

Sistemi planetari extrasolari

Sistemi multipli di esopianeti
scoperti attorno ad una stessa stella

1

Sistemi planetari

- Oltre allo studio delle proprietà dei singoli esopianeti è importante gettar luce sull'architettura dei sistemi planetari
- Esempi di quesiti aperti:
 - Come si collocano i diversi tipi di pianeti rispetto alla propria stella ?
 - I giganti sono più vicini o lontani dalla stella centrale?
 - Come si collocano i pianeti tra loro ?
 - I loro periodi orbitali sono in risonanza, oppure no ?
 - Il Sistema Solare è rappresentativo di una larga frazione di sistemi planetari, o è, in qualche modo, anomalo ?

2

Importanza dello studio dei sistemi planetari multipli

- Offrono test sui modelli di formazione planetaria
 - I modelli di formazione planetaria sono estremamente complessi e le loro predizioni dell'architettura finale dei sistemi possono variare in maniera drammatica con un lieve cambiamento delle condizioni iniziali
 - Avere a disposizione un numero statistico di sistemi planetari ci offre la possibilità di capire con quale frequenza ci aspettiamo di trovare un determinato tipo di architettura planetaria, e dunque scegliere modelli di formazione che, al variare delle condizioni iniziali, portino ad una frequenza di configurazioni finali in accordo con la statistica sperimentale

Metodi osservativi di sistemi planetari

- Tutti i principali metodi di rivelazioni di esopianeti sono in grado, in linea di principio, di rivelare sistemi multipli
- I primi pianeti scoperti nel 1992 con il metodo del “timing delle pulsars”, prima che venisse applicato con successo il metodo delle velocità radiali, appartenevano a un sistema planetario multiplo (Wolszczan & Frail, 1992)
- Vediamo alcuni esempi di sistemi multipli scoperti mediante imaging, lensing gravitazionale, velocità radiali e transiti

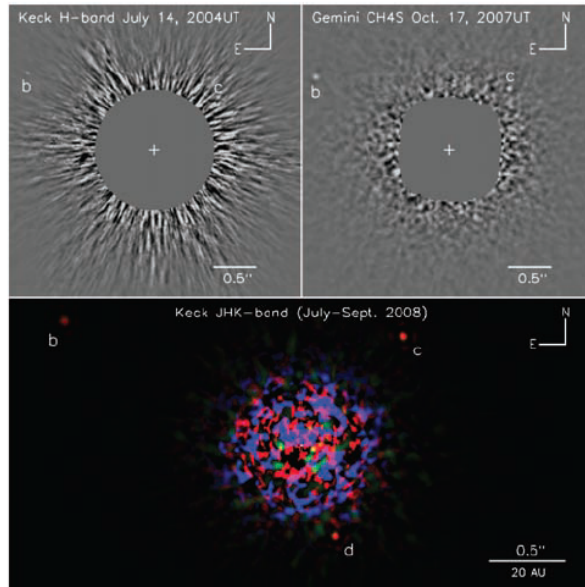
Esempio di sistema multiplo scoperto con imaging diretto
mediante osservazioni da Terra con tecniche coronografiche e di “speckle”

HR 8799bcd (Marois et al. 2008)

IR imaging of nearby, young stars

(young stars → young planets → IR emitters)

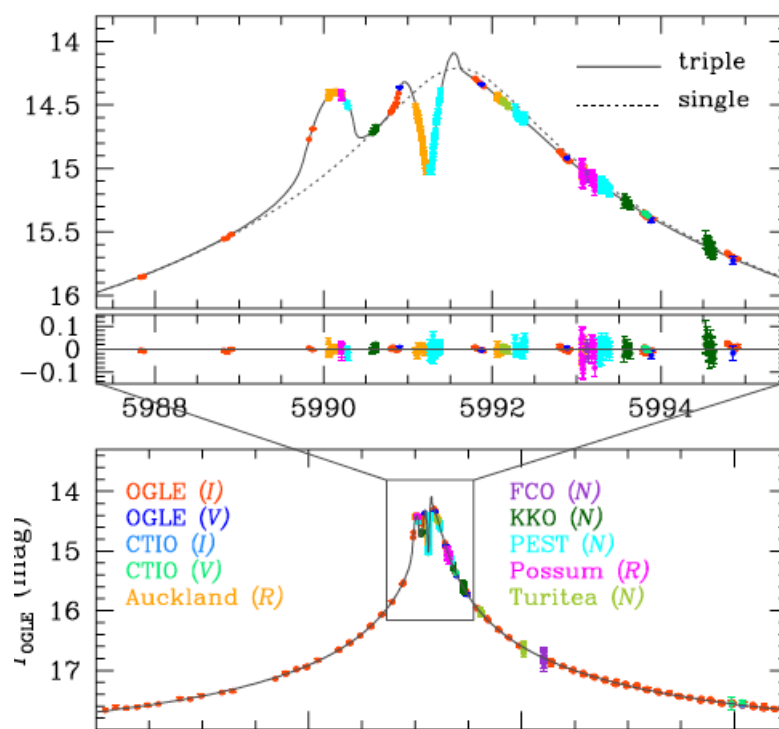
Fig. 1. HR 8799bcd discovery images after the light from the bright host star has been removed by ADI processing. **(Upper left)** A Keck image acquired in July 2004. **(Upper right)** Gemini discovery ADI image acquired in October 2007. Both b and c are detected at the two epochs. **(Bottom)** A color image of the planetary system produced by combining the J-, H-, and Ks-band images obtained at the Keck telescope in July (H) and September (J and Ks) 2008. The inner part of the H-band image has been rotated by 1° to compensate for the orbital motion of d between July and September. The central region is masked out in the upper images but left unmasked in the lower to clearly show the speckle noise level near d.



Esempio di sistema planetario scoperto con il metodo del “microlensing”

OGLE-2012-BLG-0026Lb,c (Han et al. 2013)

Due pianeti giganti che si trovano oltre la “snow-line”; distanza dalla Terra: ~ 4.1 kpc



Metodi osservativi di sistemi planetari

- Tutti i principali metodi di rivelazioni di esopianeti sono in grado, in linea di principio, di rivelare sistemi multipli
- Come nel caso dei singoli esopianeti, alcuni metodi osservativi sono più efficienti di altri
- Il maggior numero di sistemi planetari è stato scoperto con:
 - Metodo delle velocità radiali
 - Metodo dei transiti

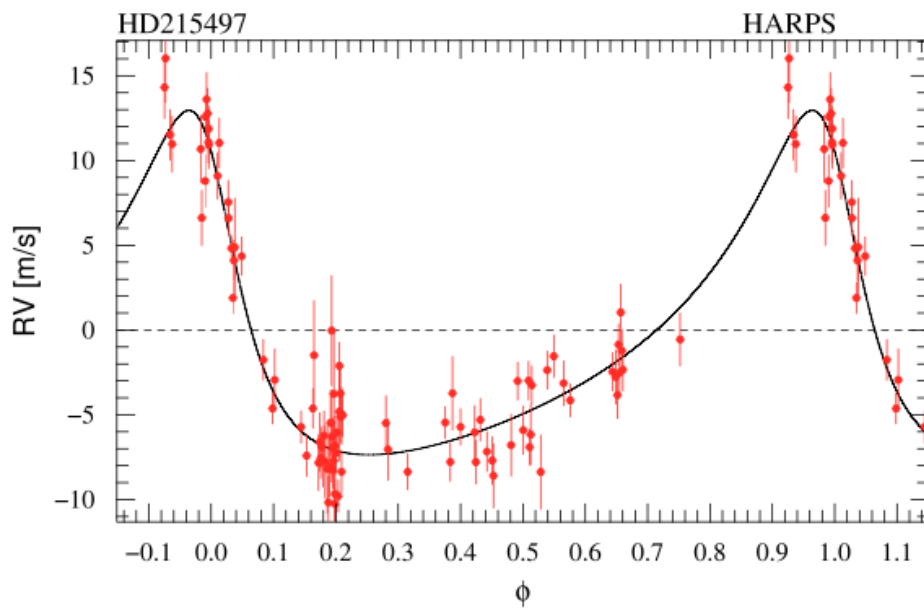
Sistemi Planetari: metodo delle velocità radiali

- Procedura:
 - Si fa un fit kepleriano del segnale più intenso nella curva di velocità radiale
 - Si sottrae alla curva di velocità radiale il fit kepleriano e si cercano evidenze di ulteriori segnali periodici
 - Analisi del periodogramma dei residui
 - Se si trova un picco significativo nel periodogramma si procede ad un ulteriore fit kepleriano
- La procedura può essere iterata fintantoche si trovano segnali statisticamente significativi nei residui

Esempio: sistema di due pianeti in HD215497

Lo Curto et al. 2010

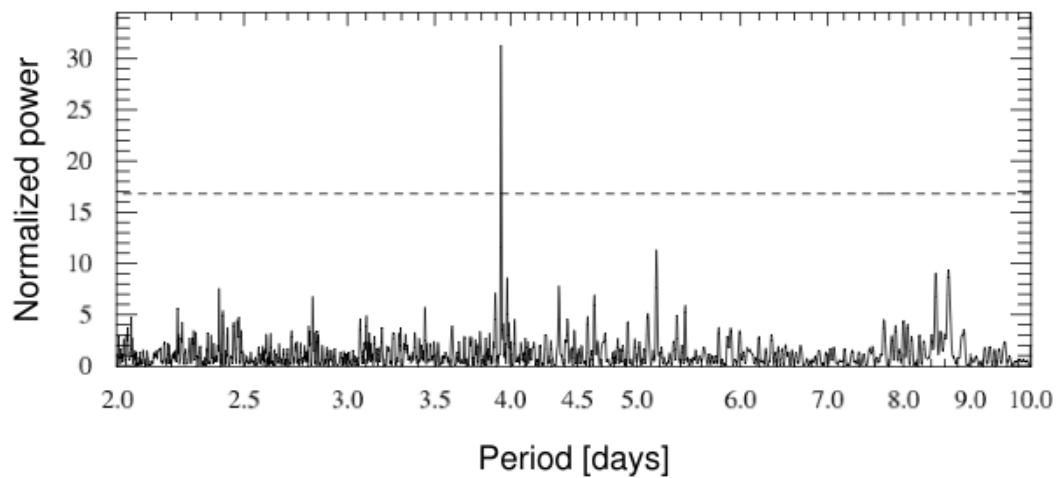
(1) Rivelazione del pianeta che dà il segnale principale ($P = 568$ d)



Esempio: sistema di due pianeti in HD215497

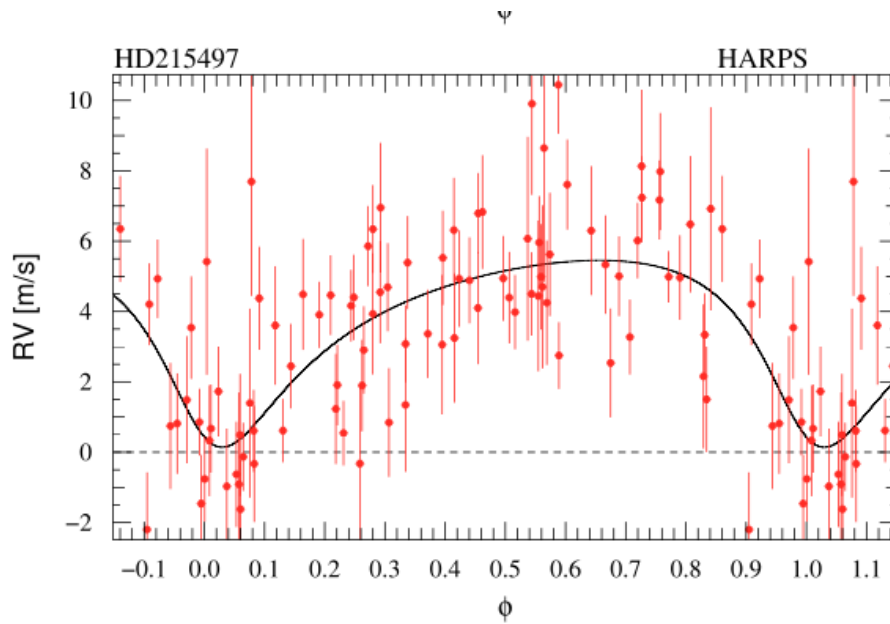
Lo Curto et al. 2010

(2) Analisi del periodogramma dei residui



I residui mostrano chiaramente l'esistenza di un picco a $P \sim 4$ d

Esempio: sistema di due pianeti in HD215497
Lo Curto et al. 2010
(3) Rivelazione del pianeta dalla curva dei residui ($P=4$ d)

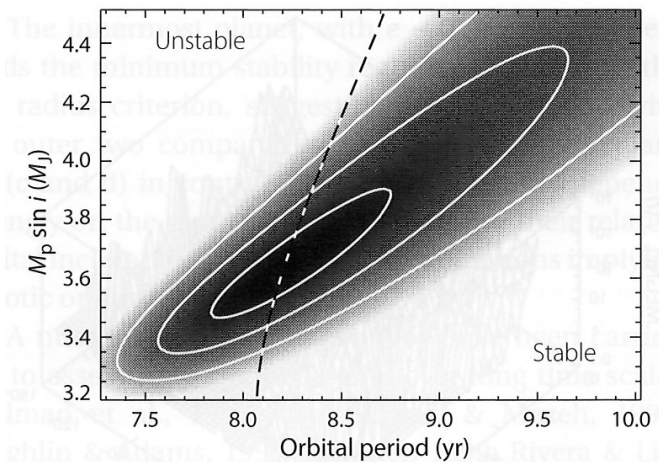


Esempio: sistema di due pianeti in HD215497
Lo Curto et al. 2010
(4) Risultati

Parameter	HD 215497b	HD 215497c
P [days]	3.93404 ± 0.00066	567.94 ± 2.70
T [JD-2 400 000]	$54\,858.95 \pm 0.37$	$55\,003.48 \pm 5.15$
e	0.16 ± 0.09	0.49 ± 0.04
ω [deg]	96 ± 34	45 ± 4
K [m s ⁻¹]	2.98 ± 0.34	10.10 ± 0.65
V [km s ⁻¹]	49.3107 ± 0.0006	
$m \sin i$ [M_{Jup}]	0.02	0.33
$m \sin i$ [M_{Earth}]	6.6	104.3
a [AU]	0.047	1.282

Analisi di stabilità dinamica dei sistemi multipli

- Integrazione delle orbite mediante metodi numerici
 - verifica che i parametri orbitali ricavati dalle osservazioni portino a soluzioni fisiche stabili a lungo termine
 - vincolano i risultati osservativi
 - si utilizzano principalmente integratori “simplettici”, costruiti in modo tale da conservare il momento angolare e l’energia totale del sistema N corpi



HD 183263 b,c (Wright et al. 2009)

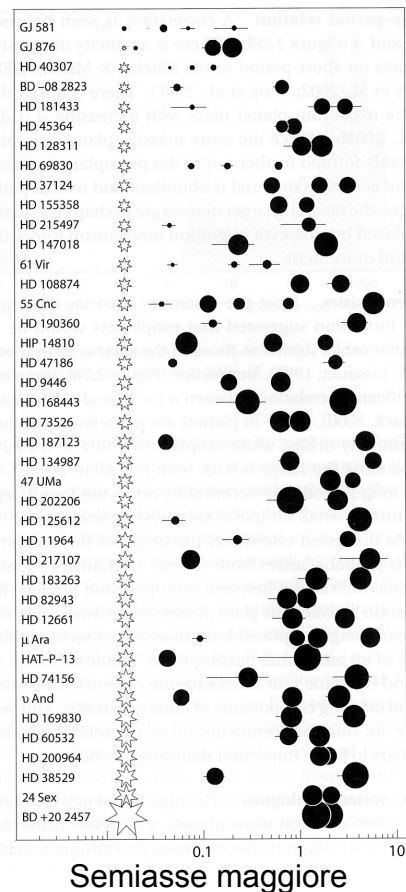
Sistemi multipli scoperti con il metodo delle velocità radiali (Marcy et al. 2008)

- Frequenza
 - Circa il 10-15% di tutti i sistemi planetari scoperti risultano essere multipli
 - La percentuale di sistemi scoperti aumenta sia con l’aumento dell’accuratezza delle misure che con l’aumento della baseline temporale delle osservazioni
 - la vera percentuale potrebbe essere, verosimilmente, prossima a 100%

Sistemi multipli scoperti con il metodo delle velocità radiali (Marcy et al. 2008)

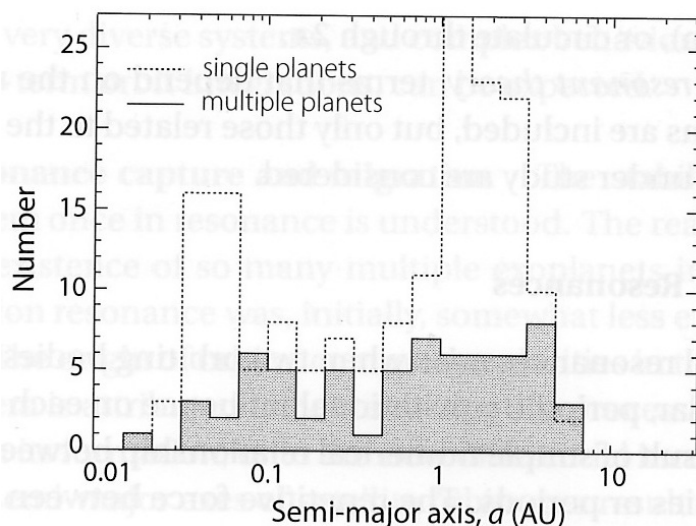
- Architettura

- I sistemi planetari mostrano una grandissima varietà nella loro architettura
- I pianeti giganti possono essere sia vicini che lontani dalla stella



- Statistica dei sistemi planetari multipli

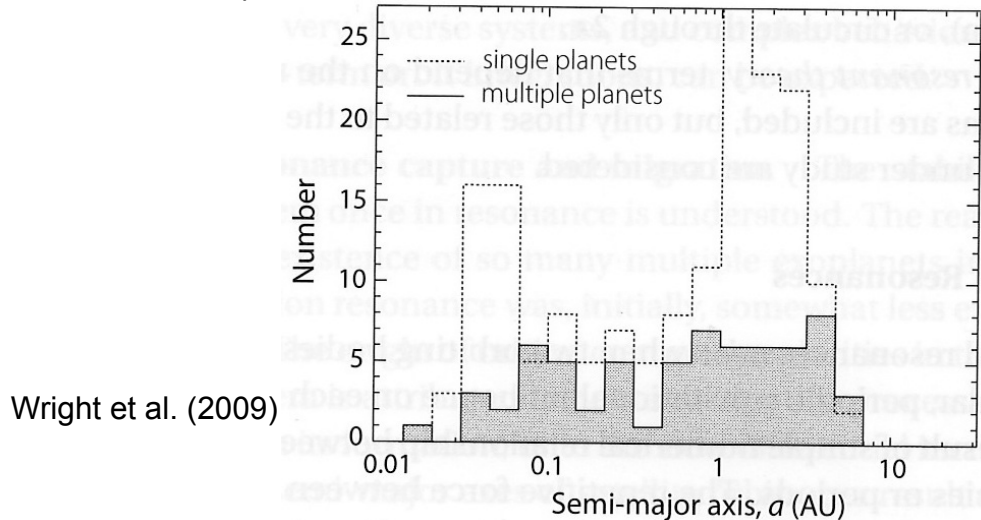
- nonostante il numero sia ancora relativamente piccolo, si cominciano a notare delle differenze rispetto alle proprietà statistiche dei sistemi con un solo pianeta
- ad esempio, la distribuzione di pianeti scoperti in funzione della distanza dalla stella è più piatta



Wright et al. (2009)

- Statistica dei sistemi planetari multipli

- mancano il picco di “hot jupiters” attorno $a \sim 0.03\text{-}0.07$ AU e di pianeti giganti oltre $a \sim 1$ AU
- Apparentemente, nei sistemi multipli non è presente il meccanismo di migrazione che porta all’accumulo di pianeti giganti vicini alla stella
- In generale, le differenze nei risultati portano a pensare all’esistenza di diversi tipi di meccanismi di migrazione, al netto di effetti selettivi non facili da quantificare



Sistemi Planetari: metodo dei transiti

- Procedura

- si cercano minimi nella curva di luce con diverse periodicità
- si possono scoprire pianeti multipli solo se il sistema è coplanare
 - pianeti dello stesso sistema, ma con diverse inclinazioni orbitali, sfuggono alle osservazioni

- Vantaggi

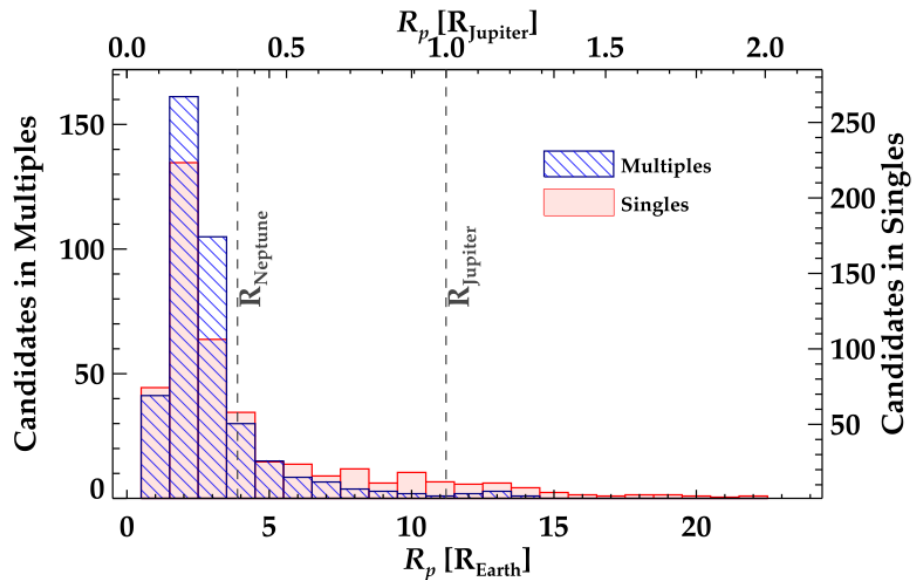
- se si scoprono transiti multipli, la probabilità che si tratti di falsi positivi (transiti non dovuti a pianeti ma a stelle binarie di fondo) diventa trascurabile
 - In tal caso non servono osservazioni di follow up per confermare i candidati scoperti unicamente con i transiti

Sistemi planetari: risultati ottenuti da Kepler

La statistica degli esopianeti è generalmente dominata da pianeti di piccola massa, più piccoli di Nettuno, ma nei sistemi multipli la frazione di pianeti nettuniani è più alta (86%) che nei sistemi singoli (69%)

– Latham et al. (2011)

LATHAM ET AL.

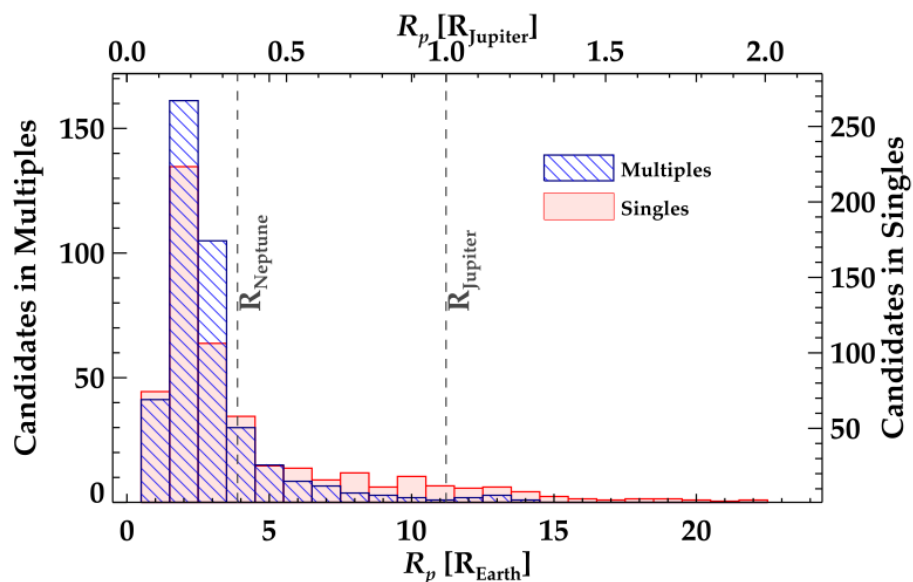


19

Sistemi planetari: risultati ottenuti da Kepler

- Possibile interpretazione
- La massa del disco protoplanetario non utilizzata per formare pianeti giganti verrebbe incorporata in pianeti di minor massa

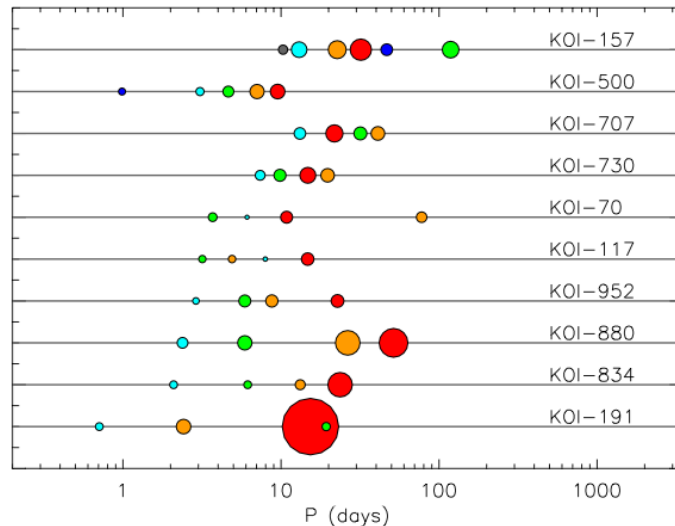
LATHAM ET AL.



20

Sistemi planetari: risultati ottenuti da Kepler

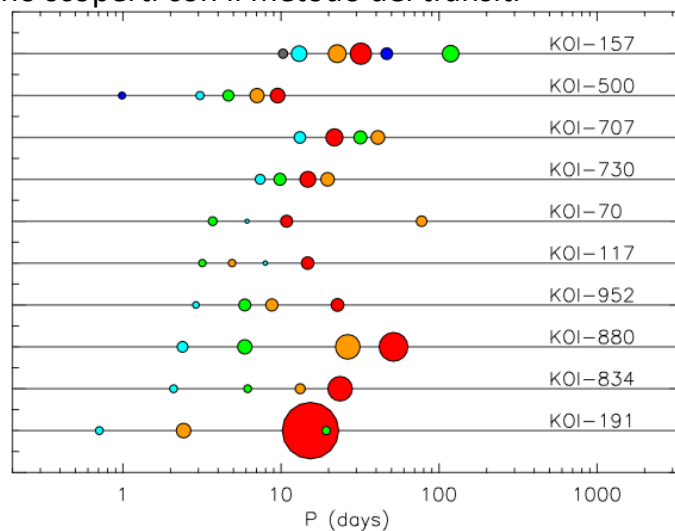
- Esempi di sistemi con 4-6 pianeti scoperti con Kepler (Lissauer et al. 2011)
 - Notevole varietà nell'architettura planetaria
 - I pianeti più piccoli tendono ad essere più interni rispetto ai giganti



21

Sistemi planetari: risultati ottenuti da Kepler

- Interpretazione
 - In termini di effetti selettivi, i pianeti si scoprono più facilmente se sono più vicini alla stella, e ciò vale a maggior ragione per pianeti piccoli
 - La migrazione di pianeti giganti verso la stella potrebbe alterare le inclinazioni orbitali dei pianeti più piccoli, diminuendo la probabilità che essi vengano scoperti con il metodo dei transiti



22

Sistemi planetari: risultati ottenuti da Kepler

- Pianeti vicini tra loro tendono ad avere lo stesso raggio
 - Risultato dedotto dall'analisi della distribuzione cumulativa del rapporto tra i raggi di pianeti confinanti tra loro
 - Non appare influenzato da particolari effetti selettivi
 - In assenza di fenomeni di migrazione, suggerisce che la dimensione finale dei pianeti all'atto della loro formazione dipenda dalle proprietà della nube protoplanetaria ad una determinata distanza dalla stella

