

Pianeti extrasolari (I)

Metodi osservativi

Exoplan 1
G. Vladilo

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

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

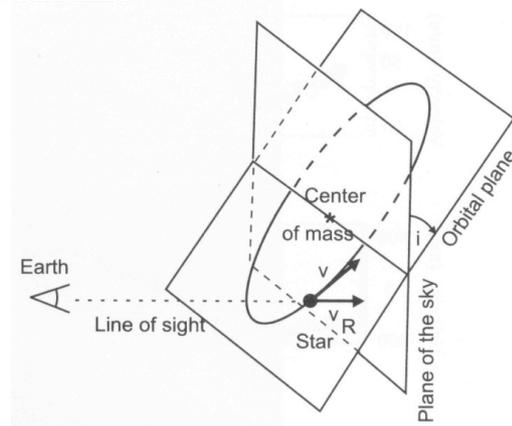
Prima di addentrarci nei singoli metodi
facciamo alcune considerazioni introduttive

3

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 **$\cos i$**



4

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

5

Metodo diretto

- **Immagine diretta**

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

- **Difficoltà osservative**

- Contrasto di luminosità stella-pianeta
- Separazione angolare stella-pianeta

6

Metodo diretto

- **Contrasto di luminosità**

$$L_p/L_*$$

– Banda visibile

luce riflessa stellare

dipende dalla fase orbitale

contrasto $\sim 10^9$ - 10^{10}

$$L_p \sim L_* \left(\frac{R_p}{a} \right)^2 \Phi(t)$$

$$\Phi(t) = 1 - \sin i \sin \left(\frac{2\pi t}{P} \right)$$

– Banda infrarossa ($\sim 10 \mu\text{m}$)

emissione intrinseca del pianeta

contrasto $\sim 10^6$ - 10^7

$$L_p \sim L_* (M_p/M_*)$$

Banda visibile

Banda infrarossa

7

Metodo diretto

- **Separazione angolare stella-pianeta**

Frazione di arcsec, molto inferiore al “seeing”

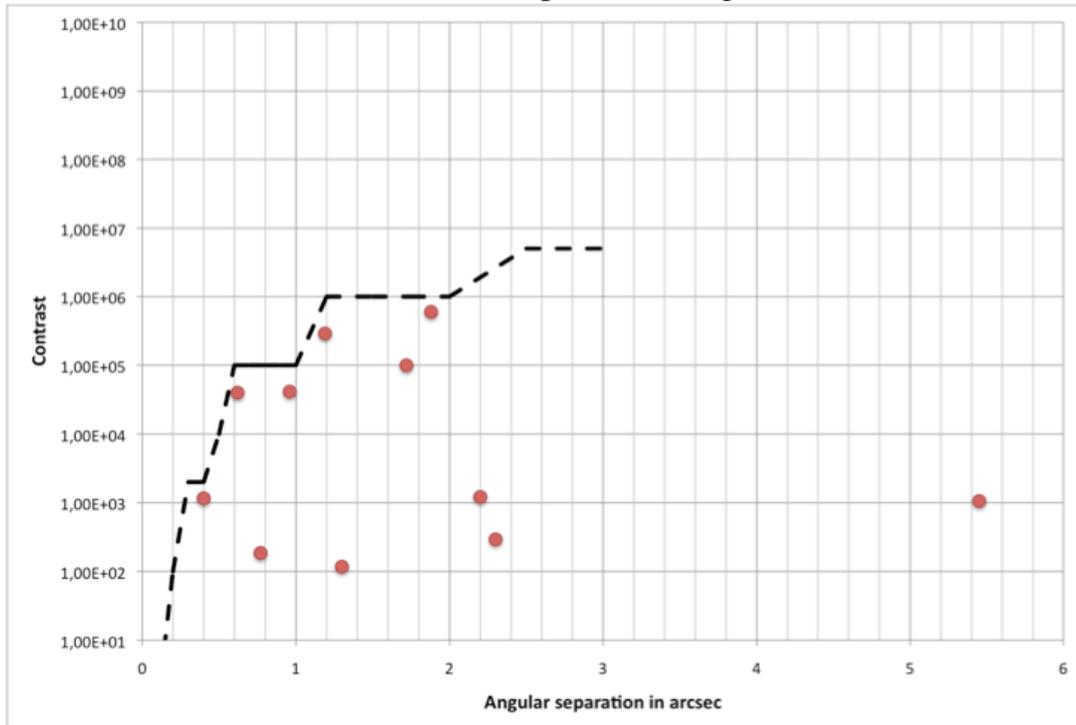
Esempio: separazione Terra-Sole vista da 20 pc: 50 mas

$$\vartheta = \arctan \frac{a}{\ell}$$

8

Limiti osservativi

Dipendenza del massimo contrasto di luminosità osservabile
in funzione della separazione angolare



9

Metodi di rivelazione di pianeti extrasolari

Metodo diretto

- **Bias osservativi**
 - Si selezionano preferenzialmente pianeti
 - (1) in stelle vicine, 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

10

Metodo diretto

- **Grandezze misurabili con le osservazioni**
 - Parametri orbitali
 - Nota la distanza della stella si misura direttamente il semiasse maggiore, a
 - Noto a si ricava il periodo P dalla terza legge di Keplero
 - Temperatura effettiva
 - Dal colore misurato fotometricamente
 - Spettro di emissione atmosferico del pianeta
 - Composizione chimica atmosferica

11

Metodo diretto

- **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 propria stella
 - Non richiede ripetere osservazioni per tutto il periodo orbitale
 - In principio, uno dei metodi più promettenti per ottenere informazioni dirette sulle proprietà degli esopianeti

12

Metodo diretto

- **Esempi**

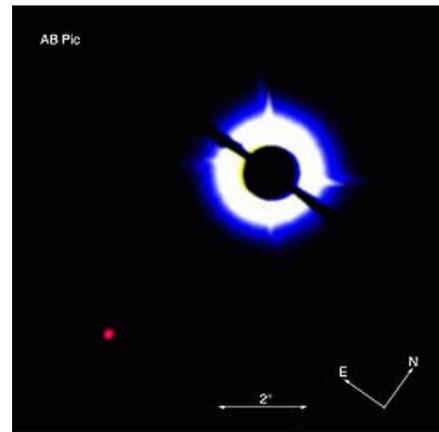
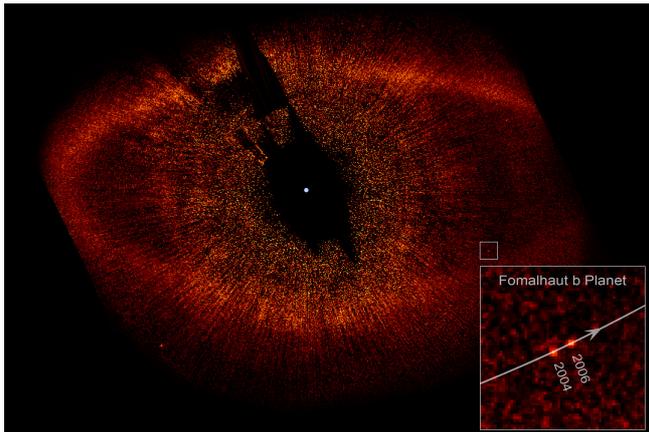
- Fomalhaut b

- scoperto nel 2008 rianalizzando dati HST

- $d = 115 \text{ UA}$; $e \sim 0.11$; $M \sim 1 M_J$; $P \sim 870 \text{ anni}$

- AB Pic

- Scoperto un compagno planetario utilizzando un coronografo (VLT, NACO)

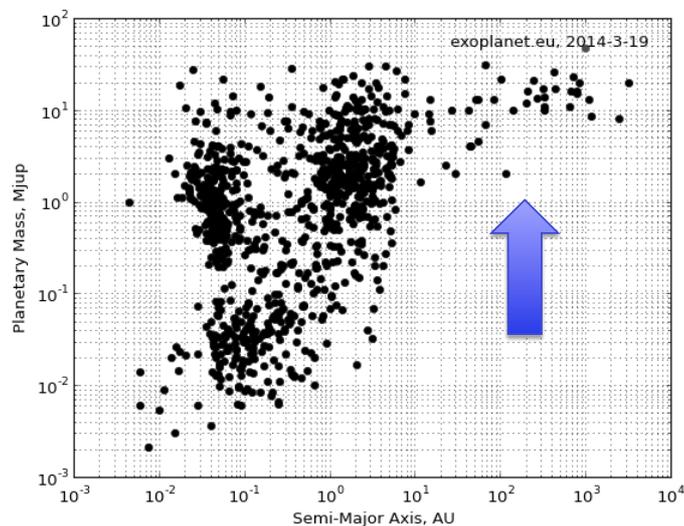


13

Metodo diretto

Al momento attuale sono stati scoperte poche decine di pianeti con il metodo di imaging diretto

Sono massicci e si trovano a grandi distanze dalla stella



14

Metodo diretto

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



15

Metodi indiretti

- **Parametri orbitali**
 - Si misura 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

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

16

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

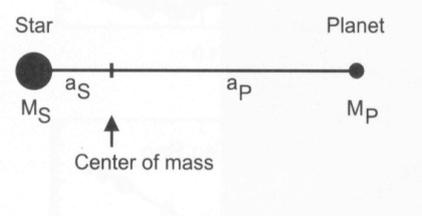
17

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”

$$a_* = a \frac{M_p}{M_*}$$



- **Il reflex motion della stella scala come M_p/M_***
 - Bias osservativo
 - Favorita la rivelazione di pianeti massicci attorno a stelle di piccola massa

18

Metodi indiretti: Perturbazione gravitazionale del moto stellare

Metodi indiretti per rivelare pianeti
dallo studio delle perturbazioni del moto stellare

Metodo del timing di pulsars

Metodo delle velocità radiali

Metodo astrometrico

19

Metodo del timing di pulsars

- È il metodo che per primo ha portato alla scoperta di pianeti extrasolari
 - Wolszczan & Frail (1992)
 - Trovati pianeti attorno ad una stella di neutroni
 - Prima di una serie di scoperte che hanno dimostrato che i pianeti extrasolari possono esistere in una varietà di situazioni, anche inaspettate
- 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"

20

Metodo del timing di pulsars

- **Derivazione della massa del pianeta**

- Per una tipica massa di una pulsar, $M_{\text{psr}}=1.35 M_{\odot}$, si ha la seguente relazione tra la massa del pianeta, m_2 , il suo periodo orbitale, P_b , e la semi-ampiezza, Δt , delle variazioni di TOA

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 (in quanto non conosciamo l'inclinazione dell'orbita, i)

- **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

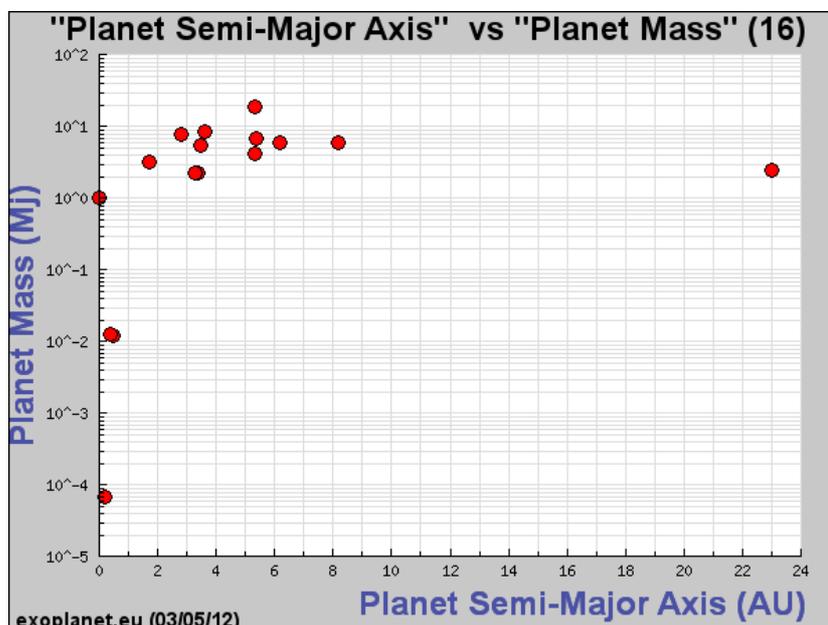
21

Metodo del timing di pulsars

Esopianeti scoperti con il metodo del timing (maggio 2012):

11 sistemi planetari, di cui 4 multipli, per un totale di 16 pianeti,

tra cui pianeti con masse di tipo terrestre



22

Metodo delle velocità radiali (Metodo Doppler)

- **Misura spettroscopica**

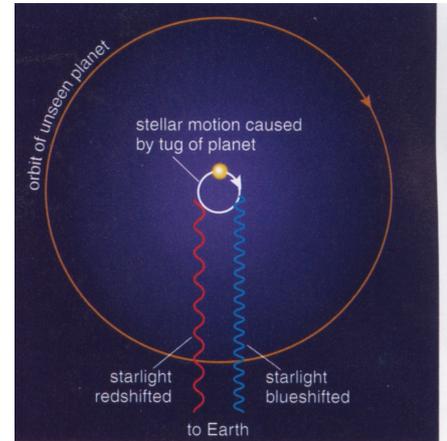
- Consiste nella misura di variazioni della componente radiale del moto stellare indotto dal pianeta

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 (circa 700 esopianeti in più di 560 sistemi planetari; maggio 2012)



23

Metodo delle velocità radiali

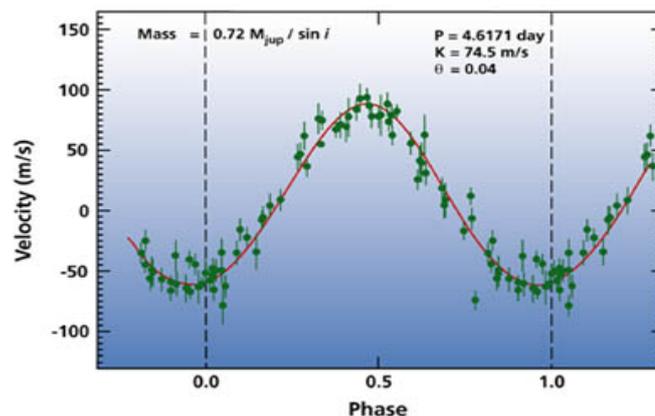
- Si costruisce una curva di velocità radiale in funzione del tempo
- **Principali parametri ricavabili dalla curva di velocità radiale**

- 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

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



24

Metodo delle velocità radiali

- Effetti selettivi

- A parità di massa della stella, l'ampiezza del “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 $M_*^{-2/3}$
A parità di magnitudine apparente della stella, è dunque 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 ($\sin i \cong 1$)
Se le orbite sono orientate in maniera casuale, questo effetto non porta ad alcun bias riguardo le proprietà intrinseche del pianeta

25

Metodo delle velocità radiali

- Relazione tra parametri osservativi e parametri orbitali e planetari

- Dal periodo si ricava, mediante la terza legge di Keplero, il semiasse maggiore, a
- 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, e da uno studio della massa della stella, si ricava quindi un limite inferiore della massa del pianeta
Se si conosce i , si misura la massa
- Con un'analisi più raffinata si ottiene anche l'eccentricità e
$$M_p \sin i \cong K (P/2\pi G)^{1/3} M_*^{2/3} (1-e^2)^{1/2}$$

26

Stima indiretta dell'inclinazione orbitale i

Per stelle con attività stellare e rotazione (stelle giovani)

- Si determina l'inclinazione i_{rot} tra il piano equatoriale della stella e la linea di vista da uno studio dettagliato della stella
 - Doyle et al. (1984), Doyle (1988)
 - Dall'analisi dei profili stellari si ricava $V_{\text{rot}} \sin i_{\text{rot}}$
 - Dalla fotometria di indici di attività si ricava il periodo di rotazione
 - Dal confronto tra tipo spettrale, luminosità e modelli si ricava il raggio stellare; dal raggio e periodo di rotazione si ricava V_{rot}
- Nell'ipotesi che il piano orbitale del pianeta sia coplanare al piano equatoriale della stella $i = i_{\text{rot}}$
 - Nel caso del Sistema Solare l'ipotesi è, in generale, valida
 - Nel caso dei sistemi planetari extrasolari è possibile mettere alla prova la validità di questa ipotesi mediante l'effetto Rossiter-McLaughlin che presenteremo nel seguito

27

W. D. COCHRAN AND A. P. HATZES

Table I
Radial Velocity Signals of the Planets



Planet	M_p (M_J)	R (AU)	P (years)	Θ_\star at 10 pc (mas)	V_\star (ms^{-1})
Mercury	1.74E-4	0.387	0.241	6.4E-6	0.008
Venus	2.56E-3	0.723	0.615	1.8E-4	0.086
Earth	3.15E-3	1.000	1.000	3.0E-4	0.089
Mars	3.38E-4	1.524	1.881	4.9E-5	0.008
Jupiter	1.0	5.203	11.86	0.497	12.4
Saturn	0.299	9.54	29.46	0.273	2.75
Uranus	0.046	19.18	84.01	0.084	0.297
Neptune	0.054	30.06	164.8	0.156	0.281
Pluto	6.3E-6	39.44	247.7	2.4E-5	3E-5

28

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
 - 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
 - Ad esempio, le lampade di calibrazione in lunghezza d'onda vengono sostituite da “laser frequency combs”
 - Sarà possibile raggiungere il livello di precisione di ~ 10 cm/s e arrivare alla capacità di rilevazione di un pianeta terrestre

29

Metodo delle velocità radiali: spettrografi HARPS

- HARPS
 - High Accuracy Radial velocity Planet Searcher
 - Telescopio: ESO 3.6m La Silla (Cile)
 - <http://www.eso.org/sci/facilities/lasilla/instruments/harps/>
 - Ha svolto un ruolo pionieristico e svolge tuttora un ruolo importante nella ricerca di pianeti extrasolari
 - Estremamente stabile, ma limitato a precisioni in velocità radiale fino a ~ 40 cm/s e a pianeti attorno a stelle relativamente brillanti ($V \sim 12$)
- HARPS-north
 - Copia dello spettrografo HARPS installata nel 2012 presso il telescopio TNG (3.5m, La Palma, Spagna)
 - Ha cominciato a produrre risultati importanti, con capacità analoghe a quelle di HARPS, estendendone la portata all'emisfero nord

30

Metodo delle velocità radiali: progetti futuri

- **Espresso**
 - Echelle SPectrograph for Rocky Exoplanet and Stable Spectroscopic Observations
 - <http://www.eso.org/sci/facilities/develop/instruments/espresso.html>
 - Spettrografo estremamente stabile da installare al fuoco combinato del telescopio ESO VLT (8m x 4)
 - Precisione in velocità radiale < 10 cm/s
 - Studio di stelle più deboli rispetto a quelle osservabili con HARPS
 - Permetterà la rivelazione di pianeti di tipo terrestre orbitanti nella zona abitabile di stelle di tipo solare
- **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)