

# Principali risultati degli studi di esopianeti

Lezione SP 6  
G. Vladilo

# Principali risultati degli studi di esopianeti

Proprietà statistiche

Proprietà fisiche

# Proprietà statistiche degli esopianeti

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

<b>All Catalogs</b>	
update : 23 April 2011	
<b>All Candidates detected</b>	<b>547 planets</b>
▶ <b>Candidates detected by radial velocity or astrometry</b> update : 19 April 2011	419 planetary systems 499 planets 49 multiple planet systems
▶ <b>Transiting planets</b> update : 15 April 2011	120 planetary systems 127 planets 9 multiple planet systems
▶ <b>Candidates detected by microlensing</b> update : 05 February 2011	11 planetary systems 12 planets 1 multiple planet systems
▶ <b>Candidates detected by imaging</b> update : 23 April 2011	21 planetary systems 24 planets 1 multiple planet systems
▶ <b>Candidates detected by timing</b> update : 11 March 2011	7 planetary systems 12 planets 4 multiple planet systems

Astronomia Osservativa C, SP 6, Vladilo (2011)

3

# Proprietà statistiche degli esopianeti

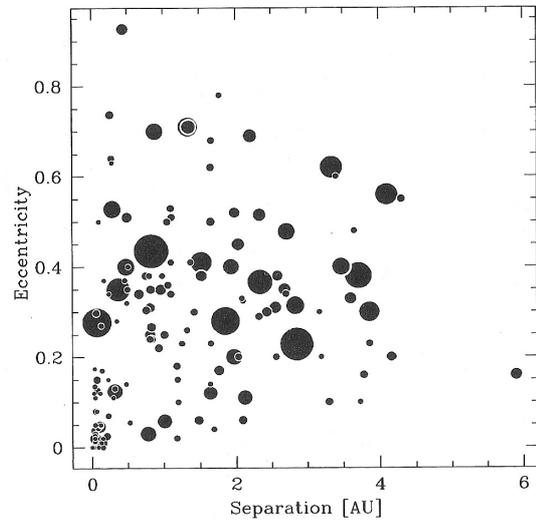
- **Principalmente basate sui pianeti scoperti con il metodo delle velocità radiali e dei transiti**
  - Per una corretta interpretazione è fondamentale tenere in conto dei vari effetti selettivi che influenzano la rivelazione di esopianeti
- **Proprietà statistiche studiate**
  - delle orbite planetarie  
Periodi orbitali, semiassi maggiori, eccentricità
  - dei pianeti  
Con il metodo Doppler,  $M_p \sin i$   
Con il metodo dei transiti,  $R_p$
  - delle stelle ospiti  
Di particolare interesse, la metallicità

Astronomia Osservativa C, SP 6, Vladilo (2011)

4

## Proprietà statistiche degli esopianeti

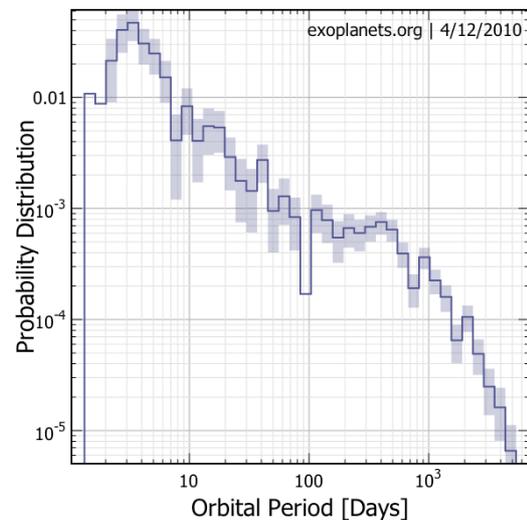
- Uno dei principali risultati degli studi di esopianeti è la grande varietà di proprietà osservate
  - Come esempio vediamo in figura il grafico delle eccentricità  $e$  verso il semiasse maggiore  $a$ ; le dimensioni dei simboli sono proporzionali alle masse minime dei pianeti ( $M \sin i$ )
  - Si può notare la grande dispersione sia nei due parametri orbitali ( $a, e$ ) che nelle masse



Udry et al. 2005

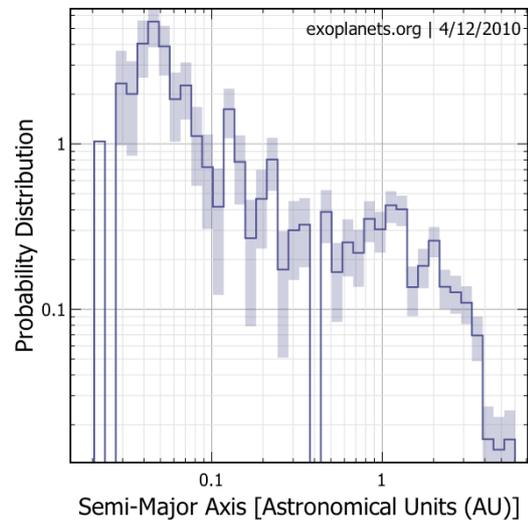
## Distribuzione dei periodi orbitali

- Istogramma dei periodi orbitali  $P$  dell'attuale campione di esopianeti scoperti con il metodo Doppler
- La distribuzione picca su periodi orbitali brevi
  - Risultato di un doppio effetto selettivo
    - La limitata base temporale delle osservazioni favorisce la scoperta di pianeti con periodi brevi
    - A parità di massa, un pianeta più vicino alla stella (e quindi più piccolo  $P$ ) introduce una maggior perturbazione gravitazionale sulla stella
- Evidenza di un picco a  $P \approx 3$  giorni



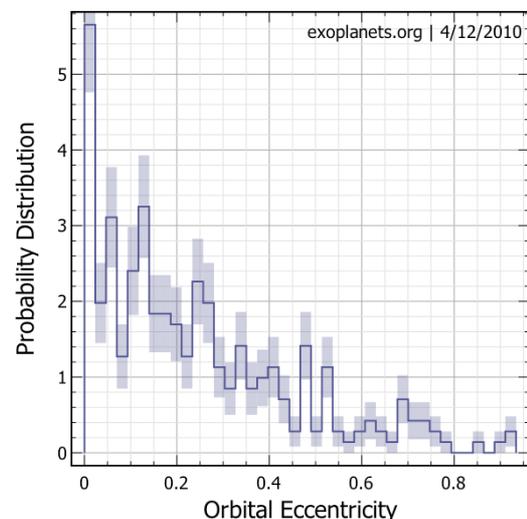
## Distribuzione dei semiassi maggiori

- Istogramma dei semiassi maggiori  $a$  dell'attuale campione di esopianeti scoperti con il metodo Doppler
- **La frequenza di distribuzione aumenta a piccoli valori**
  - È il riflesso della distribuzione dei periodi orbitali
- **Il picco nella distribuzione di  $P$  si traduce in un picco dei semiassi maggiori centrato su  $a \sim 0.05$  AU**
  - Se confermato, pone un vincolo molto particolare su modelli di formazione planetaria



## Distribuzione delle eccentricità

- Istogramma delle eccentricità  $e$  dell'attuale campione di esopianeti trovati con il metodo doppler
- **La distribuzione mostra una grande dispersione**
  - 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**



## Masse minime degli esopianeti

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

“Saturni”

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

“Nettuni”

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

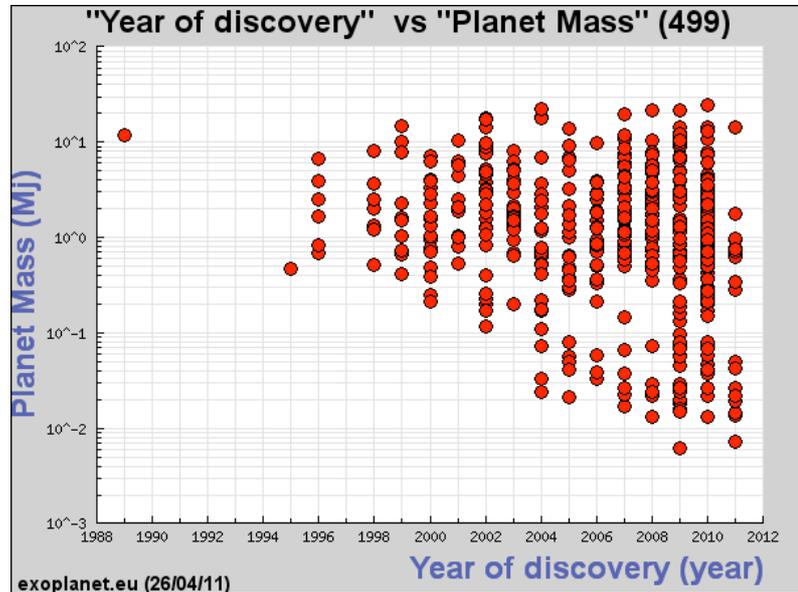
“Super-Terre”

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

$$M_p \sim 5 M_{\text{terra}}$$

Terrestri

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

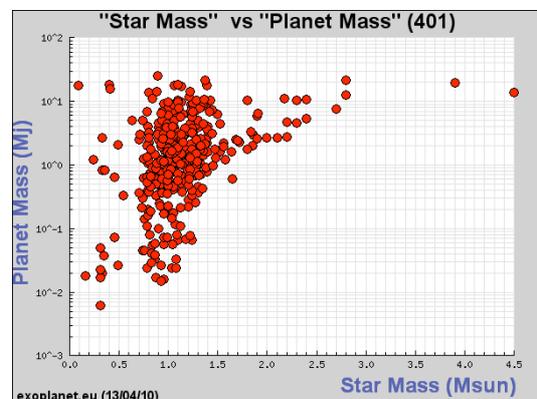


Astronomia Osservativa C, SP 6, Vladilo (2011)

9

## Masse planetarie e masse stellari

- La maggior parte delle stelle in cui sono stati scoperti esopianeti hanno masse attorno a quella solare
- I pianeti di massa minore sono stati scoperti in stelle di bassa massa
  - Risultato influenzato da effetto selettivo: a parità di massa planetaria, la perturbazione gravitazionale è maggiore su stelle di piccola massa

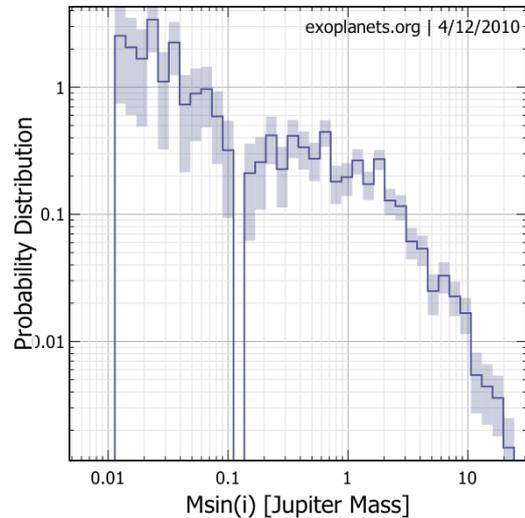


Astronomia Osservativa C, SP 6, Vladilo (2011)

10

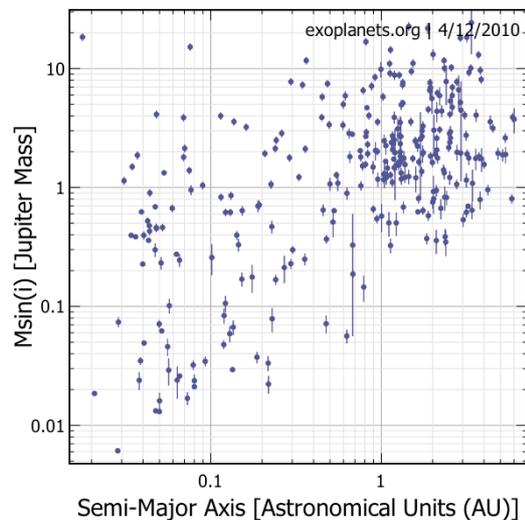
## Distribuzione delle masse planetarie

- Distribuzione in massa  $M \sin i$  dell'attuale campione di esopianeti scoperti con il metodo Doppler
- **La distribuzione aumenta verso valori più bassi di massa**
  - Nonostante il l'effetto selettivo che favorisce il rivelamento di pianeti massicci
- **Dall'estrapolazione di tale andamento ci aspettiamo un grande frequenza di pianeti di piccola massa**
  - Rilevabili in futuro con il miglioramento delle tecniche osservative



## Masse dei pianeti e semiassi maggiori orbitali

- Grafico di  $M \sin i$  verso  $a$  dell'attuale campione di esopianeti scoperti con il metodo Doppler
- **Scoperta popolazione di pianeti di massa gioviana a distanze  $\leq 1$  AU dalla stella**
  - Chiamati “Hot Jupiters”
- **Risultato inatteso sulla base delle nostre conoscenze del Sistema Solare**



## Masse dei pianeti e semiassi maggiori orbitali

- A grandi distanze dalla stella si trovano preferenzialmente pianeti massicci
  - Bias osservativo: pianeti lontani di piccola massa perturbano poco la stella
- 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)

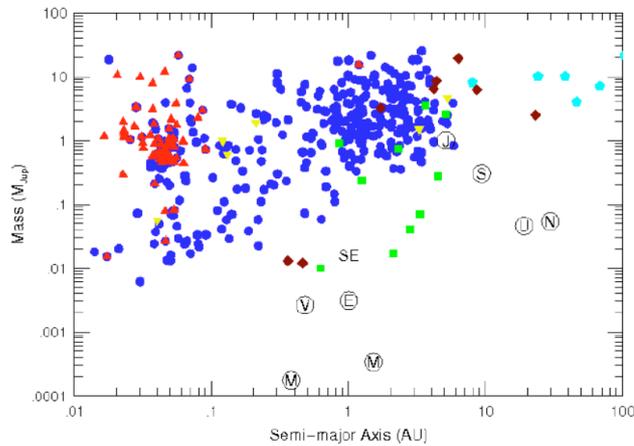


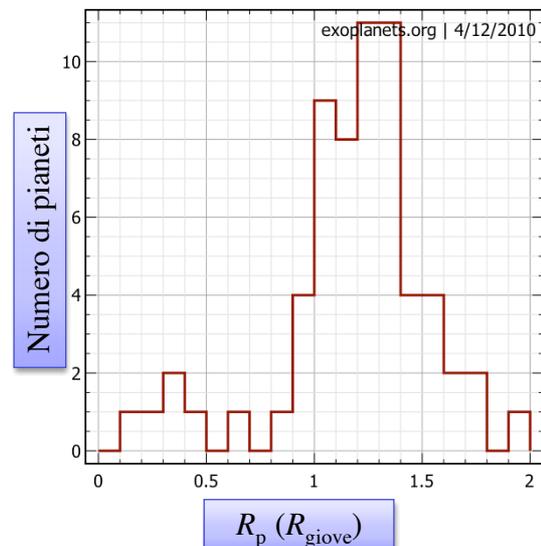
Fig. 1 Exoplanet discoveries from the various search methods in the Mass-Semi-major axis plane. Blue dots: Radial velocity detections; Red triangles: Transit detections; Inverted yellow triangles: astrometric detections; Green squares: Microlensing detections; Blue Pentagons: Imaging detections; Red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

Astronomia Osservativa C, SP 6, Vladilo (2011)

13

## Raggi di esopianeti

- Campione di esopianeti studiati con il metodo dei transiti
- Scoperta di pianeti con raggi maggiori di quelli di giovè a parità di massa
  - Chiamati “inflated” exoplanets
- Risultato inatteso
  - Giove e Saturno differiscono in raggio solo del 18% nonostante differiscano in massa di un fattore 3
- Picco nella distribuzione a valori relativamente alti di  $R_p$ 
  - Risultato influenzato da effetti selettivi la profondità del profilo di transito nella curva di luce scala con  $(R_p/R_*)^2$

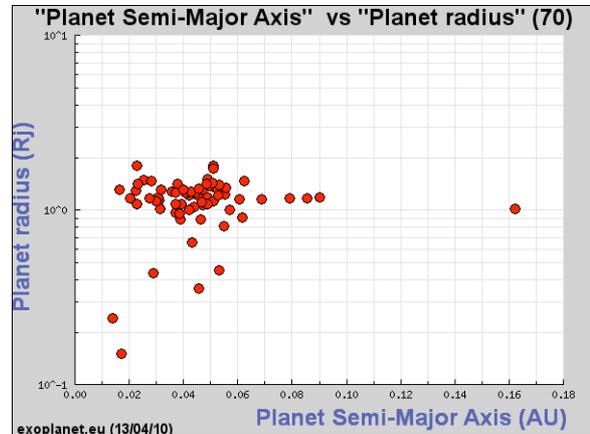


Astronomia Osservativa C, SP 6, Vladilo (2011)

14

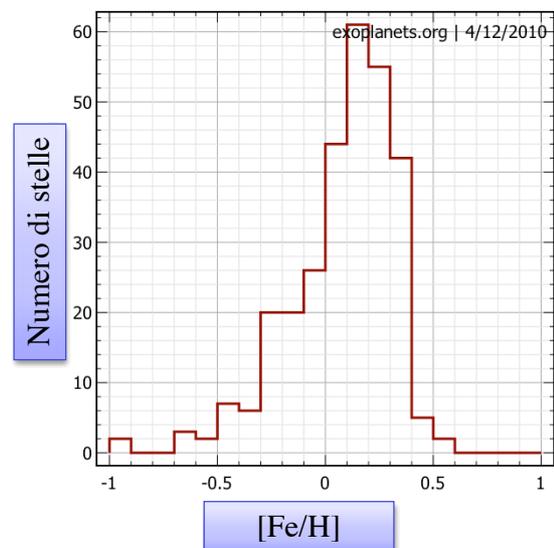
## Raggi dei pianeti e semiassi maggiori orbitali

- Campione di esopianeti studiati con il metodo dei transiti
- I valori minori di raggio sono stati trovati a piccole distanze dalla stella
  - Risultato influenzato da effetti selettivi  
La probabilità geometrica di trovare un transito planetario scala con  $R_*/a$



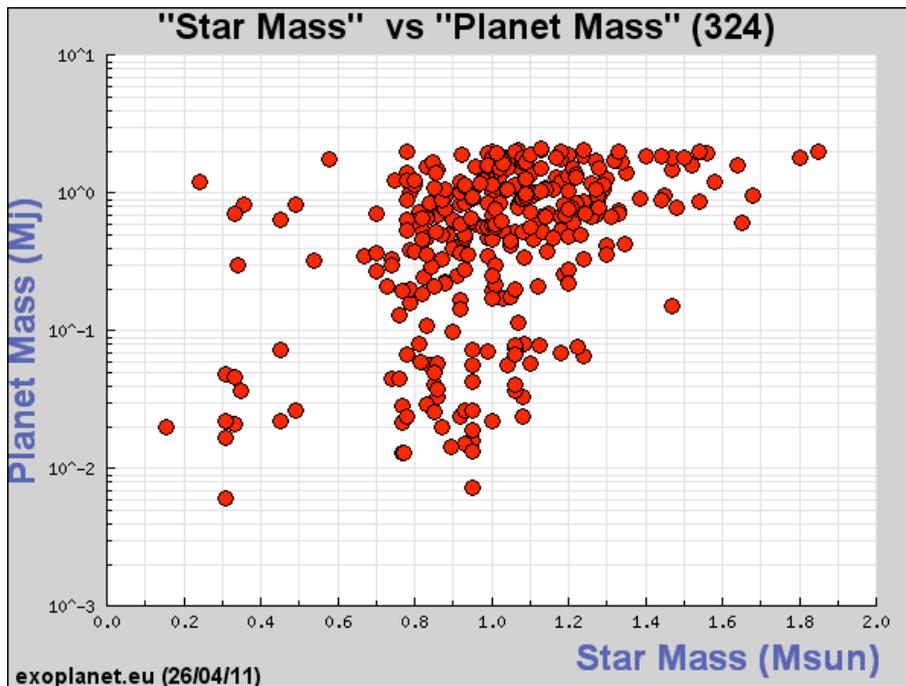
## Proprietà delle stelle ospiti Distribuzione delle metallicità stellari

- Numero di stelle ospiti di pianeti in funzione della metallicità stellare [Fe/H]
  - In grande maggioranza, pianeti giganti
- Le stelle che ospitano pianeti giganti hanno un livello di metallicità più alto delle stelle senza pianeti
  - Mediamente superiore alla metallicità del Sistema Solare
- Diverse spiegazioni sono state proposte
  - le stelle con dischi protoplanetari accrescerebbero più materiali rocciosi  
Ipotesi non confermata dalle osservazioni
  - effetto di inibizione della formazione planetaria quando la metallicità della nube protostellare è troppo bassa  
Attualmente accettata
- Non sappiamo se tale effetto è presente in pianeti di piccola massa



## Masse dei pianeti e masse delle stelle

Effetti selettivi: nelle stelle di grande massa si riescono a scoprire solo pianeti massicci  
Pianeti di piccola massa cominciano ad essere scoperti in stelle di piccola massa



## Proprietà fisiche degli esopianeti

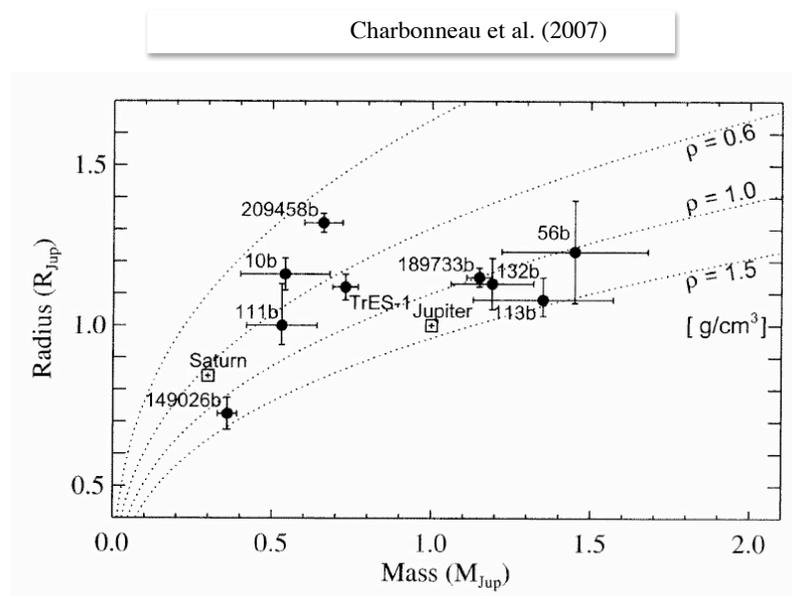
- **Caratterizzazione degli esopianeti**
  - Studio delle loro proprietà fisiche
  - I pianeti osservabili mediante il metodo dei transiti sono i più promettenti per tale tipo di studi
  - Mediante l'applicazione di varie tecniche si possono ricavare:
    - Densità media del pianeta
    - Emissione termica e riflessione del pianeta
    - Spettro di assorbimento dell'atmosfera planetaria

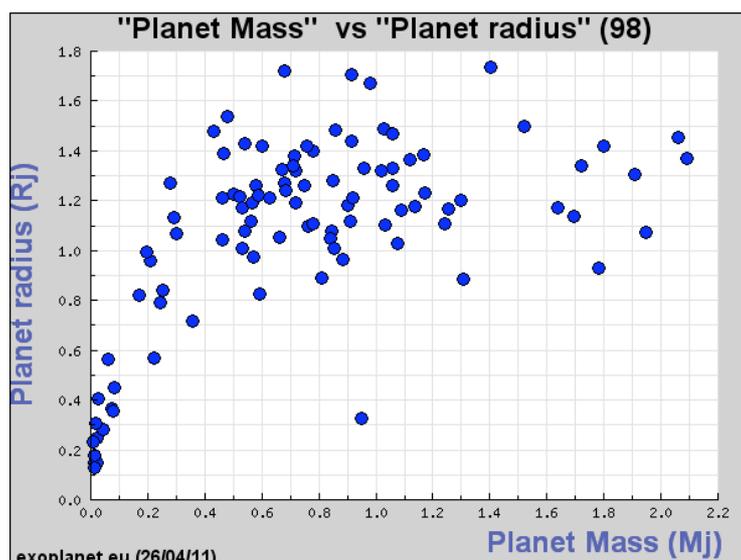
## Combinazione di diversi metodi osservativi

- L'applicazione di diversi metodi di rivelazione di esopianeti ci permette di combinare i parametri osservativi ottenuti da ciascun metodo, aumentando la possibilità di caratterizzare del pianeta
- **Metodo delle velocità radiali + metodo astrometrico**
  - Si determina il termine  $\sin i$  e si misura quindi la massa del pianeta, anzichè un limite inferiore
    - Poco utilizzato, data la scarsità di casi ottenuti con il metodo astrometrico
- **Metodo della velocità radiali + metodo dei transiti**
  - Si combina la massa, ottenuta con il metodo doppler e  $\sin i \sim 1$ , con il raggio, ottenuto con il metodo dei transiti
  - In tal modo si misura direttamente la densità media del pianeta
    - Metodo in via di intensa applicazione

## Densità media

- **Densità media**
  - Lo studio della densità media,  $\rho$ , ci permette di discriminare tra pianeti di tipo gassoso, ghiacciato o roccioso
- **La maggior parte dei risultati sinora ottenuti indicano valori di densità media  $\rho \sim 1 \text{ g cm}^{-3}$ , o anche più bassa**
  - Indicativi di pianeti gassosi





Nella figura mostriamo raggi e masse per un campione aggiornato di 98 esopianeti

Si possono identificare gli “[inflated jupiters](#)”, con raggio superiore a quello di Giove, a parità di massa

Si cominciano a trovare esempi di pianeti rocciosi, con densità media comparabile a quella della Terra

## Emissione degli esopianeti

- Per quanto debole rispetto all’emissione stellare, gli esopianeti emettono radiazione
  - Emissione termica del pianeta
    - Lo studio dell’emissione termica, nella banda infrarossa, ci da’ informazione diretta sulla temperatura superficiale
  - Riflessione della luce stellare
    - Lo studio della riflessione della luce stellare, nella banda visibile, ci da’ informazioni sull’albedo del pianeta
- Metodi per studiare l’emissione degli esopianeti
  - Imaging diretto
    - Se il pianeta è risolto dalla stella si può misurarne l’emissione termica
      - Ma non l’albedo data la grande distanza tra pianeti e stella nel caso di pianeti scoperti con questa tecnica
  - Transiti secondari

## Temperature ricavate dall' emissione termica di esopianeti usando il metodo di imaging diretto

Usando modelli di evoluzione planetaria si possono stimare indirettamente le masse dei pianeti

Exoplanet Roadmap Advisory Team (ESA)

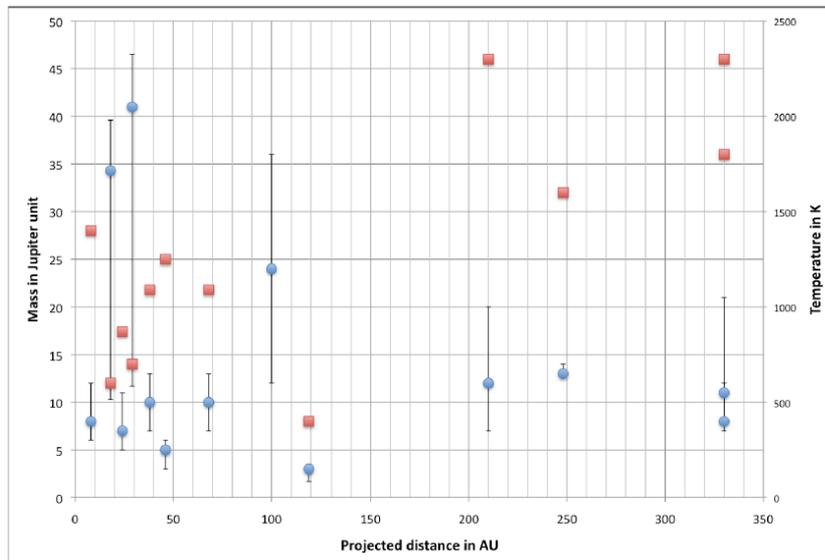


Fig. 2 : Estimated mass (blue dots) and temperature (red squares) vs. separation diagram of young planet candidates found by direct imaging.

Astronomia Osservativa C, SP 6, Vladilo (2011)

23

## Transiti secondari

### •Transito secondario

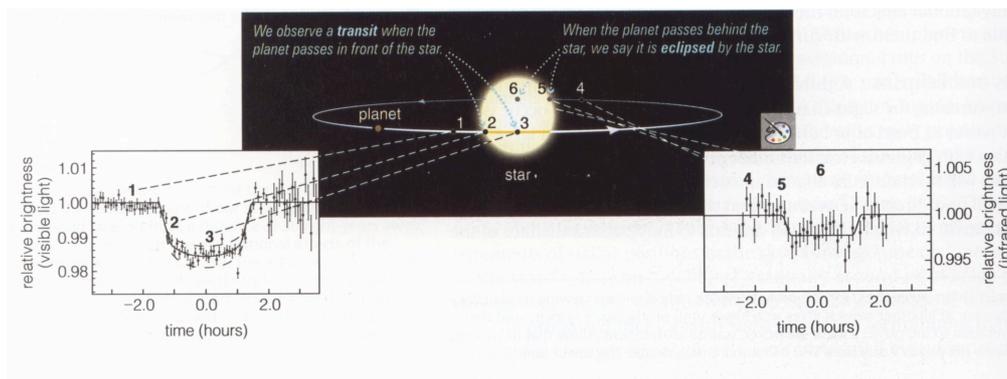
- Corrisponde al passaggio del pianeta dietro alla stella
- Se la configurazione geometrica e i parametri orbitali lo permettono

### •Curva di luce del transito secondario

- Fuori dal transito: la luce del pianeta, seppur debole, si somma a quella della stella
- Durante il transito: si vede solo la luce della stella e c'è quindi una lieve diminuzione nella curva di luce

### •Importanza del transito secondario

- La differenza  $F - F_{tr}$  in questo caso ci dà direttamente l'emissività del pianeta
- L'effetto è massimo nell'infrarosso e ci permette di studiare l'emissione infrarossa del pianeta



Astronomia Osservativa C, SP 6, Vladilo (2011)

24

## Modelli di esopianeti

- Utilizzando i vincoli osservativi disponibili dal metodo dei transiti (raggi, masse, temperature superficiali) si possono costruire modelli della struttura fisica degli esopianeti
  - Il campo di radiazione stellare gioca un ruolo fondamentale nel determinare la struttura interna, data la vicinanza alla stella nei casi più facili da studiare  
Nei “Giovi caldi” il flusso stellare crea una zona radiativa sotto la superficie che controlla la contrazione del pianeta e quindi il suo raggio
  - L’incertezza principale dei modelli è l’equazione di stato
  - In vari casi si riescono a riprodurre i parametri osservativi con modelli di base  
In alcuni casi è però necessario invocare altre sorgenti di energia interna (come ad esempio riscaldamento mareale) per spiegare i parametri osservativi

