

Pianeti extrasolari (I)

Metodi osservativi

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 in un contesto generale le nozioni di fisica planetaria tradizionalmente basate sui pianeti del Sistema Solare
 - In particolare mettere alla prova modelli di formazione ed evoluzione di sistemi planetari
 - Il Sistema Solare potrebbe non essere rappresentativo
 - Quantificare la frequenza di pianeti con condizioni fisiche atte a sostenere la vita (“pianeti abitabili”)
- **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

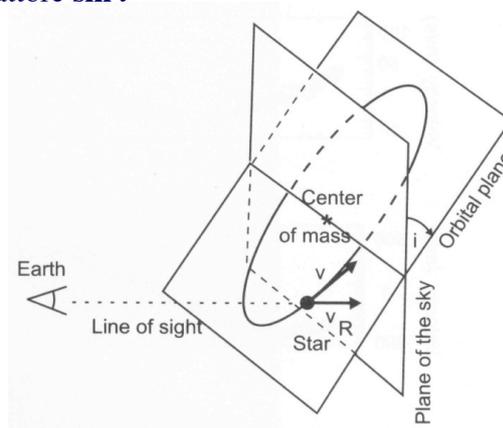
- **Metodo diretto**
 - Immagine diretta del pianeta
- **Metodi indiretti**
 - Sostanzialmente riconducibili a due effetti:
 - Perturbazione gravitazionale del moto stellare
 - Variazioni di luminosità stellare

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

Metodo diretto

- **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 al "seeing"
Esempio: separazione Terra-Sole vista da 20 pc: 50 mas

- **Bias osservativi**

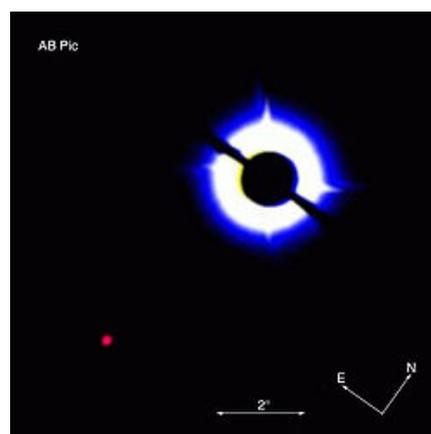
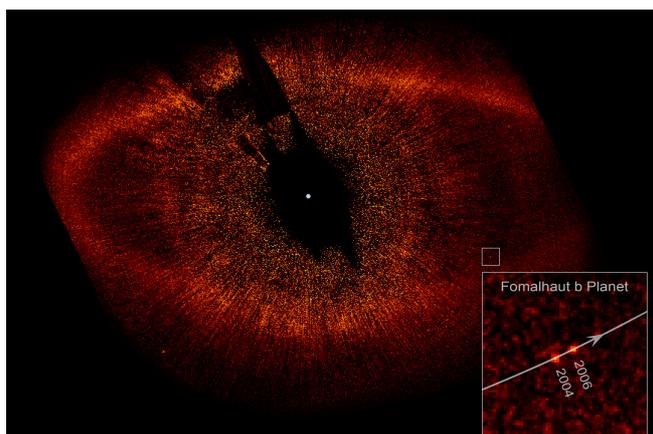
- Si selezionano preferenzialmente pianeti
 - (1) a grandi distanze dalla stella
 - (2) con minor contrasto di luminosità
 - con alta luminosità intrinseca (ad es. pianeti giovani)
 - con rapporto m_p/M_* relativamente alto

Metodo diretto

- **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

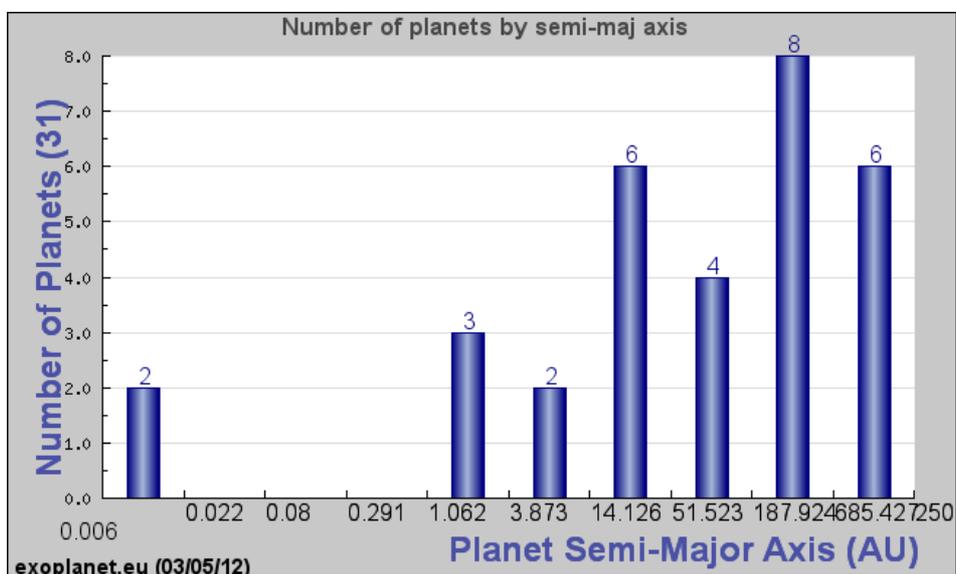
Metodo diretto

- **Esempio:**
 - 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)



Metodo diretto

Al momento attuale (maggio 2012) sono stati scoperti circa 30 pianeti con il metodo di imaging diretto



Astronomia Osservativa C, SP 5, Vladilo (2011)

9

Metodo diretto

- **Prospettive future**
 - Duplice obiettivo
 - Diminuire separazione pianeta-stella
 - Aumentare il range dinamico
- **Tecniche**
 - Per oscurare la stella
 - Coronografi e “Occulters”
 - Per aumentare la risoluzione spaziale
 - Interferometria
 - Per diminuire il contrasto
 - Utilizzo della banda infrarossa



Astronomia Osservativa C, SP 5, Vladilo (2011)

10

Metodi indiretti

- **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

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

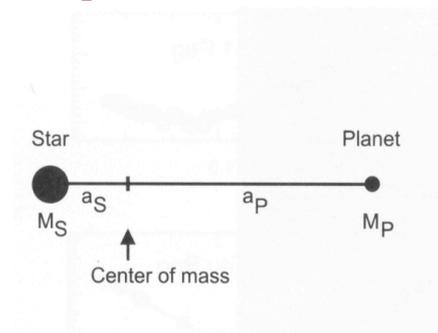
Metodi indiretti

- **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
- **Qualsiasi sia il metodo indiretto utilizzato, ci sarà un bias osservativo che favorisce il rivelamento di pianeti con periodi brevi e quindi valori piccoli dei semiassi maggiori**
 - Questo è uno dei motivi 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 del 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



Astronomia Osservativa C, SP 5, Vladilo (2011)

13

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”

Astronomia Osservativa C, SP 5, Vladilo (2011)

14

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, Δt , 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

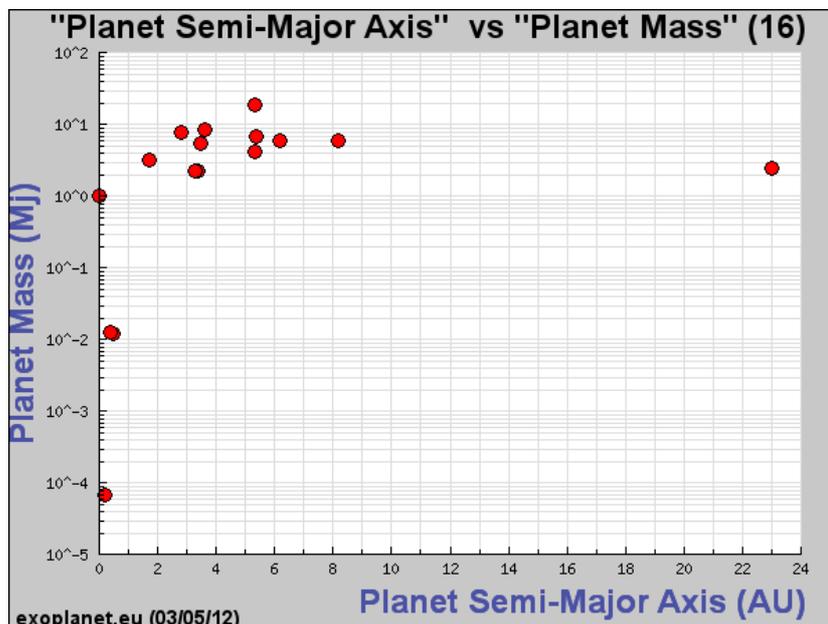
Sistema con due pianeti di massa terrestre rivelato già nel 1992

- **Svantaggi**

- Utilizzabile in maniera molto limitata, solo per le pulsar

Metodo del timing di pulsars

Al momento attuale (maggio 2012) sono stati scoperti 11 sistemi planetari, di cui 4 multipli, per un totale di 16 pianeti



Metodo delle velocità radiali (Metodo Doppler)

- **Misura spettroscopica**

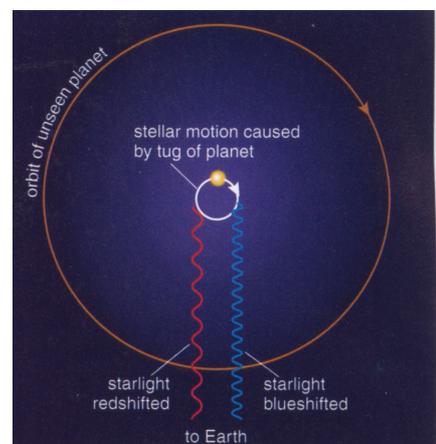
- Consiste nella misura di variazioni della componente radiale del moto stellare indotto dal pianeta

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

- **Metodo estremamente efficiente**

- Ha permesso di trovare il maggior numero di esopianeti (attualmente circa 700 esopianeti in più di 560 sistemi planetari; maggio 2012)



Metodo delle velocità radiali

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

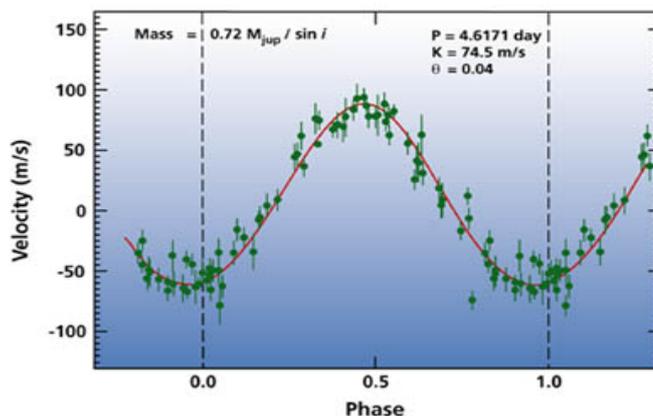
- **Principali parametri ricavabili dalla curva di velocità radiale**

- 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” è proporzionale a $M_p P^{-1/3}$
Più facile rivelare il moto stellare quando i planeti 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)
- Il segnale di velocità radiale è maggiore quando la linea di vista cade nel piano dell’orbita ($\sin i \approx 1$)

Metodo delle velocità radiali

- Relazione con parametri orbitali e planetari

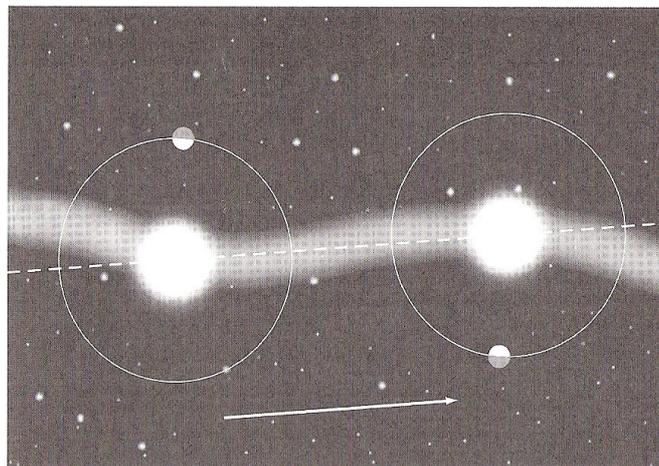
- Assumendo $M_p \ll M_*$ si ricava, nel caso di un’orbita circolare,
$$M_p \sin i \approx K (P/2\pi G)^{1/3} M_*^{2/3}$$
- Dai parametri della curva di velocità radiale si ricava quindi un limite inferiore della massa del pianeta
- Dal periodo si ricava, mediante la terza legge di Keplero, il semiasse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

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: ~ 0.4 m/s
 - È certamente possibile raggiungere il livello di precisione di ~ 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 e variabilità 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 ($\sin i \approx 0$)

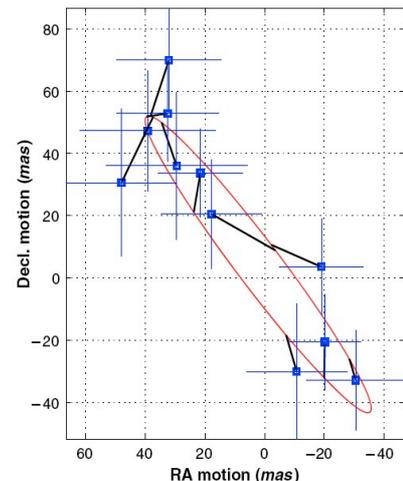


Metodo astrometrico

- **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 si 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
- **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

Metodo astrometrico

- **Esempio [non confermato!] di rivelazione di un esopianeta con il metodo astrometrico**
 - Segnale astrometrico relativamente intenso grazie a una combinazione di fattori favorevoli:
 - distanza Sole-stella relativamente piccola,
 - massa stellare molto piccola
 - massa del pianeta relativamente grande
 - le variazioni di moto proprio, se confermate, sarebbero 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
- **Attualmente non esistono casi confermati**



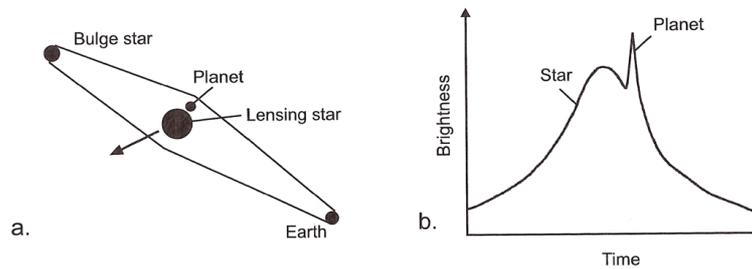
Metodo astrometrico

- **Vantaggi del metodo astrometrico**
 - È sensibile a planeti 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 contenente 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 comprese tra **6 μ as (a V=6 mag) e 200 μ as (a V=20 mag) per una stella G2V**
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)

27

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
 - Richiede una collaborazione internazionale per osservare continuamente la regione di cielo d'interesse
- **Esempio di campo affollato utilizzato**
 - Il Bulge (rigonfiamento centrale) della nostra Galassia
 - Richiede una collaborazione 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)

28

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 del microlensing gravitazionale

Al momento attuale (maggio 2012) sono stati scoperti una quindicina di pianeti con il metodo del microlensing

