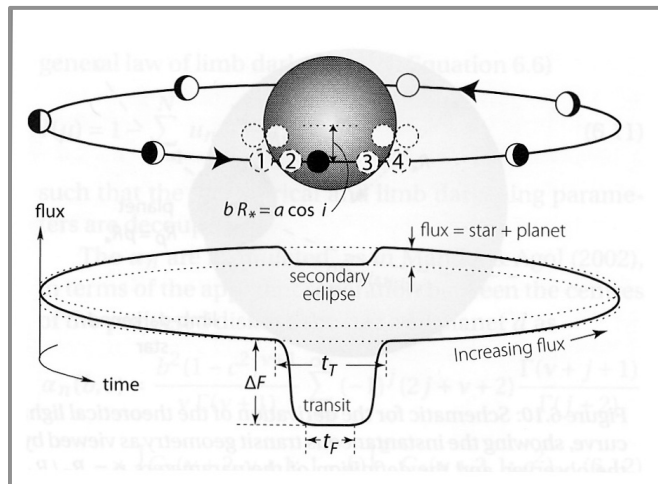
15

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
 - Microlensing 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

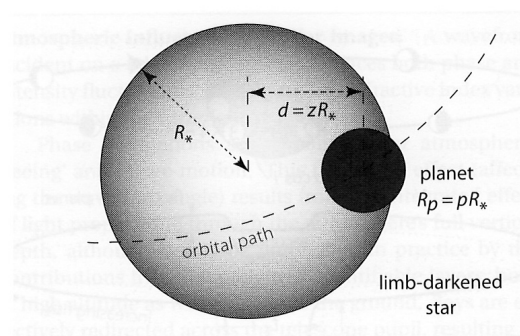
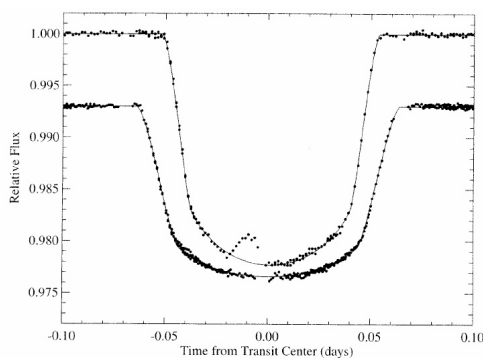
Metodo dei transiti



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

17

Metodo dei transiti



- **Curva di luce**
 - L'andamento esatto della curva di luce è complesso, in quanto dipende da parametri geometrici (tra cui il parametro d'impatto), stellari, orbitali e planetari
 - L'oscuramento al bordo della stella ("limb darkening") è uno degli effetti da tenere in conto per una ricostruzione della curva di luce

18

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

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

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 permette di ricavare il 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, aiutandosi con modelli di struttura stellari

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

19

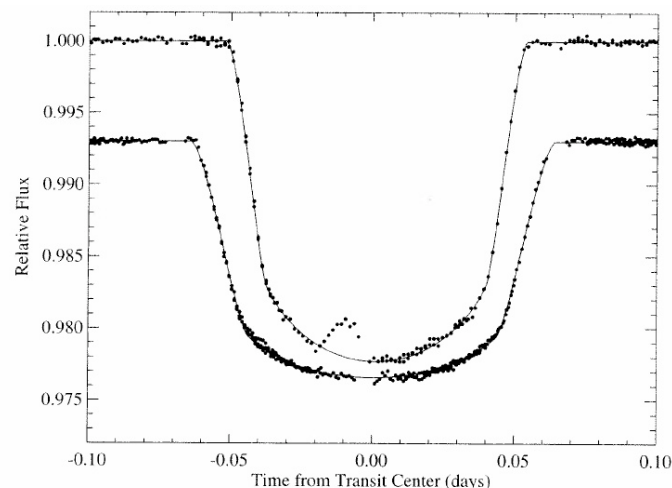
Metodo dei transiti

- **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 $R_p = R_{\text{giove}} \Rightarrow \Delta F_r = 1\%$

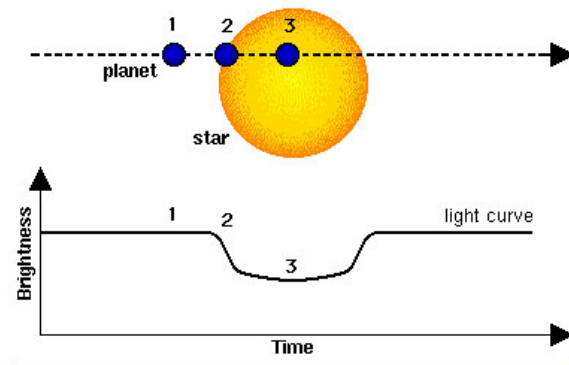
Per un pianeta terrestre $R_p = R_{\text{terra}} \Rightarrow \Delta F_r = 0.01\%$



20

Metodo dei transiti

- Altri parametri misurabili dalla curva di luce
 - Durata del transito
 - Durata dell'ingresso
 - Intervallo tra transiti successivi



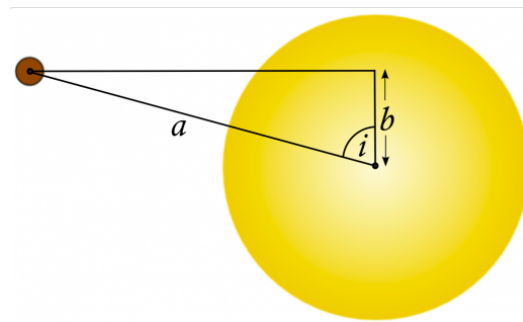
21

Metodo dei transiti

Parametro d'impatto

Distanza proiettata tra il centro del pianeta e il centro del disco stellare

$$b = (a/R_*) \cos i$$



22

Metodo dei transiti

- Relazioni tra grandezze osservabili e 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 $(1-b^2)^{1/2}$
 - Combinando le espressioni matematiche che esprimono la durata del transito e la durata 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)

23

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 geometrica:
 $p_{\text{geom}} \sim 0.0045 (1 \text{ AU}/a) (R_*/R_{\odot})$
Charbonneau et al. (2007)
 - Il numero di transiti osservati dipende anche dalla durata del transito
(Borucki & Summers, 1984)
Valore tipico espresso in ore, con a in AU
 $\Delta t \sim (13 \text{ h}) a^{1/2}$

24

Metodo dei transiti

- **Effetti selettivi**

- Dipendono principalmente dal fatto che $p_{\text{geom}} \sim R_*/a$
Privilegiati piccoli valori di semiasse maggiore e quindi periodi brevi
Si trovano più facilmente pianeti giganti molto vicini alla stella
ad esempio “hot-Jupiters”
Estremamente difficile trovare oggetti a distanze maggiori di 5 - 10 AU
- Tale effetto selettivo rafforza quello dovuto al limite della baseline temporale delle osservazioni, che già di per se’ ci porta a selezionare pianeti con periodi brevi

25

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 ($\gg 10^3$)

- **Necessità di monitoraggio continuo**

- Osservazioni di lungo termine con copertura continua per non perdere l’evento del transito

Osservazioni da Terra basate su collaborazioni internazionali per garantire la copertura continua mediante osservazione da telescopi che si trovano a diverse longitudini geografiche

Vantaggio delle survey da Terra: copertura di tutto il cielo

Esempio: WASP (Wide Angle Search for Planets)

La copertura temporale continua si realizza più efficacemente dallo spazio, ma su campi limitati

Esempi: satellite CoRoT e Kepler

26

Missione Kepler

<http://kepler.nasa.gov>

- Il fotometro montato sul satellite Kepler è stato in grado di rivelare un transito di un pianeta terrestre davanti a una stella di tipo G2V con magnitudine $V=12$ a 4σ in 6.5 ore di integrazione
- Copertura continua nell'arco di 4 anni di uno stesso campo con 10^5 stelle di sequenza principale fino a magnitudine 14
- Risultati ottenuti (al 2015)
 - 3300 pianeti candidati
 - circa 1000 pianeti confermati
- Tabella aggiornata delle principali scoperte:
<http://kepler.nasa.gov/Mission/discoveries/>

27

Missione Kepler

<http://kepler.nasa.gov>

- Problema dei falsi positivi
 - dovuti alla presenza di stelle binarie ad eclisse che possono trovarsi accidentalmente nello stesso pixel dove cade la luce della stella
- Programmi di follow up per eliminare falsi positivi
 - Necessità di confermare le curve di luce usando diversi metodi
- Ricerca di binarie
 - Con ottica adattiva

Se si trova una stella binaria ad eclisse nel campo, il segnale osservato è un falso positivo

La binaria potrebbe anche essere nascosta, ma con bassa probabilità, esattamente dietro la stella oggetto dell'analisi
 - Con metodo spettroscopico

L'analisi di spettri ad alta risoluzione permette di scoprire binarie spettroscopiche dallo sdoppiamento di righe spettrali, anche senza la necessità di monitorare in maniera continuativa lo spettro

28

Missione Kepler

<http://kepler.nasa.gov>

- Programmi di follow up per eliminare falsi positivi
- Metodo delle velocità radiali
 - Richiede un monitoraggio temporale della stella con spettri ad alta risoluzione per un periodo comparabile al periodo orbitale del pianeta
 - E' il metodo più sicuro, in quanto permette di ottenere anche la massa del pianeta e pertanto di essere sicuri della sua natura
 - Richiede però tempi più lunghi e può essere applicato solo a stelle sufficientemente brillanti da essere osservate ad alta risoluzione spettrale