

Principali risultati degli studi di esopianeti

Proprietà statistiche

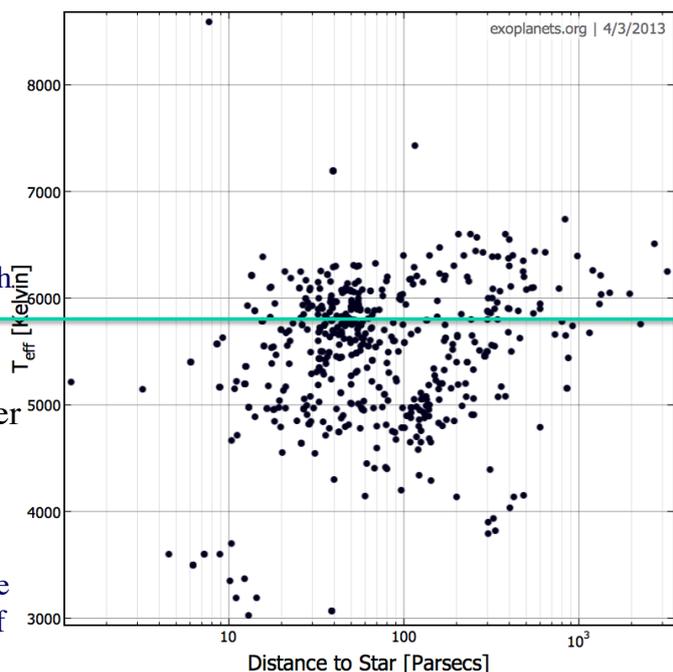
Principalmente basate sui pianeti scoperti
con il metodo delle velocità radiali e dei transiti
in quanto tali metodi hanno portato al maggior numero di scoperte

Liste aggiornate di esopianeti possono essere trovate nei siti:
exoplanets.org e exoplanet.eu

1

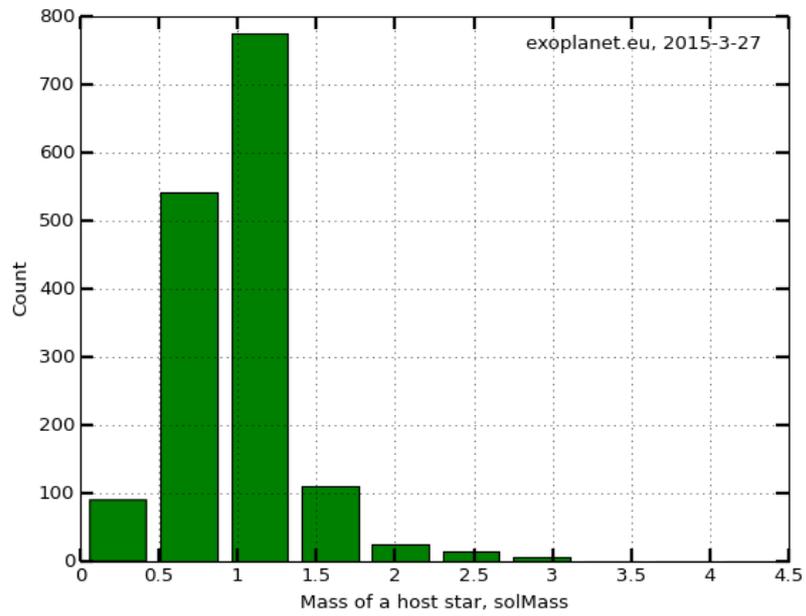
Statistical properties of exoplanets

- Understanding observational biases is fundamental to interpret the observed statistical properties
- Distances
 - Most planets found between 10 and 1000 pc
 - Signal-to-noise ratio decreases with increasing distance of the star
- Stellar spectral type
 - Most planets found in stars colder than the Sun
 - Planet signal is stronger in stars of low mass
 - However, low-mass stars tend to be excluded from surveys because of their faintness (and activity)



2

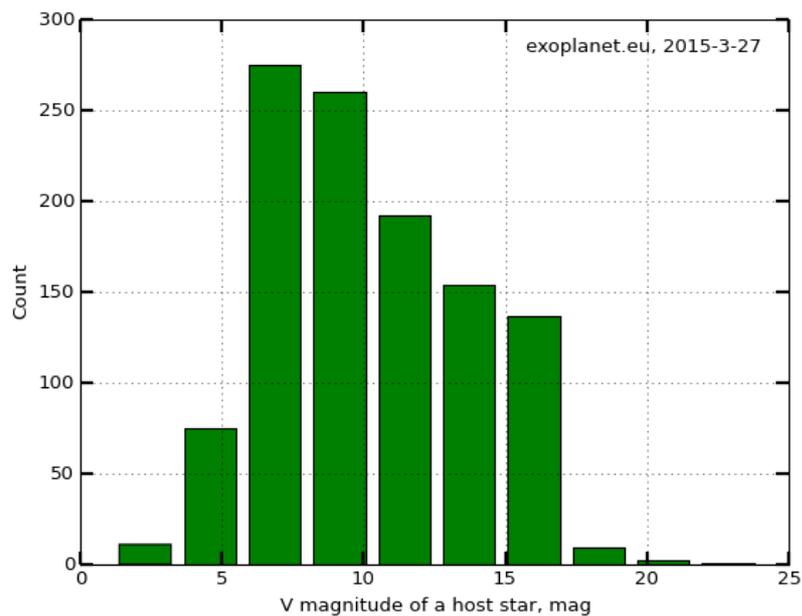
Istogramma dei pianeti scoperti in funzione della massa stellare



Astronomia Osservativa C, SP 6, Vladilo (2011)

3

Istogramma dei pianeti scoperti in funzione della magnitudine stellare



Astronomia Osservativa C, SP 6, Vladilo (2011)

4

Proprietà statistiche degli esopianeti

- Principali proprietà statistiche che possono essere studiate
 - delle orbite planetarie
Periodi orbitali, semiassi maggiori, eccentricità
 - dei planeti
Masse e raggi
rispettivamente con il metodo Doppler e con quello dei transiti
 - delle stelle ospiti
La metallicità, il pattern di abbondanze chimiche

5

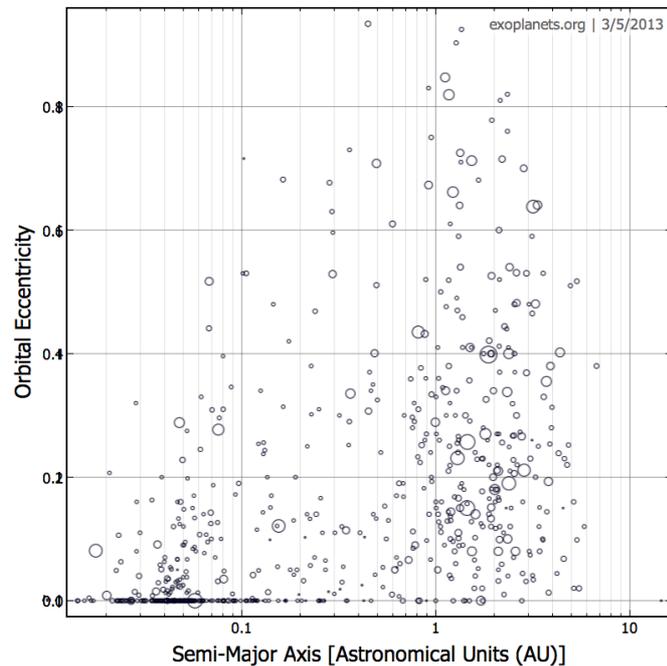
Proprietà statistiche dei parametri orbitali

- Uno dei principali risultati degli studi di esopianeti è la grande varietà di proprietà orbitali e planetarie osservate
- Tale varietà non è riscontrabile nel Sistema Solare
- Vediamo un esempio che riguarda i parametri orbitali e la massa dei planeti

6

Esempio di estrema varietà nelle proprietà osservate

- Grafico delle eccentricità e verso il semiasse maggiore a ; le dimensioni dei simboli sono proporzionali alle masse minime dei pianeti ($M \sin i$)
- Si può notare la grande dispersione sia nei due parametri orbitali (a, e) che nelle masse
- Per confronto, nel Sistema Solare le eccentricità sono tutte trascurabili; anche le masse e i semiasci maggiori mostrano valori non trovati nel Sistema Solare

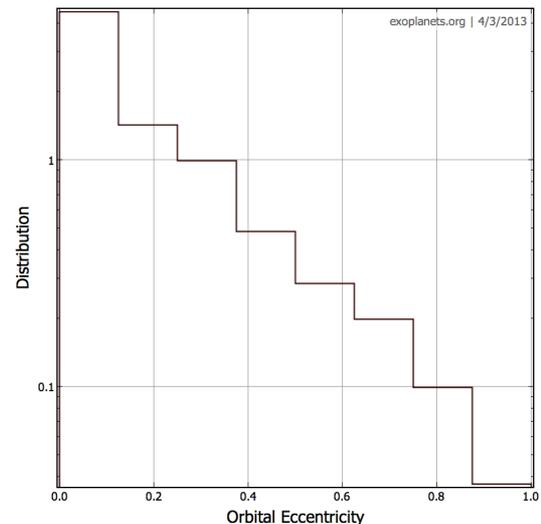


7

Istogramma delle eccentricità

Istogramma delle eccentricità e degli esopianeti scoperti (aprile 2013)

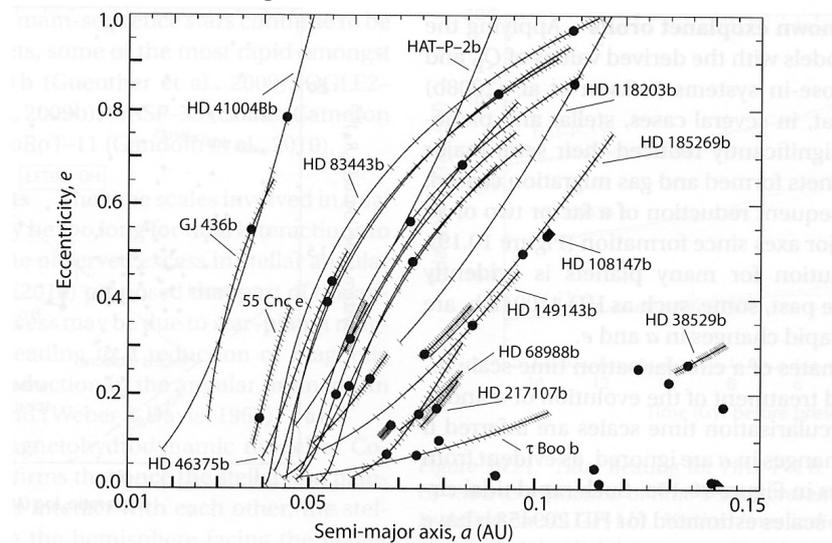
- **La distribuzione mostra l'esistenza di pianeti anche su orbite molto eccentriche**
 - con valori di eccentricità che coprono tutto il possibile intervallo tra 0 e 1
 - Eccentricità mediamente molto più alte rispetto a quelle dei pianeti del Sistema Solare
- **Le orbite di bassa eccentricità sono comunque più frequenti**
 - L'andamento esatto della distribuzione è influenzato da effetti selettivi e dipende dal metodo osservativo utilizzato



8

- Il fatto che le eccentricità basse siano più frequenti viene interpretato come il risultato di evoluzione orbitale in presenza di interazioni mareali stella-pianeta
 - I modelli indicano che l'eccentricità diminuisce nel corso dell'evoluzione

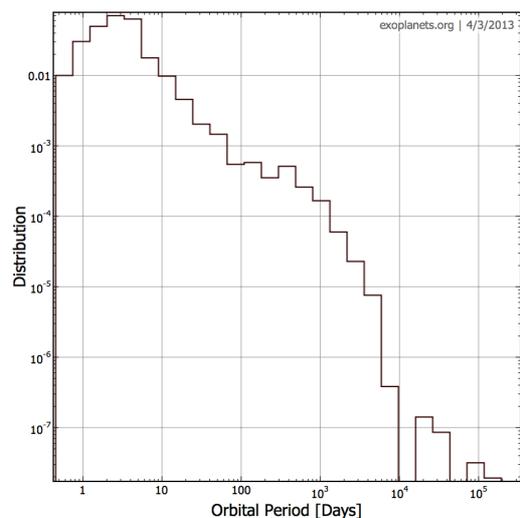
Figura da Jackson et al. (2008)



9

Istogramma dei periodi orbitali

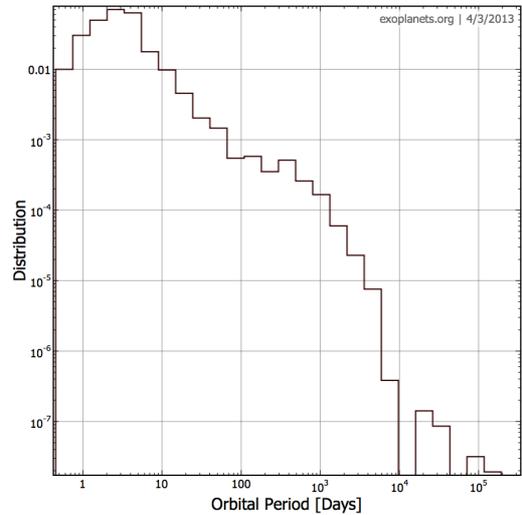
- Istogramma dei periodi orbitali P degli esopianeti scoperti (aprile 2013)
- La distribuzione picca su periodi orbitali brevi
 - Risultato di vari effetti selettivi
 - La limitata base temporale delle osservazioni favorisce la scoperta di pianeti con periodi brevi
 - A parità di massa, un pianeta più vicino alla stella (minor periodo orbitale) introduce una maggior perturbazione gravitazionale sulla stella
 - Un pianeta più vicino alla stella ha una maggior probabilità geometrica di essere scoperto con il metodo dei transiti



10

Distribuzione dei periodi orbitali

- Istogramma dei periodi orbitali P degli esopianeti scoperti (aprile 2013)
- **Evidenza di un picco a $P \approx 3$ giorni**
 - Inaspettato dal punto di vista teorico, non attribuibile a effetti selettivi
 - Pone vincoli importanti sui modelli di formazione planetaria
 - In particolare, sull'esistenza di un meccanismo che blocchi la migrazione dei pianeti verso orbite prossime alla stella



11

Masse (minime) degli esopianeti

Statistica relativa ai pianeti scoperti con il metodo Doppler

Il limite di rivelamento in massa diventa più stringente di anno in anno

“Saturni”

$$M \sim 0.3 M_{\text{giove}}$$

“Nettuni”

$$M \sim 0.05 M_{\text{giove}}$$

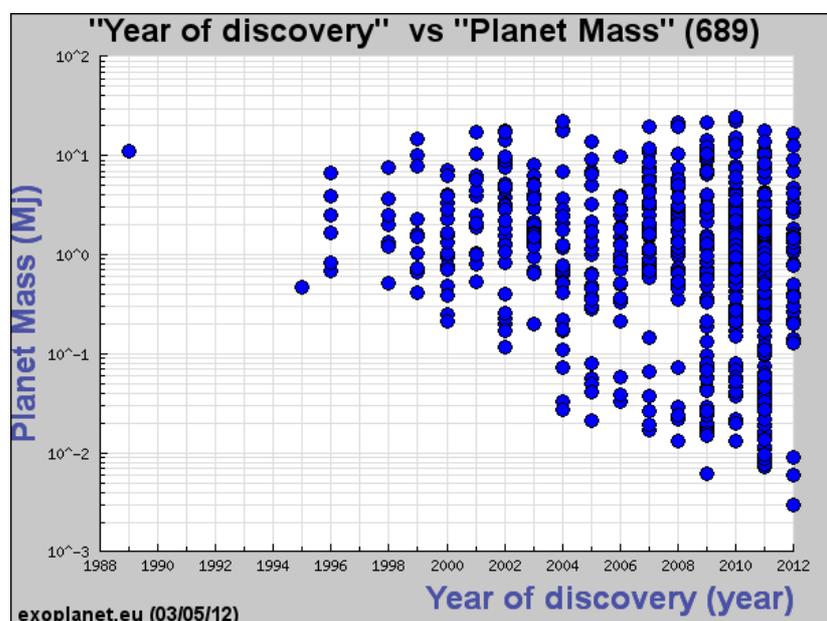
“Super-Terre”

$$M \sim 0.015 M_{\text{giove}}$$

$$M_p \sim 10 M_{\text{terra}}$$

Terrestri

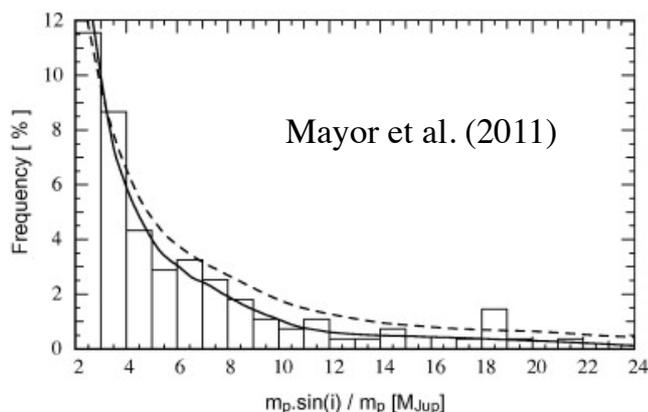
$$M \sim 0.003 M_{\text{giove}}$$



12

Distribuzione delle masse planetarie

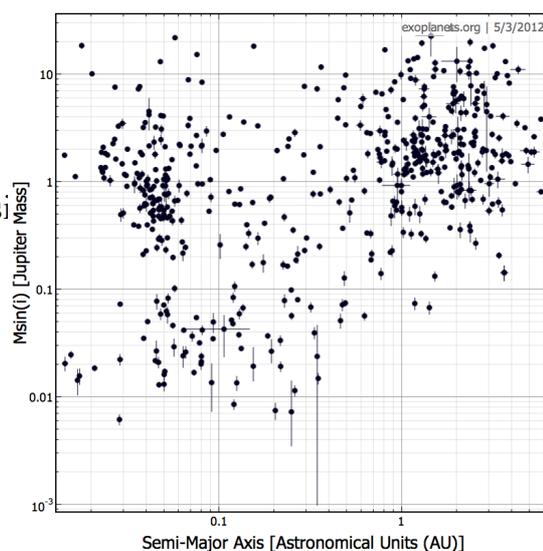
- Distribuzione in massa $M \sin i$ degli esopianeti scoperti con il metodo Doppler
- La distribuzione aumenta verso valori più bassi di massa
 - Nonostante l'effetto selettivo che favorisce la rivelazione di pianeti massicci
- Tenendo conto degli effetti selettivi ci aspettiamo un grande frequenza di pianeti di piccola massa
 - Rilevabili in futuro con il miglioramento delle tecniche osservative



13

Masse dei pianeti e semiassi maggiori orbitali

- Grafico di $M \sin i$ verso a degli esopianeti scoperti con il metodo Doppler
 - La maggior parte dei pianeti scoperti si trova entro poche unità astronomiche dalla propria stella
- Scoperta popolazione di pianeti di massa gioviana a distanze ≤ 1 AU dalla stella
 - Chiamati “Hot Jupiters”
 - Risultato inatteso sulla base delle nostre conoscenze del Sistema Solare

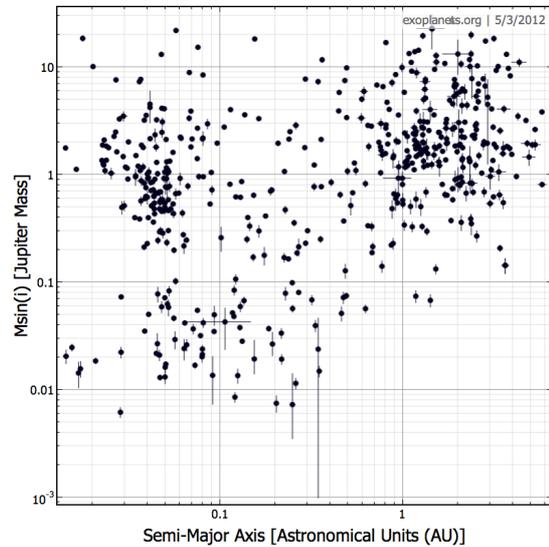


↑
Orbita di Mercurio

14

Masse dei pianeti e semiassi maggiori orbitali

- A grandi distanze dalla stella si trovano preferenzialmente pianeti massicci
 - Effetto selettivo: pianeti lontani riescono a perturbare la stella se sono massicci
 - Effetto fisico: pianeti più massicci si formano nelle regioni più esterne del disco protoplanetario dove le orbite sono molto più lunghe e il materiale disponibile per la formazione planetaria è maggiore



15

Masse dei pianeti e semiassi maggiori orbitali

In questa figura sono evidenziate le scoperte ottenute con diversi metodi osservativi
 In futuro si vuole cercare di capire quanto sia popolata la parte in basso a destra del grafico, dove cadono i pianeti del Sistema Solare

Exoplanet Roadmap Advisory Team (ESA)

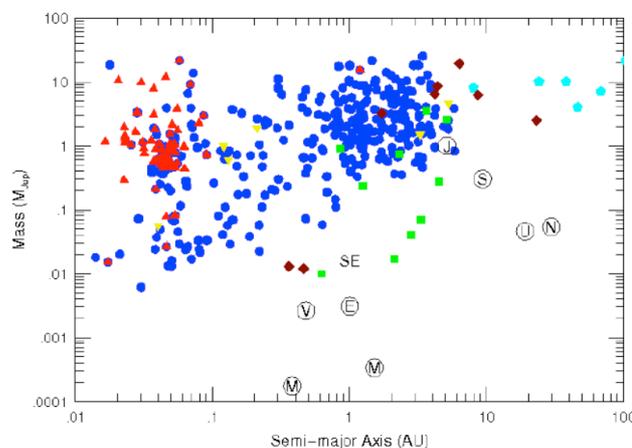
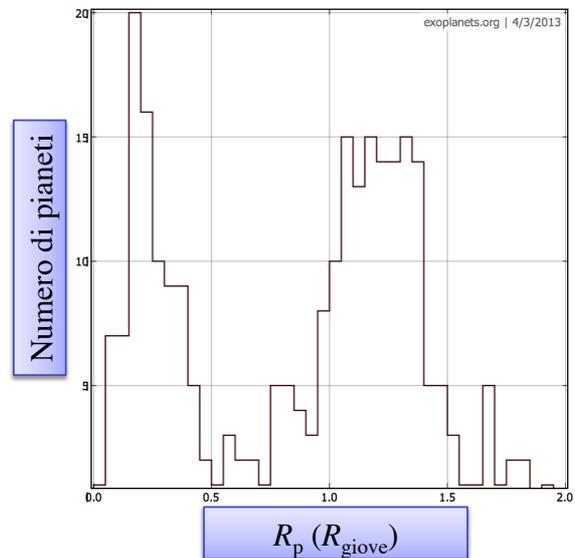


Fig. 1 Exoplanet discoveries from the various search methods in the Mass-Semi-major axis plane. Blue dots: Radial velocity detections; Red triangles: Transit detections; Inverted yellow triangles: astrometric detections; Green squares: Microlensing detections; Blue Pentagons: Imaging detections; Red diamonds: Timing detections. The letters mark the location of the planets in the solar system. "SE" denotes a Superearth with 5 M_{Earth} .

16

Raggi di esopianeti

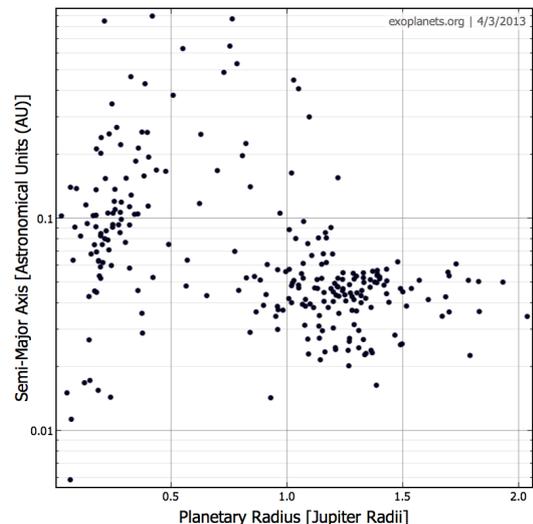
- **Campione di esopianeti studiati con il metodo dei transiti**
 - Il campione include pianeti scoperti sia da Terra che dallo spazio
 - La forma della distribuzione cambia a seconda del campione utilizzato!
- **Picco a valori alti di R_p**
 - Risultato influenzato da effetti selettivi
è più facile scoprire pianeti di grande raggio in quanto la profondità del profilo nella curva di luce scala con $(R_p/R_*)^2$
- **Picco a bassi valori di raggio**
 - Suggestisce l'effettiva presenza di un grande numero di pianeti di piccolo raggio (non dovuta a effetti selettivi)



17

Raggi dei pianeti e semiassi maggiori orbitali

- Campione di esopianeti studiati con il metodo dei transiti
- I semiassi maggiori sono generalmente piccoli a causa della probabilità geometrica di scoprire il transito, che scala come R_*/a



18

Proprietà della stella ospite

- Esaminiamo ora, sempre dal punto di vista statistico, alcune delle proprietà delle stelle che ospitano pianeti

Masse

Metallicità

Rapporti di abbondanze

19

Masse stellari e planetarie

Statistica relativa ai pianeti scoperti con il metodo Doppler

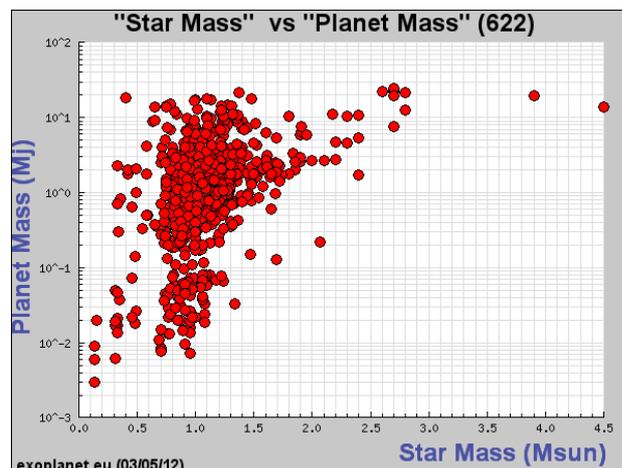
- La maggior parte delle stelle in cui sono stati scoperti esopianeti hanno valori di masse prossime a quella solare

Stelle di minor massa sono meno luminose e più difficili da osservare

Stelle di maggior massa sono meno perturbate dal pianeta

I pianeti di massa minore sono stati scoperti in stelle di bassa massa

In stelle più massicce si scoprono preferenzialmente pianeti più massicci

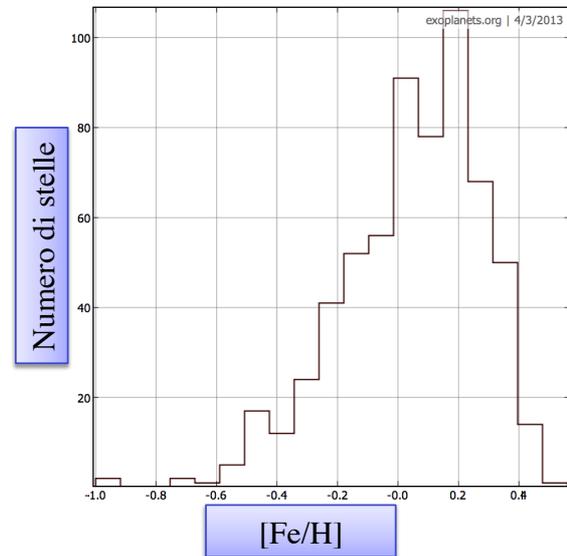


20

Proprietà delle stelle ospiti

Distribuzione delle metallicità stellari

- Numero di stelle ospiti di pianeti in funzione della metallicità stellare $[Fe/H]$
 - In grande maggioranza, pianeti giganti
- Le stelle che ospitano pianeti hanno un livello di metallicità più alto delle stelle senza pianeti
 - Le stelle con pianeti giganti hanno mediamente una metallicità superiore a quella del Sistema Solare



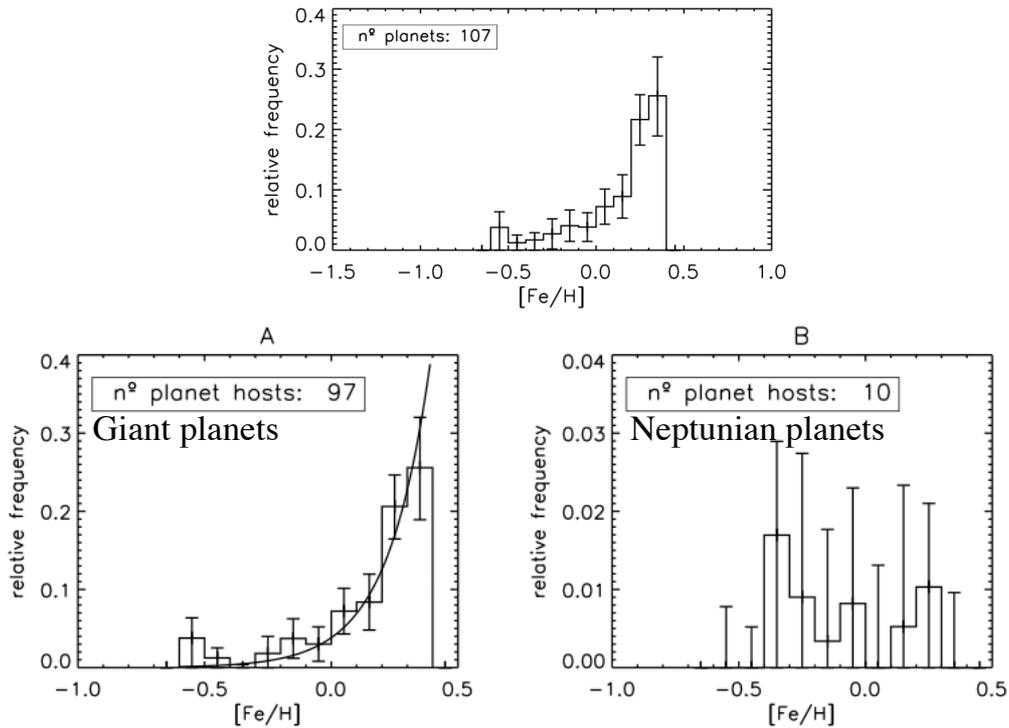
21

Frequenza di pianeti e metallicità della stella ospite

- Interpretazione
 - Inizialmente era stato ipotizzato che le stelle con dischi protoplanetari accrescerebbero più materiali rocciosi e quindi aumenterebbero il proprio livello di metallicità
 - Ipotesi non confermata dalle osservazioni
 - Ora si ritiene più plausibile un effetto di inibizione della formazione planetaria quando la metallicità della nube protostellare è troppo bassa
- La correlazione tra metallicità stellare e frequenza degli esopianeti è confermata sperimentalmente per pianeti massicci, per i quali la statistica è sufficientemente robusta
- Per pianeti meno massicci la situazione è meno chiara a causa della minor statistica; per tali pianeti non si trova comunque evidenza di correlazione

22

Il trend con le metallicità della stella si osserva per i pianeti giganti,
ma non per i pianeti di massa nettuniana
(Sousa et al. 2011)



23

- **Interpretazione**
 - Il meccanismo che inibisce la formazione di pianeti giganti quando la metallicità stellare è bassa non sembra essere all'opera per pianeti di massa minore
 - A basse metallicità il materiale protoplanetario non utilizzato per formare pianeti giganti potrebbe diventare disponibile per la formazione di pianeti di minor massa
- **Questi risultati osservativi offrono nuovi vincoli sperimentali ai modelli di formazione planetaria**
 - Serve una maggiore statistica per capire se esiste un trend per pianeti di piccola massa

24

Rapporti relativi di abbondanze chimiche in stelle con e senza pianeti

- Vari studi hanno confrontato le abbondanze relative al Fe di diversi elementi chimici in stelle con e senza pianeti
- Con l'eccezione di alcuni lavori, questi studi indicano che le abbondanze relative $[X/Fe]$ sono sostanzialmente simili in stelle con e senza pianeti
- Tale risultato suggerisce che
 - l'arricchimento di metalli delle stelle che ospitano pianeti giganti sia primordiale (legato cioè alle abbondanze della nube protoplanetaria e non all'accrescimento di materiale roccioso da parte della stella)
 - non è necessario invocare eventi di arricchimento chimico straordinario (ad esempio, dovuti all'esplosione di una supernova vicina) per stimolare direttamente la formazione planetaria

25

Il rapporto α/Fe in stelle di bassa metallicità che ospitano esopianeti

- The α/Fe ratio is a diagnostic tool of Galactic chemical evolution
 - The α elements are produced by α capture of atomic nuclei (e.g. Mg, Si, ...)
 - The ratio α/Fe decreases in the course of chemical evolution due to the different time scales of the supernovae that produce mostly α elements (type II, fast) and of the supernovae that produce mostly iron-peak elements (type Ia, slow)
 - See course of Prof. F. Matteucci
- The comparison of the α/Fe ratio in stars that host planets and stars that do not host planet may cast light on the efficiency of planetary formation at different values of α/Fe

26

α /Fe enhancements in planet host stars

Tentative evidence for the dependence of planetary formation on the initial chemical composition of the protoplanetary cloud

Adibekyan et al. (2012)

The red squares and blue triangles represent stars with Jupiter-mass and Neptunian/super-Earth mass

Black dots: stars without planetary companion

