



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA "G. GALILEI"
CORSO DI LAUREA IN ASTRONOMIA

TESI DI LAUREA TRIENNALE

**STUDIO DEL DIAGRAMMA
MASSA-RAGGIO PER UN CAMPIONE
DI PIANETI EXTRASOLARI**

Relatore: Prof. GIAMPAOLO PIOTTO
Correlatore: Dott. VALERIO NASCIMBENI

Laureanda: GAIA LACEDELLI
Matricola: 1072693

ANNO ACCADEMICO 2015/2016

Indice

1	Introduzione	7
1.1	Pianeti extrasolari: metodi di rivelazione	7
1.2	Relazioni massa-raggio: evidenze osservative ed implicazioni teoriche	12
1.2.1	Relazioni empiriche	13
1.2.2	Relazioni teoriche	15
1.2.3	RV e TTVs: differenti sensibilità nella distribuzione massa-raggio	16
2	Selezione del campione	19
2.1	Cataloghi: dati a disposizione e relative caratteristiche	19
2.2	Criteri di selezione e suddivisione del campione	21
2.3	Completamento del campione	23
3	Analisi dei dati	25
3.1	Calcolo di irraggiamento, temperatura di equilibrio, segnale di trasmissione atmosferica e Jeans escape parameter	25
3.2	Confronto con il catalogo TEPcat	28
3.3	Costruzione dei diagrammi	31
3.3.1	Temperatura-Gravità	31
3.3.2	Magnitudine-Segnale di trasmissione atmosferica	34
3.3.3	Massa-Raggio	34
3.4	Confronto tra i diagrammi relativi a diversi metodi di rivelazione	39
3.5	Ricerca di eventuali correlazioni con ulteriori proprietà dei pianeti	42
4	Risultati e conclusioni	45
4.1	Individuazione dei pianeti peculiari	45
4.1.1	Diagramma $T_{\text{eff}} - \log(g)$	45
4.1.2	Diagramma $m_V - \delta$	47
4.1.3	Diagramma $M_p - R_p$	48
4.1.4	Jeans escape parameter: i pianeti “impossibili”	50
4.2	Risultati e conclusioni dello studio	51
4.3	Sviluppi futuri	52
	Appendice A	57
	Bibliografia	73

Prefazione

Scopo e schema della tesi

Lo scopo di questa tesi è quello di compiere uno studio osservativo sul rapporto che intercorre tra massa e raggio di un campione selezionato di pianeti extrasolari. Per poter ricercare una relazione fisica tra massa e raggio è necessario infatti che il campione sia composto da pianeti studiati in dettaglio e con caratteristiche fisiche determinate con un elevato grado di precisione, in modo che rispecchi un'effettiva caratteristica fisica e non una fluttuazione statistica.

Si compie inoltre un'analisi del campione con lo scopo di individuare pianeti potenzialmente interessanti, con caratteristiche peculiari o anomale, per uno studio successivo; per questo motivo vengono calcolate le quantità necessarie ad evidenziare tali peculiarità.

La tesi si articola nel modo seguente:

- **Capitolo 1:** viene proposta una breve introduzione riguardante i pianeti extrasolari. In sezione 1.1 dopo un accenno storico segue la definizione di esopianeta e vengono esposti i principali metodi di rivelazione utilizzati ad oggi:
 - Astrometria
 - Velocità Radiali (RV)
 - Transiti
 - Variazione dei tempi di transito (TTVs)
 - Microlente gravitazionale
 - Rilevazione diretta (Imaging)
 - Variazione del periodo di emissione delle pulsar

Nella sezione 1.2 si spiega l'importanza della relazione tra massa e raggio, riportando un riassunto degli studi compiuti in questa direzione e dei risultati raggiunti, oltre ad effettuare un confronto tra il metodo dei TTVs e delle RV nella determinazione della massa. Si evidenzia che, a parità di raggio, il metodo dei TTVs riesce ad individuare pianeti che spaziano in un intervallo di massa più ampio.

- **Capitolo 2:** insieme ad un'introduzione all'utilizzo dei cataloghi di esopianeti, vengono esposte le principali survey dedicate alla ricerca di pianeti extrasolari, che forniscono i dati contenuti nei cataloghi: HAT, OGLE, SWEEPS, TReS, WASP, XO, CoRoT, KEPLER, HARPS.

In sezione 2.2 viene esposto il metodo di selezione del campione: massa, raggio e temperatura della stella ospitante devono essere note affinché il pianeta rientri nello studio. Si

spiega come i dati finali sono stati corretti o completati tramite gli articoli di referenza (sezione 2.3). I pianeti scoperti dal satellite *Kepler* vengono separati dai rimanenti ed il campione finale si compone di:

- 232 pianeti non scoperti tramite *Kepler*
- 131 pianeti scoperti tramite *Kepler*
- **Capitolo 3:** vengono calcolate la temperatura di equilibrio del pianeta, l'irraggiamento, il segnale di trasmissione atmosferica ed il Jeans escape parameter (sez. 3.1). In sezione 3.2 viene effettuato un confronto con il catalogo TEP-Cat compilato da J. Southworth, dove sono riportati solamente gli esopianeti studiati in dettaglio. In sezione 3.3 vengono elaborati ed analizzati tre diversi tipi di grafici, divisi tra i pianeti Kepler e non Kepler:
 1. Temperatura effettiva della stella in funzione del logaritmo della gravità superficiale.
 2. Magnitudine visuale in funzione del segnale di trasmissione atmosferica.
 3. Raggio in scala logaritmica in funzione della massa. Vengono sovrapposte le curve teoriche riportanti le relazioni elaborate in Zeng et al. (2016) e Fortney et al. (2007) ed esposte in sezione 1.2.2.

In sezione 3.4 vengono confrontati i diagrammi massa-raggio per i pianeti Kepler con massa misurata tramite RV, TTVs o entrambi i metodi. Vengono ricercate (sez 3.5), tramite l'elaborazione di appositi grafici, eventuali correlazioni tra la massa e le altre proprietà dei pianeti e delle stelle ospitanti: si evidenzia come i pianeti Kepler abbiano generalmente semiasse maggiore più elevato, siano più freddi e meno irradiati rispetto ai non Kepler, pur orbitando stelle con caratteristiche simili.

- **Capitolo 4:** Vengono individuati (sez. 4.1), grazie ai grafici del capitolo 3, i pianeti peculiari:
 - Pianeti orbitanti stelle fuori dalla sequenza principale (Corot-28b, Kepler-91b, Kepler-56b/c, Kepler-432b, Kepler-435b).
 - Pianeti con elevato valore del segnale di trasmissione atmosferica, dovuto alla bassa densità (Kepler-51b/c/d, Kepler-12b, GJ-1214b).
 - Pianeti rocciosi con temperatura di equilibrio anomala (Kepler-10b, Kepler-78b), dovuta principalmente al brevissimo periodo orbitale e all'elevato valore dell'albedo.
 - Pianeti con valori del Jeans escape parameter $J < 20$ e pertanto fisicamente "impossibili".

Nelle sezioni 4.2 e 4.3 vengono proposti rispettivamente un riassunto dei risultati ottenuti ed i possibili sviluppi futuri dello studio, esponendo le prossime principali missioni spaziali dedicate allo studio degli esopianeti (*PLATO*, *TESS*, *CHEOPS*, *JWST*).

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Pianeti extrasolari: metodi di rivelazione

Fin dall'antichità l'uomo si è interrogato sulla possibile esistenza di mondi differenti dalla Terra, anche se prevalentemente in ambito filosofico. La moderna ricerca di pianeti extrasolari si può datare all'incirca verso la metà del XIX secolo, con l'annuncio di un possibile pianeta orbitante il sistema binario 70 Ophiuchi rilevato grazie all'utilizzo dell'astrometria, tuttavia subito falsificato. Dopo un silenzio di circa un secolo, a partire dal 1940 venne proposto un elevato numero di candidati pianeti, i quali tuttavia si rivelarono essere frutto di segnali spuri, oppure segnali appartenenti ad oggetti eccedenti il limite superiore in massa per la definizione di pianeta e classificati pertanto come nane brune o stelle. Quella che viene considerata la prima vera scoperta di un pianeta extrasolare avvenne nel 1992, grazie allo studio di Wolszczan & Frail (1992): tramite un metodo che utilizzava l'analisi delle variazioni del periodo di pulsazione delle stelle a neutroni, furono rilevati due pianeti orbitanti la pulsar PSR 1257+12. L'individuazione di pianeti orbitanti stelle appartenenti alla sequenza principale si ottenne solo nel 1995 quando, tramite il metodo delle velocità radiali, venne scoperto un pianeta orbitante la stella 51 Pegasi. A partire da questa data il numero di pianeti scoperti ogni anno è aumentato esponenzialmente fino alla data odierna, grazie al perfezionamento delle tecniche di rivelazione già note e soprattutto grazie allo sviluppo di ulteriori metodi di ricerca.

Prima di analizzare brevemente le diverse tecniche adottate per la rivelazione dei pianeti extrasolari, è necessario fornire una definizione adeguata per stabilire quali corpi celesti debbano essere considerati pianeti. Secondo la decisione B5 della IAU (IAU, 2006) un corpo celeste del Sistema Solare viene classificato come pianeta se:

- è in orbita intorno al Sole.
- ha una massa sufficiente affinché la sua gravità possa vincere le forze di corpo rigido, cosicché assume una forma di equilibrio idrostatico (quasi sferica).
- ha ripulito le vicinanze intorno alla sua orbita.

Per quanto riguarda i pianeti extrasolari la difficoltà sorge nello stabilire una divisione tra pianeti molto massicci e nane brune di piccola massa; per questo ci si riporta al suggerimento della IAU del 2003 (IAU, 2003):

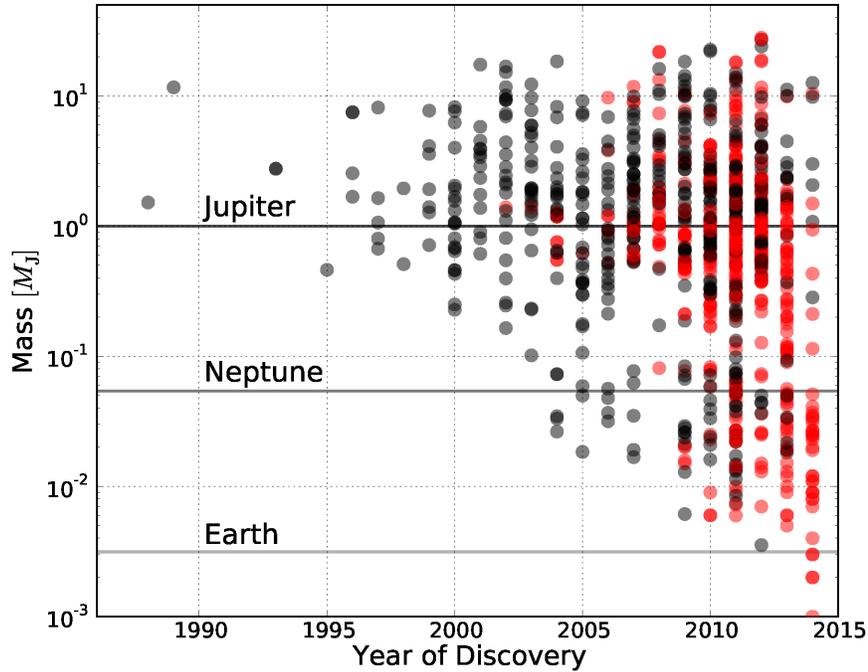


Figura 1.1: Il grafico mostra in ordinata su asse logaritmico la massa del pianeta (o il limite inferiore nel caso di dati acquisiti tramite le velocità radiali) ed in ascissa l'anno di scoperta; i pianeti rappresentati in rosso sono transitanti, mentre quelli che presentano solo misure di velocità radiali sono mostrati in grigio. È evidente come con il passare degli anni, oltre ad aumentare il numero stesso dei pianeti scoperti, aumenti considerevolmente anche l'intervallo in massa, fino ad arrivare a pianeti di massa comparabile a quella terrestre. Immagine tratta da Laughlin & Lissauer (2015).

1. Un oggetto con massa inferiore alla massa limite necessaria per innescare la fusione termonucleare del deuterio (calcolata essere $13 M_J$ per oggetti di metallicità solare) che orbitano intorno ad una stella o a residui stellari (come ad esempio una pulsar) è un *pianeta*, indipendentemente dal modo in cui si è formato. La massa minima richiesta affinché un oggetto sia classificato come pianeta deve essere la stessa adottata per il Sistema Solare.
2. Oggetti sub-stellari con massa superiore alla massa limite necessaria per innescare la fusione termonucleare del deuterio sono *nane brune*, indipendentemente dalla loro formazione o da dove siano collocate.
3. Oggetti liberi di vagare in ammassi stellari con massa inferiore alla massa limite necessaria per innescare la fusione termonucleare del deuterio non sono pianeti, bensì *sub-nane brune*.

Si elencano in seguito i principali metodi utilizzati ad oggi per l'individuazione di pianeti extrasolari.

Astrometria. L'astrometria misura la posizione ed i moti delle stelle nelle due componenti nel piano del cielo. Grazie a ripetute e precisissime misure astrometriche è possibile

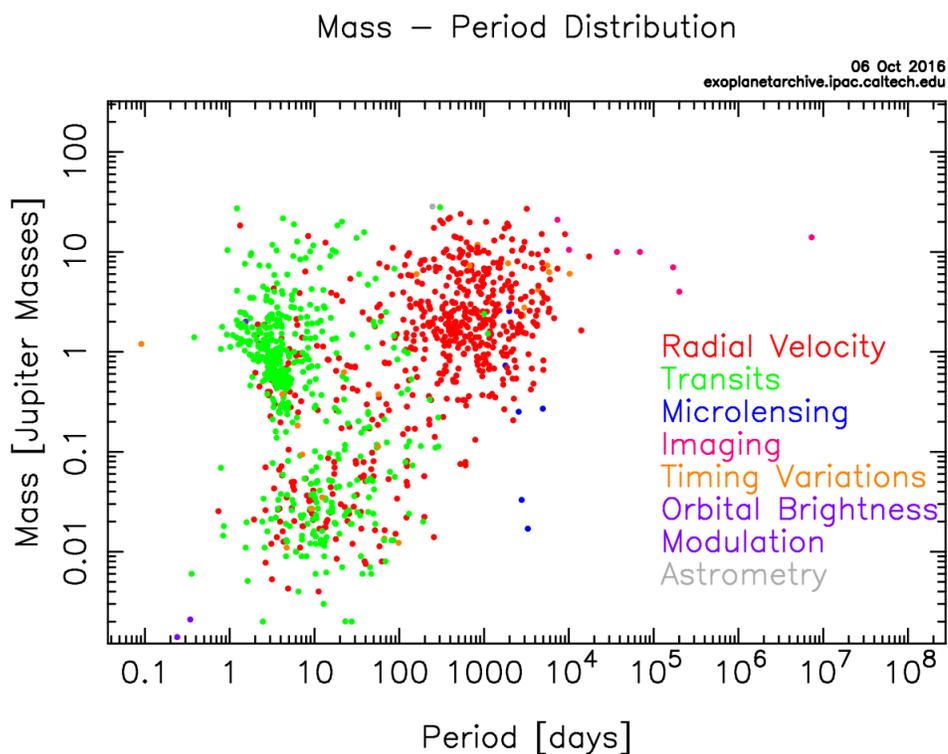


Figura 1.2: Grafico della massa planetaria (in unità gioviane) in funzione del periodo orbitale. I pianeti sono indicati con colori diversi a seconda del metodo di rivelazione: è evidente come i transiti e le velocità radiali siano i principali metodi di rivelazione e come essi siano sensibili a caratteristiche fisiche planetarie differenti. Immagine tratta dal sito *exoplanetarchive.ipac.caltech.edu*.

determinare la componente tangenziale dello spostamento della stella dovuto alla perturbazione gravitazionale di un pianeta orbitante: ciò permette di determinare, oltre alla massa del pianeta, anche quasi tutti i suoi parametri orbitali. È stata la prima tecnica utilizzata per la ricerca di esopianeti, ma richiede una tale precisione che ad oggi nessun pianeta è stato scoperto utilizzando solamente questo metodo. Si prevede che grazie alle misure di altissima precisione del satellite *GAIA*, lanciato nello spazio nel dicembre 2013 (fino a $25 \mu\text{arcsec}$ per le stelle di 15esima magnitudine), il numero di pianeti rilevati tramite astrometria aumenterà considerevolmente, in particolare pianeti con massa superiore a quella di Giove e lontani non più di 200 pc, in quanto più probabili da individuare tramite questo metodo.

Velocità Radiali (Radial Velocity, RV). È uno dei primi metodi utilizzati ed è oggi uno dei più diffusi: si basa sulla perturbazione gravitazionale che un pianeta induce sulla stella ospitante. I due corpi celesti orbitano attorno al comune centro di massa e ciò induce un moto misurabile nell'astro. Tale moto può essere descritto da tre componenti, una lungo la linea di vista dell'osservatore (componente radiale) e le rimanenti due nel piano del cielo. Il metodo delle velocità radiali (o Doppler) permette di misurare la componente radiale del moto della stella e da essa risalire alla massa del pianeta tramite la misura dello spostamento Doppler delle righe nello spettro stellare, che mostra una dipendenza periodica dal tempo (vedi Fig. 1.3). Si ha un effetto di selezione in favore di pianeti con breve periodo orbitale e massa elevata; un'ulteriore limitazione è che la

stima della massa è solamente un limite inferiore, in quanto ciò che si ricava è la quantità $M_p \sin(i)$, dove M_p è la massa effettiva del pianeta ed i è l'inclinazione dell'orbita, che è il solo dei parametri orbitali, oltre alla longitudine del nodo ascendente (Ω), non ricavabili dal metodo stesso. Oggi si possono raggiungere precisioni di circa 1 m s^{-1} (si consideri che la Terra provoca sul Sole uno spostamento di 9 cm s^{-1}), che permettono di rivelare pianeti di massa uguale o minore di quella terrestre.

Transiti. Unito al metodo delle velocità radiali permette di determinare quasi totalmente i parametri fisici di un pianeta e a partire dal primo pianeta scoperto (HD 209458–Henry et al. 2000, Charbonneau et al. 2000) ha avuto un'enorme crescita fino a diventare il metodo più utilizzato, grazie soprattutto alle nuove tecnologie (vedi sezione 2.1). Quando l'orbita di un pianeta è all'incirca parallela alla linea di vista (ovvero è vista di taglio), o al più leggermente inclinata, il fatto che il pianeta transiti davanti all'astro provoca una diminuzione rilevabile della luminosità di quest'ultimo (eclissi primaria), pari circa all'1% della luminosità totale di una stella di tipo solare per un pianeta di raggio gioviano e allo 0.01% per uno di raggio terrestre, dove quest'ultima quantità è rilevabile solamente da telescopi spaziali. Si può evidenziare anche il calo di luminosità dovuto all'eclissi secondaria, quando il pianeta è occultato dalla stella e pertanto la luce che prima esso rifletteva o emetteva termicamente non contribuisce più alla luminosità totale. Tale metodo permette di determinare il raggio del pianeta, il semiasse maggiore e l'inclinazione dell'orbita rispetto al piano del cielo e all'asse di rotazione stellare, sfruttando la periodicità della curva di luce della stella monitorata (vedi Fig. 1.3). Le survey dedicate allo studio dei transiti sono affette da un sensibile bias verso pianeti con breve periodo orbitale, in quanto più facilmente monitorabili nei periodi limitati previsti dalle survey; inoltre bisogna considerare che semiasse molto corti aumentano la probabilità che il pianeta possa essere visto di taglio da Terra e sia quindi rilevabile. Tramite l'utilizzo dei transiti è inoltre possibile lo studio delle atmosfere planetarie, tramite l'analisi lo spettro stellare “filtrato” dall'atmosfera circostante l'esopianeta.

Variazione dei tempi di transito (Transit Time Variations, TTVs). È un metodo che permette di rivelare pianeti con orbite non limitate dall'inclinazione, a differenza ad esempio dei transiti o delle velocità radiali. Si basa sulle variazioni del periodo che intercorre tra due transiti di uno stesso pianeta, o tra la sua eclissi primaria e quella secondaria, o sulla variazione della forma della curva di luce o sulla durata del transito, indotte dall'effetto gravitazionale di uno o più pianeti presenti nel sistema. È possibile risalire così alla massa dei pianeti perturbanti.

Microlente gravitazionale. È un effetto gravitazionale previsto dalla teoria della relatività generale. Si basa sul fatto che un oggetto massiccio devia i raggi di luce con traiettoria vicina ad esso. Questo è ciò che avviene quando la luce di una stella vicina risulta essere quasi allineata lungo la linea di vista di un osservatore che punta una stella più lontana. La prima stella agisce da vera e propria “lente gravitazionale”, aumentando la luminosità della stella sullo sfondo in funzione del tempo, in base alla separazione angolare tra le due. In presenza di un pianeta, la curva di luce prevista mostra delle perturbazioni, con un segnale caratteristico che permette di ricavare la massa del pianeta e la sua separazione angolare dalla stella. Il metodo è sensibile anche a pianeti di massa terrestre, se situati in un'orbita con elevato semiasse maggiore; il limite di questa tecnica è dovuto al fatto che l'evento è irripetibile, pertanto non è possibile monitorare il pianeta una volta scoperto.

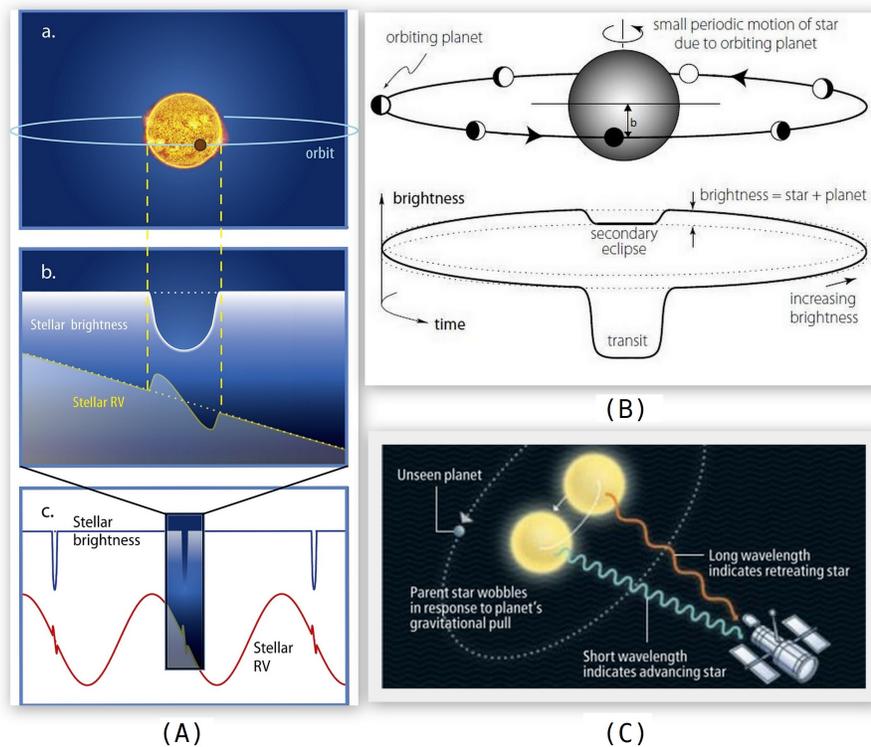


Figura 1.3: Figura (A): illustrazione schematica dell'orbita di un pianeta (a); curva di luce e serie temporale di velocità radiali (c); in specifico la variazione di luminosità e di velocità radiali che il pianeta provoca (b). La linea tratteggiata mostra come un pianeta senza un transitto visibile non produca alcuno di questi effetti. Immagine tratta da Howard (2013).

Figura (B): illustrazione specifica di un transitto, tratta dal libro *The Exoplanet Handbook*. Vengono mostrati le eclissi primaria e secondaria ed il parametro di impatto b .

Figura (C): effetto Doppler prodotto dall'orbita dell'astro intorno al centro di massa stella-pianeta. Immagine tratta dal sito www.nasa.gov.

Rilevazione diretta o Imaging. È l'unico metodo diretto per la rivelazione di esopianeti, dal momento che i precedenti si basano sugli effetti che il pianeta induce sulla stella ospitante: esso prova quindi definitivamente l'esistenza di pianeti extrasolari, rilevati in precedenza solo tramite metodi indiretti. Sviluppatisi solamente negli ultimi anni per le enormi difficoltà tecnologiche, prevede di acquisire un'immagine del pianeta la cui separazione angolare dalla stella ospitante è tipicamente minore di 1 arcsec. A ciò si aggiunge la difficoltà di individuare un oggetto che ha luminosità circa 10^{-6} volte quella irradiata dalla stella; bisogna inoltre diminuire anche la luce riflessa e diffusa nelle ottiche del telescopio per poter individuare quella del pianeta stesso. Per ottenere tali immagini sono stati inventati coronografi sempre più sofisticati per eliminare la luce diretta della stella ponendo una maschera sul piano focale del telescopio e sistemi di ottica adattiva per eliminare le fluttuazioni dovute all'atmosfera; è in fase di studio lo sviluppo di tecniche interferometriche dallo spazio. L'immagine diretta permette di ottenere una misura precisa del semiasse orbitale e , nel caso di un numero sufficientemente elevato di fotoni, lo spettro del pianeta. È possibile ottenere anche immagini di dischi circumstellari,

dove presenti. Il metodo è affetto da un forte bias osservativo in favore di oggetti con semiasse estremamente elevato, giovani e brillanti.

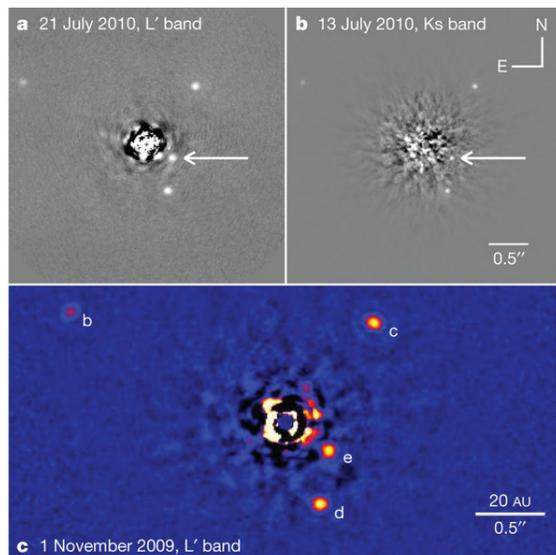


Figura 1.4: Immagini in banda infrarossa dei quattro pianeti giganti del sistema HR 8799, ottenute tramite le ottiche adattive del telescopio Keck. Al centro di ogni immagine si vede il residuo rimanente dopo la sottrazione della PSF. Immagine tratta da Fischer et al. (2014).

Variazione del periodo di emissione delle pulsar. Una stella in presenza di un pianeta orbita attorno al comune centro di massa dei due corpi; nel caso in cui la stella emetta un segnale perfettamente periodico è possibile rilevare un cambiamento nel periodo di pulsazione dovuto al fatto che la velocità della luce è finita. Tramite questo metodo sono stati rilevati diversi pianeti attorno a stelle a neutroni, preferenzialmente *millisecond pulsar* (come la prima rivelazione su PSR 1257+12), binarie ad eclissi e si ricercano oggi anche segnali provenienti da nane bianche pulsanti.

1.2 Relazioni massa-raggio: evidenze osservative ed implicazioni teoriche

L'analisi dei dati riguardanti gli esopianeti ha portato alla luce un'enorme varietà di sistemi: la struttura del Sistema Solare, con i pianeti rocciosi e di piccolo raggio all'interno ed i pianeti giganti gassosi all'esterno, sembra essere solo una delle tante possibili configurazioni. Sono stati scoperti ad esempio pianeti simili a Giove per massa e raggio, ma con semiasse orbitale minore di quello di Mercurio ed un gran numero di pianeti con raggio intermedio tra quello della Terra e quello di Nettuno, del tutto assenti invece nel Sistema Solare.

Non esiste ad oggi una suddivisione universalmente riconosciuta degli esopianeti in classi o categorie: esistono diversi criteri secondo cui è possibile effettuare una classificazione, ma nessuna di quelle proposte è stata ancora adottata ufficialmente dalla IAU. In base alla struttura interna solitamente gli esopianeti vengono suddivisi in tre categorie principali:

1. *Rocky planets* (Pianeti rocciosi): sono pianeti con massa e raggio comparabili a quelli della Terra o leggermente maggiori, fino a $5 - 10 M_{\oplus}$ ("super-Terre") e $\sim 1.75 R_{\oplus}$, in

quanto pianeti più massicci catturano grandi quantità di gas durante l'accrescimento, diventando giganti gassosi o di ghiaccio. Mostrano una superficie definita, solida o liquida: hanno una composizione prevalentemente rocciosa, fatta di metalli e silicati e possono presentare una sottile atmosfera.

2. *Gas giants* (Giganti gassosi): noti anche come pianeti Gioviiani, in quanto Giove ne è l'esempio principale ($M = 317.8 M_{\oplus}$, $R = 11.2 R_{\oplus}$), sono composti prevalentemente da idrogeno ed elio (90% in massa) e non mostrano una superficie solida o liquida. Sono formati da un nucleo solido centrale, probabilmente composto da silicati, circondato da uno strato di idrogeno liquido e infine da uno di idrogeno molecolare.
3. *Ice giants* (Giganti di ghiaccio): noti anche come pianeti Nettuniani, in quanto mostrano caratteristiche simili a quelle di Nettuno ($M = 17.15 M_{\oplus}$, $R = 3.8 R_{\oplus}$), spaziano in massa tra le $10 M_{\oplus}$ e le $32 M_{\oplus}$. Non presentano superficie solida o liquida, ma si differenziano dai precedenti in quanto idrogeno ed elio, che costituiscono l'involucro esterno, rappresentano solo il 10% in massa del pianeta, mentre prevalgono elementi più pesanti, come ossigeno, carbonio, azoto e zolfo: essi si trovano prevalentemente sotto forma di ghiacci in uno strato che sovrasta un nucleo centrale solido.

Al di fuori di queste categorie si trovano pianeti con caratteristiche più esotiche: *water worlds*, corpi costituiti interamente da acqua, *mini-Neptunes* della stessa composizione di Nettuno, ma con massa inferiore a $10 M_{\oplus}$ e *mega-Earths*, pianeti grandi come Nettuno, ma costituiti prevalentemente da elementi allo stato solido.

Massa e raggio sono due quantità essenziali per lo studio di un pianeta: la conoscenza di entrambi permette di calcolare la densità media, di individuare pertanto composizioni simili a quella terrestre e quindi pianeti potenzialmente abitabili, oltre a portare informazioni sulla loro formazione ed evoluzione.

Per ricavare la relazione che lega massa e raggio è possibile procedere in diversi modi: si può cercare una relazione puramente teorica, basata sullo studio della struttura interna dell'equazione di stato dei materiali che si suppone compongano il pianeta, oppure si può tentare di individuare una relazione empirica basata sulle osservazioni, in maniera che i dati a disposizione siano interpolati nel miglior modo possibile.

1.2.1 Relazioni empiriche

La principale caratteristica riscontrata dall'analisi di campioni di pianeti con entrambi massa e raggio noti è che sembra non esserci una relazione univoca che le legghi: ad un dato raggio l'intervallo di masse osservate è molto ampio. Ciò potrebbe essere dovuto ad errori sistematici delle misure (soprattutto per quanto riguarda i pianeti di piccola massa) oppure ad un'effettiva varietà nella composizione dei pianeti. Molti autori in letteratura hanno effettuato studi in questa direzione elaborando diverse relazioni empiriche, tra cui Seager et al. (2007), Lissauer et al. (2011), Enoch et al. (2012), Kane & Gelino (2012), Weiss et al. (2014).

Le relazioni elaborate sono divise tra quelle relative a pianeti giganti e quelli di massa inferiore, con limite solitamente posto a $32 M_{\oplus}$. Ciò viene fatto perché è in gioco una fisica diversa, dominata da ghiacci, metalli e silicati per $M < 32 M_{\oplus}$ e dominata dal gas (H/He) per $M > 32 M_{\oplus}$: cosa succeda nella zona di transizione è ancora ampiamente sconosciuto. A questo si aggiunge il problema che, una volta calcolata la densità media, le combinazioni di composizione chimica e struttura interna che danno tale risultato possono essere più di una: ad esempio una

stessa densità può essere data un nucleo denso composto di silicati e metalli circondato da una tenue atmosfera di idrogeno, oppure da un pianeta composto interamente di acqua.

La prima relazione elaborata (Lissauer et al. 2011) è quella che meglio si adatta ai corpi celesti del Sistema Solare con massa compresa tra quella della Terra e quella di Saturno ($95.16 M_{\oplus}$), ovvero $M_p/M_{\oplus} = (R_p/R_{\oplus})^{2.06}$: essa tuttavia, pur non essendo in totale disaccordo con i dati riguardanti gli esopianeti, non è univoca ed è ad ogni modo insufficiente.

Una relazione derivata direttamente dallo studio di un campione di esopianeti è stata elaborata da Weiss et al. (2014): da quanto riportato nell'articolo, i pianeti di taglia medio-bassa ($R < 4 R_{\oplus}$) hanno densità crescente al crescere del raggio fino a circa $1.5 R_{\oplus}$, con un massimo di 7.6 g cm^{-3} , superiore quindi a quella terrestre (5.5 g cm^{-3}). Sopra $1.5 R_{\oplus}$ la densità decresce al crescere del raggio, dando quindi evidenza della presenza di elementi volatili ed escludendo una composizione puramente rocciosa.

Il recente articolo di Chen & Kipping (2016) riporta lo studio compiuto attraverso l'analisi bayesiana per ottenere relazioni predittive che legano massa e raggio di pianeti extrasolari di qualunque dimensione, in un intervallo che copre nove ordini di grandezza. Dalla figura 1.5 si possono individuare tre punti di transizione, dove avviene un evidente cambio di pendenza nella relazione logaritmica che lega massa e raggio per le diverse categorie di pianeti:

1. $2.04 M_{\oplus}$; è il punto di transizione tra i pianeti cosiddetti Terrestri e quelli Nettuniani. La denominazione Terrestre è utilizzata in questo caso non per indicare unicamente pianeti di composizione simile a quella terrestre e quindi potenzialmente abitabili, ma piuttosto per indicare la classe di pianeti che spaziano dai pianeti nani ($M \sim 10^{-4} M_{\oplus}$) ai pianeti di massa doppia rispetto a quella terrestre, costituiti da silicati, ghiacci e metalli; non ci sono evidenti transizioni tra pianeti nani e pianeti veri e propri.

Per i pianeti Terrestri si ha un andamento a legge di potenza del tipo $R \sim M^{0.279 \pm 0.009}$. Con l'inizio dei pianeti Nettuniani, oltre ad un cambio di pendenza nella relazione, che segue un andamento del tipo $\bar{\rho} \sim M^{-0.77 \pm 0.13}$, si nota anche un aumento nella dispersione dei dati. La tendenza indica pertanto un aumento dell'atmosfera, costituita da gas volatili.

Entrambe le relazioni sono coerenti con quelle precedentemente elaborate.

2. $0.414 M_J$; segna il passaggio dai pianeti Nettuniani a quelli Gioviniani. La transizione può essere spiegata dal fatto che per un pianeta Nettuniano più aumenta la massa più aumenta il raggio; si giunge ad un punto in cui il pianeta raggiunge una massa sufficiente affinché si inneschi la compressione gravitazionale, invertendo il processo di crescita e portando così alla categoria dei pianeti Gioviniani. La pendenza è praticamente nulla ($R \sim M^{-0.04 \pm 0.02}$): al crescere della massa il raggio rimane quasi invariato. Non ci sono segni evidenti di transizione tra i questa classe di pianeti e la categoria della nane brune, che possono quindi essere viste in questa interpretazione semplicemente come membri molto massicci della classe dei pianeti Gioviniani. La transizione è ancora piuttosto problematica, in quanto modelli teorici di sfere di gas freddo (H/He) mostrano che il massimo valore del raggio dovrebbe essere raggiunto ad una massa compresa tra $1.2 M_J$ e $3.3 M_J$; i dati osservativi invece indicano che la transizione a pianeti Gioviniani avviene per masse circa pari a quella di Saturno, il quale ne è prova evidente in quanto possiede un raggio simile a quello di Giove (entro il 20%), ma presenta una massa inferiore di circa un ordine di grandezza.

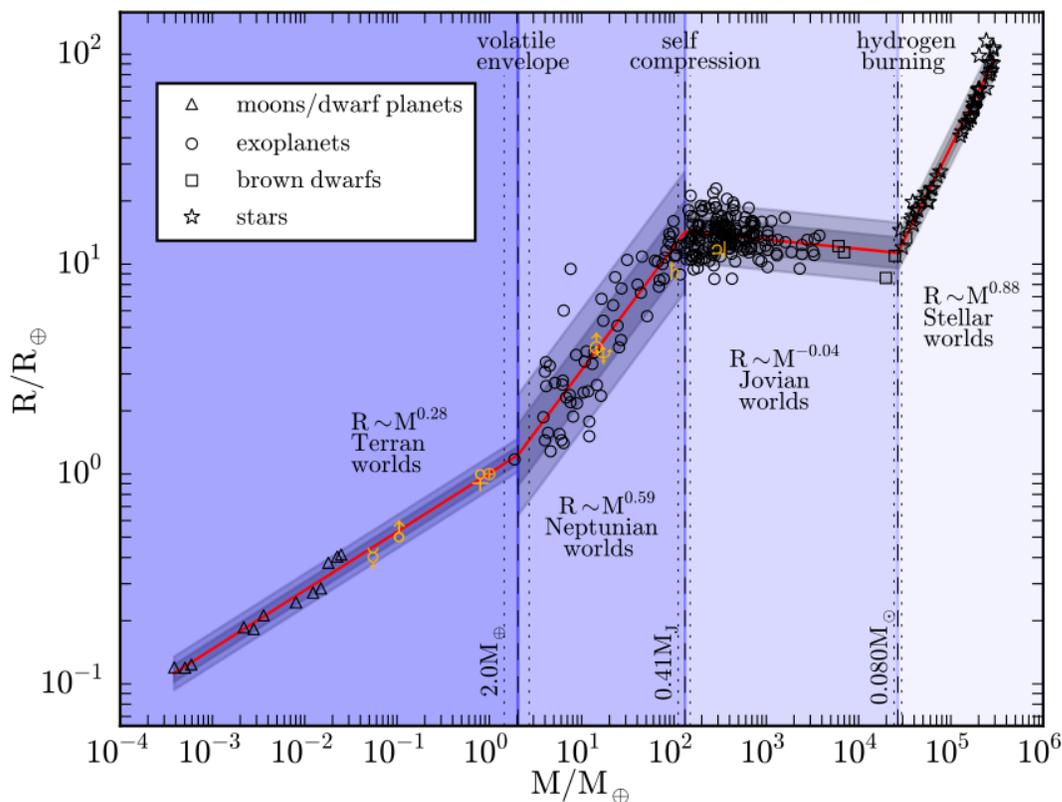


Figura 1.5: Diagramma massa-raggio in scala logaritmica dai pianeti nani fino alle stelle dei primi tipi spettrali. La linea rossa mostra il modello probabilistico elaborato, mentre le aree in grigio chiaro e scuro indicano gli intervalli di affidabilità, rispettivamente del 68% e del 95%. Vengono riportati anche i pianeti del Sistema Solare, indicati tramite i relativi simboli astronomici. Immagine tratta da Chen & Kipping (2016).

3. $0.08 M_{\odot}$; è la massa minima necessaria ad accendere il bruciamento term nucleare dell'idrogeno e rappresenta quindi il passaggio da nana bruna a stella. Queste ultime vengono, nella Figura 1.5, considerate parte della classe planetaria. È interessante notare che tale quantità, prevista dai modelli teorici di evoluzione stellare, è perfettamente in accordo con le stime date dalle leggi di potenza elaborate; il programma che ha calcolato tali relazioni non aveva alcun limite di transizione pre-impostato.

1.2.2 Relazioni teoriche

Esistono diversi studi puramente teorici (Valencia et al. 2006, Fortney et al. 2007, Seager et al. 2007, Zeng & Sasselov 2013 per citarne alcuni) che hanno lo scopo di fornire una relazione tra massa e raggio: essi si basano sull'analisi dell'equazione di stato (Equation Of State, EOS) dei diversi materiali che si suppongono essere alla base della composizione chimica dei pianeti, in varie percentuali.

A causa del punto di transizione a circa $32 M_{\oplus}$ tra i pianeti di tipo roccioso ed i pianeti gassosi precedentemente esposta, è preferibile utilizzare due relazioni differenti nel caso in cui si voglia sovrapporre la curva teorica ai dati osservativi per un confronto.

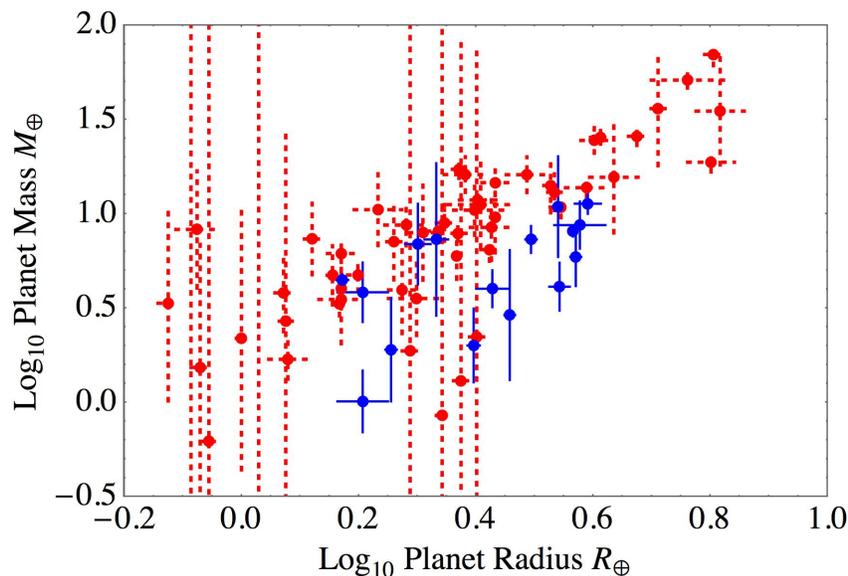


Figura 1.6: I punti blu rappresentano i pianeti con massa misurata tramite TTVs, mentre quelli in rosso sono misure di RV secondo lo studio di Wolfgang et al. (2015). Grafico tratto da Steffen (2015).

In questo elaborato, per quanto riguarda i pianeti di tipo roccioso, la curva teorica utilizzata è quella proposta dal modello di Zeng et al. (2016), i cui dati sono riportati in Tabella 4.4 in Appendice A. Tale lavoro si differenzia dai precedenti in quanto non crea un modello utilizzando semplicemente l'EOS di minerali e metalli, bensì deriva un'equazione di stato semi-empirica basata su un modello sismico dettagliato della Terra (PREM). La relazione massa-raggio viene derivata per un modello semplificato di pianeta diviso in due strati solidi (si veda Zeng et al. 2016).

Lo studio di Fortney et al. (2007) fornisce la previsione del raggio di un pianeta gigante gassoso in base alla massa, utilizzando l'EOS di una sfera di puro H/He. La distanza dalla stella, e quindi il contributo dell'irraggiamento (da 0.02 AU a 9.5 AU), la massa del nucleo centrale (da $10 M_{\oplus}$ a $100 M_{\oplus}$) e l'età del pianeta (da 1 Myr a 10 Gyr) vengono considerati nel calcolo, fornendo il valore del raggio al variare di tali parametri. Le tabelle rintracciabili al sito <http://www.ucolick.org/~jfortney/models.htm> sono state interpolate dai modelli di evoluzione termica dei pianeti giganti elaborati nello studio. Per realizzare le curve teoriche, sono stati utilizzati i valori di raggio e massa per pianeti situati a 0.045 AU e con un nucleo centrale costituito da ghiaccio e roccia di $10 M_{\oplus}$, situazione tipica per un generico pianeta di tipo “hot Jupiter”¹, a diverse età: 0.316 Gyr, 1 Gyr, 3.1623 Gyr e 10 Gyr. Vengono utilizzate anche le curve elaborate per pianeti con semiasse maggiore $a = 0.02$ AU ed $a = 0.045$ AU ed età $t = 3.1623$ Gyr, situazione valida per la maggior parte del campione, al variare della massa del nucleo centrale solido: $M_{core} = 10 M_{\oplus}$, $M_{core} = 25 M_{\oplus}$, $M_{core} = 50 M_{\oplus}$, $M_{core} = 100 M_{\oplus}$ ed in assenza di nucleo. Le tabelle contenenti i dati sono riportate in Appendice A.

1.2.3 RV e TTVs: differenti sensibilità nella distribuzione massa-raggio

Il metodo delle velocità radiali (RV) e quello della variazione dei tempi di transito (TTVs) sono i due principali utilizzati per determinare la massa dei pianeti extrasolari. Entrambi si

¹Un pianeta gigante gassoso con semiasse maggiore $a < 0.1$ AU è detto hot Jupiter.

basano sul principio fisico dell'interazione dinamica gravitazionale. Con l'aumento dei pianeti scoperti dal satellite *Kepler* è risultata tuttavia una discrepanza tra i due metodi, come mostra la Figura 1.6: i pianeti misurati tramite TTVs presentano, a parità di raggio, una densità in media inferiore rispetto a quelli determinati tramite RV. Lo studio di Steffen (2015) mostra, attraverso simulazioni Monte Carlo, come le due tecniche risultino essere diversamente sensibili al variare delle caratteristiche fisiche dei pianeti osservati, portando così ad un bias nelle osservazioni: i due metodi tendono pertanto a misurare masse situate in aree diverse del diagramma massa-raggio e con diversi periodi orbitali e livelli di irraggiamento.

Dai risultati delle simulazioni risulta che il metodo delle RV tende ad individuare pianeti di massa più elevata, mentre la sensibilità dei TTVs si presenta più uniforme: ad un dato raggio il metodo dei TTVs può determinare un intervallo in massa molto più ampio rispetto alle misure di RV (Figura 1.7), soprattutto per quanto riguarda i pianeti di piccolo raggio ($R < 2 R_{\oplus}$). Il grado di completezza per i pianeti di massa superiore a $\sim 15 M_{\oplus}$ è circa dell'80% e scende di più di un ordine di grandezza per $M < 5 M_{\oplus}$.

Uno dei motivi che può in parte spiegare tale effetto è la diversa dipendenza del rapporto segnale-rumore (SNR) dalle caratteristiche fisiche dei pianeti:

$$SNR_{RV} \sim \frac{M_p}{\sigma_{RV} P^{1/3}} \quad SNR_{TTV} \sim \frac{M_p R_p^{2/3} P^{5/6}}{\sigma_{TTV}}$$

dove M_p ed R_p sono rispettivamente massa e raggio planetario, P è il periodo orbitale, σ_{RV} è il rumore nelle misure di RV e σ_{TTV} è una quantità che include l'incertezza del tempo di transito, tutti i fattori che riguardano la stella e gli effetti sistematici prodotti dagli strumenti. Con la tecnica dei TTVs un raggio maggiore o un periodo orbitale più lungo favoriscono la misura di masse inferiori, mentre con le RV, a causa della diversa dipendenza del SNR dal periodo orbitale, per una data massa i pianeti rivelabili avranno sistematicamente orbite più corte.

Nel caso di architetture dinamiche peculiari, è quindi possibile che una descrizione del sistema sia irrealizzabile utilizzando uno solo dei due metodi; ad esempio nel caso di orbite inclinate mutuamente, le misure di TTV possono risultare problematiche e sarà necessario lo studio anche delle RV per caratterizzare il sistema. Un secondo caso è quello di un sistema planetario con densità molto basse e quindi difficilmente misurabili tramite RV, che però potrebbero avere un segnale TTV più evidente.

In realtà esistono diversi altri fattori che possono portare alla differenza nelle densità misurate, tra cui ad esempio la correlazione tra il raggio del pianeta ed il flusso ricevuto dalla stella ospitante: i pianeti di piccola massa orbitanti molto vicino alla propria stella e pertanto più facilmente rilevabili tramite RV subiscono un maggior irraggiamento, con conseguente perdita di atmosfera e mostrano così una densità più elevata. Un ulteriore motivo potrebbe essere la potenziale relazione tra le proprietà fisiche del pianeta e la probabilità che esso si trovi in prossimità di una MMR, Mean Motion Resonance (si veda Chen & Kipping 2016).

Alla luce di tali conclusioni è consigliabile l'utilizzo di entrambe le tecniche, in quanto complementari e sinergiche. Uno studio eseguito utilizzando entrambi i metodi è l'unico in grado di fornire misure complete ed attendibili per determinare le proprietà degli esopianeti e la loro frequenza statistica, spaziando attraverso l'architettura dei diversi sistemi osservabili.

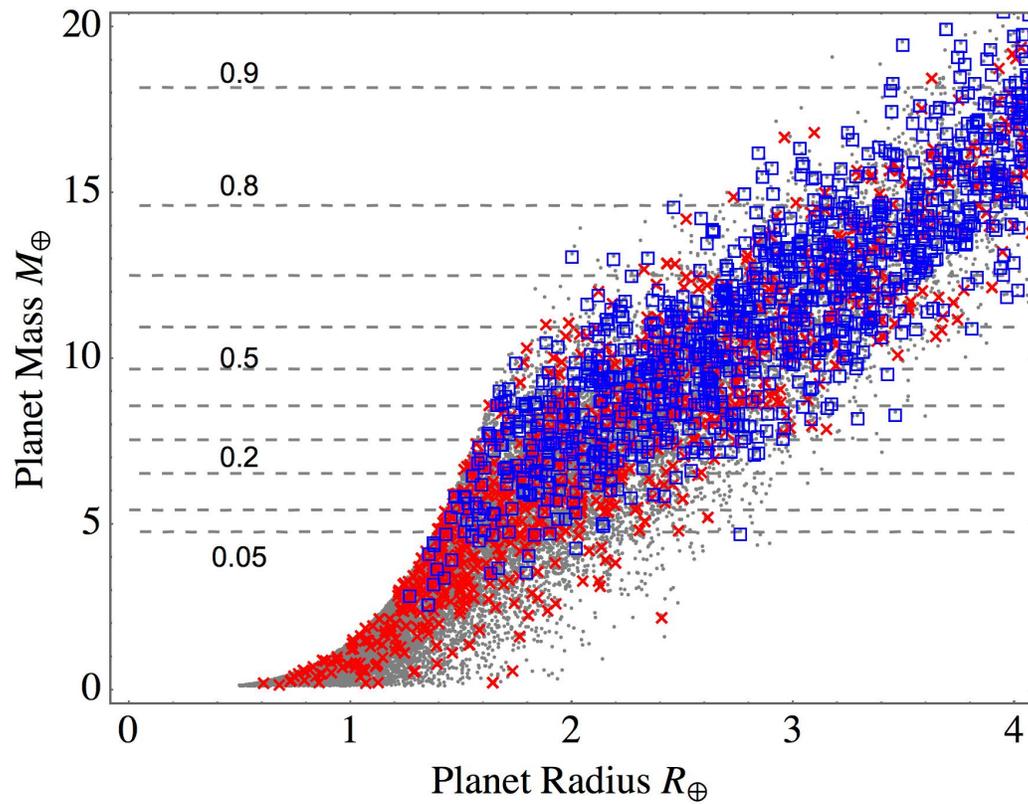


Figura 1.7: Massa e raggio di tutti i pianeti simulati da J.H. Steffen (punti grigi) ed un sottoinsieme arbitrario, scelto per semplicità di lettura, di pianeti individuati tramite TTVs (croci rosse) ed RV (quadrati blu). Si vede come il campione RV tende a favorire masse più elevate, mentre i TTVs risultano sensibili a masse inferiori per pianeti della stessa dimensione. Immagine tratta da Steffen (2015).

Capitolo 2

Selezione del campione

2.1 Cataloghi: dati a disposizione e relative caratteristiche

La principale fonte su cui sono state basate le analisi statistiche del capitolo 3 è il catalogo *The Exoplanet Archive*, fondato dal progetto “Exoplanet Exploration Program” della NASA e amministrato dal “Jet Propulsion Laboratory”, California Institute of Technology. Esso è rintracciabile al sito <http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>, mentre la documentazione aggiornata è disponibile al sito <http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/documentation.html>.

Il catalogo riporta tabelle interattive contenenti le proprietà di tutti i sistemi planetari, gli esopianeti ad oggi confermati ed i candidati pianeti individuati dal telescopio spaziale *Kepler*, includendo parametri stellari, spettri, misure delle velocità radiali, analisi dei transiti e curve di luce ricavate dalle survey effettuate sia da terra sia dalle missioni spaziali. Il catalogo della NASA permette di avere a disposizione informazioni riguardanti ogni esopianeta finora studiato ed è quindi utile nel caso si vogliano effettuare analisi su un campione più vasto possibile. L’obiettivo è quello di riportare per ogni pianeta tutte le quantità utili con relativo errore. Molti dei pianeti inseriti nel catalogo vengono identificati tramite il nome della stella ospitante –ad esempio utilizzando i nomi dei cataloghi stellari come *HD* (*Henry Draper*), *HIP* (*Hipparcos*) o *GJ* (*Gliese*)– seguito da una lettera minuscola a partire dalla *b* e procedendo in ordine di scoperta, nel caso di un sistema planetario; il primo pianeta scoperto viene denotato con la *b*, il secondo con la *c*, etc. La maggior parte degli esopianeti è stata individuata tramite progetti specificatamente dedicati alla loro ricerca ed essi vengono pertanto denotati tramite il nome del progetto, seguito dal numero di scoperta e dalla lettera minuscola come nel caso precedente. Si riportano in seguito i principali progetti dedicati alla ricerca ed allo studio degli esopianeti:

HAT. Il progetto Hungarian Automated Telescope, nato come singolo telescopio nel 2003, è oggi diventato HATNet, una rete composta da 6 telescopi posti nell’emisfero boreale (4 in Arizona e 2 a Mauna Kea) ed altrettanti nell’emisfero australe (divisi tra Cile, Australia e Namibia). La rete permette di monitorare in modo continuo i 128° quadrati di campo coperti, cercando segnali di transito (Bakos et al. 2004, 2009).

OGLE. Nel 2001 iniziò a Las Campanas, con il telescopio di 1.3m, la ricerca di transiti di pianeti extrasolari nell’ambito nel progetto OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment). Seguì una serie di 6 campagne di monitoraggio di 3 diversi campi del

centro galattico, i cui candidati pianeti furono sottoposti a successive misure di velocità radiali per ottenere la conferma (Udalsky et al. 2003, 2007).

SWEEPS. Sagittarius Window Eclipsing Extrasolar Planet Search è una survey che ha utilizzato nel 2006 la telecamera a bordo di HST (Advanced Camera for Surveys) per osservare attraverso la finestra del Sagittario I (regione con basso contenuto di polveri rispetto alle aree circostanti) in direzione del bulge galattico, cercando segnali di transito intorno a stelle di tipo spettrale dalla F alla M. Essendo una regione estremamente ricca di stelle e piuttosto lontana, i risultati sono incerti e di difficile interpretazione (Sahu et al. 2007).

TReS. La rete TReS (Trans-Atlantic Exoplanet Survey), oggi non più attiva, utilizzava 3 telescopi (Sleuth sul Monte Palomar, STARE alle Canarie e PSST in Arizona) con piccola apertura (0.1 m) e grande campo (6° quadrati), con una risoluzione angolare di 11 arcsec/px. Le immagini venivano acquisite ogni 2 minuti, osservando in modo continuo per circa 2 mesi lo stesso campo di cielo (Alonso et al. 2002).

WASP. Il progetto, in origine WASP ed oggi SuperWASP, (Wide Angle Search for Planet) prevede l'utilizzo di due telescopi attivi dal 2006, posti uno sull'isola di La Palma (Canarie) ed uno a Southerland (Sud Africa), entrambi con un campo di vista di $15^\circ \times 30^\circ$. Sono previste visite di almeno 4 ore a notte per un dato campo e solo nei primi 6 mesi sono state estratte più di 6.7 milioni di curve di luce (Collier-Cameron et al. 2009).

XO. Dedicato alla ricerca di esopianeti orbitanti stelle brillanti ($V < 12$ mag), il telescopio ad Haleakala (Maui) ha un campo di $7^\circ \times 7^\circ$, che gli ha permesso di ottenere anche solo nel primo anno di osservazioni (2003) la fotometria di oltre 100000 stelle (McCullough et al. 2005). La survey oggi è terminata.

CoRoT. Satellite francese, è stato il primo ad essere lanciato nello spazio da una collaborazione internazionale con l'intento di studiare l'astrosismologia e rilevare il transito di esopianeti (CONvection ROTation et Transits planétaires). È un telescopio Schmidt con diametro effettivo di 0.27 m e campo di vista di $2.7^\circ \times 3^\circ$, rimasto attivo dal 2006 al 2013; posto in un'orbita a circa 900 km di altezza, osservando in direzione perpendicolare al piano orbitale poteva raccogliere dati per 150 giorni consecutivi, preferenzialmente di oggetti in direzione del centro galattico e nella direzione esattamente opposta, verso l'anti-centro, in modo da evitare che il Sole entrasse nel campo di vista (Auvergne et al. 2009). Con una sola posa potevano essere osservati più di 12000 oggetti contemporaneamente e, grazie ad un prisma a dispersione, per le stelle più brillanti è stato possibile ottenere i dati in 3 canali fotometrici (rosso, verde, blu).

KEPLER. Satellite della NASA lanciato nello spazio nel 2009, viaggia su un'orbita eliocentrica ed ha fornito e continua a fornire (grazie alla nuova missione *K2*) un numero elevatissimo di curve di luce identificanti possibili candidati pianeti (più di 4690 fino ad agosto 2016). Ad oggi, è il mezzo più importante per la ricerca dei transiti dei pianeti extrasolari: l'obiettivo primario è quello di individuare pianeti di tipo terrestre localizzati nella zona abitabile. È un telescopio Schmidt con apertura 0.95 m e campo di vista di 115° quadrati, che opera nell'intervallo di lunghezze d'onda tra 430 nm e 890 nm; si concentra sullo studio di 150000 stelle di sequenza principale della regione del Cigno e della Lira (Borucki et al. 2010, Koch et al. 2010). Grazie a *Kepler* è stato possibile individuare svariati pianeti di tipo nettuniano, super-Terre e perfino pianeti con raggio

minore di quello terrestre, pur in questo caso con barre d'errore piuttosto elevate. La perdita di due motori nel 2013 ha messo fine all'estensione della missione. Nel 2014 è iniziata tuttavia la nuova missione *K2*, con durata prevista di circa 4 anni: essa ha permesso di continuare le osservazioni fotometriche dallo spazio tramite la strumentazione del satellite *Kepler*. Osservando campi di cielo prossimi al piano eclittico tramite una serie di "Campagne" di circa 80 giorni ciascuna, le manovre di puntamento necessarie possono essere effettuate anche solo con i due motori rimanenti, permettendo l'acquisizione continua di nuove curve di luce. Tra gli scopi della missione rientrano inoltre la determinazione della presenza di pianeti di tipo hot Jupiters orbitanti stelle giovani, lo studio della struttura interna degli astri tramite l'astrosismologia e l'individuazione dei progenitori delle supernovae di tipo Ia (si veda il sito <https://keplerscience.arc.nasa.gov>).

HARPS. Dedicato allo studio delle velocità radiali, HARPS (High Accuracy Radial Velocity Planet Searcher) è uno spettrografo échelle, con $R=115000$, che opera a lunghezze d'onda comprese tra 378 nm e 961 nm ed è stato installato nel 2003 sul telescopio ESO di 3.58 m a La Silla, Cile. È stato costruito per poter raggiungere una precisione di 1 m s^{-1} , anche se in condizioni ottimali è stato ottenuto un errore di soli 0.2 m s^{-1} (Pepe & Lovis 2008). Una copia di HARPS (HARPS-North) è oggi collocata al telescopio italiano TNG di 3.6 m a La Palma, nelle isole Canarie (<http://www.tng.iac.es/instruments/harps/>). Per la ricerca di pianeti tramite le RV, HARPS è uno dei principali strumenti (oltre ai precedenti CORALIE ed ELODIE) utilizzati per confermare la validità di un transito.

Non è ancora stato possibile studiare in dettaglio ogni pianeta scoperto, in quanto la branca dell'astronomia che si occupa di esopianeti si è sviluppata in tempi relativamente recenti ed è ancora in piena evoluzione. La maggior parte delle colonne del catalogo risulta quindi essere vuota, mancando a volte perfino informazioni essenziali come la massa o il raggio del pianeta. A questo si aggiunge un ulteriore problema: le informazioni inserite nel catalogo vengono estratte dall'articolo di scoperta, o da successivi studi più dettagliati, senza effettuare un controllo di compatibilità tra i diversi metodi utilizzati per lo studio del pianeta, senza un confronto critico ed analisi approfondite dell'articolo utilizzato. Ciò comporta una possibile discrepanza tra i dati inseriti per i diversi pianeti, in quanto metodi diversi sono affetti da errori e bias diversi e possono portare quindi a risultati differenti, se non addirittura incompatibili. Le informazioni sono quindi da utilizzare con la consapevolezza che per un'analisi dettagliata e completa sono necessari un approfondimento ed un controllo ulteriore su di esse, oltre a tenere in considerazione che eventuali incongruenze potrebbero essere riconducibili proprio alle sopracitate cause.

Per poter raggiungere una solida conoscenza della fisica e dell'evoluzione degli esopianeti si sta lavorando per aumentare la dimensione del campione e contemporaneamente la sua precisione, con l'obiettivo di poter avere a disposizione informazioni coerenti e complete per una solida analisi statistica (si veda la sezione 4.3 per la descrizione delle future missioni).

2.2 Criteri di selezione e suddivisione del campione

Per questo lavoro è stato utilizzato come punto di partenza il catalogo della NASA degli esopianeti confermati in data 01/04/2016, per un totale di 1963 oggetti. Una prima selezione è stata fatta per eliminare tutti i pianeti che non possiedono una misura di transito: per lo studio che ci si propone di effettuare è necessario che il raggio del pianeta sia noto ed in assenza

di un transito tale informazione non risulta reperibile. Il campione è stato in seguito suddiviso in pianeti il cui transito è stato scoperto tramite il satellite *Kepler* e quelli individuati grazie a progetti differenti; per restringere ulteriormente la prima tipologia di pianeti, la condizione imposta è che i pianeti scoperti da *Kepler* avessero, oltre al raggio con relativo errore, massa planetaria e temperatura della stella ospitante note. Da tale selezione sono risultati:

- 144 pianeti scoperti da *Kepler*, che denomineremo per semplicità “pianeti Kepler”
- 240 pianeti scoperti da progetti differenti, che denomineremo per semplicità “pianeti non Kepler”

Sui pianeti Kepler è stata effettuata una successiva divisione:

- Pianeti la cui massa è stata misurata solamente tramite il metodo delle RV
- Pianeti la cui massa è stata misurata solamente tramite TTVs.
- Pianeti la cui massa è stata misurata in entrambi i modi

Tale suddivisione verrà utilizzata in seguito per evidenziare eventuali differenze tra i diagrammi massa-raggio relativi ai due metodi, sia tra di essi (si veda sezione 3.4), sia tra essi ed i pianeti non Kepler.

Sono state eliminate le colonne superflue, mantenendo solamente le quantità utili allo studio:

- Nome del sistema
- Coordinate (RA, Dec)
- Massa e relativi errori (in unità gioviane)
- Raggio e relativi errori (in unità gioviane)
- Periodo orbitale (in giorni terrestri)
- Semiasse maggiore (in AU)
- Temperatura efficace della stella ospitante (in Kelvin)
- Raggio stellare (in unità solari)
- Magnitudine stellare in banda V
- Metodo di scoperta
- Articoli di scoperta e di referenza

2.3 Completamento del campione

Per i motivi esposti in sezione 2.1, per molti pianeti varie quantità non erano presenti nella tabella originale. Si è proceduto quindi al completamento del campione, ricercando i dati mancanti negli articoli di riferimento o direttamente in tutti gli articoli riguardanti un determinato pianeta, utilizzando l'archivio SAO/NASA ADS (<http://adsabs.harvard.edu/abstractservice.html>). A seguito di tale ricerca il campione, oltre ad essere stato completato, è stato ulteriormente ridotto in quanto alcuni pianeti sono risultati essere inadeguati ai fini dello studio:

- Per quanto riguarda i pianeti **non Kepler**, sono stati scartati dal campione (I) 30 Ari b, in quanto pianeta non transitante, (II) SWEEPS-11 b e SWEEPS-4b perchè i dati di questa survey risultano poco affidabili e (III) PH2b in quanto non riporta misure di RV.

Ci sono 10 pianeti senza errori su massa e raggio specificati. I pianeti per cui esiste in letteratura solamente un limite superiore alla massa sono stati eliminati (PH1b, WASP-47e, HAT-P-57b).

Moutou et al. (2014) riportano solamente un limite superiore in massa per il pianeta Corot-22b, perciò il pianeta è stato scartato dal campione.

Per WASP-33b sono stati utilizzati massa e raggio riportati nell'articolo di Smith et al. (2011), in quanto affetti dall'indeterminazione maggiore, dopo un confronto con i dati di Collier-Cameron (2010) e Kovacs et al. (2013).

La massa con errori di Corot-24b è stata reperita dall'articolo di Lammer et al. (2016), dove è stabilito un limite inferiore oltre a quello superiore precedentemente noto: si prende come valore da inserire nella tabella la semi-ampiezza dell'intervallo determinato ed è usato per coerenza anche il valore del raggio dato dallo stesso articolo.

Si sono cercate le quantità mancanti negli articoli di riferimento riportati nella colonna “*pl_def_refname*” del catalogo: la massa del pianeta (per HD-189733b, HD-219134b, HAT-P-32b, HD-209458b, OGLE-TR-111b), il raggio del pianeta (per HD-189733b, HD-219134b), il semiasse maggiore (per Corot-1b, Corot-3b, GJ-1132b, HAT-P-13b, HD-149026b, HD-189733b, HD-209458b, WASP-4b, WASP-47b, WASP-47d, XO-4b), la temperatura effettiva della stella (per GJ-436b, HD-209458b, Qatar-1b, WASP-1b), il raggio stellare (per WASP-100b) ed il periodo orbitale (per 55 Cnc e).

- Per quanto riguarda i **pianeti Kepler**, inizialmente non era riportato il valore del semiasse maggiore dell'orbita per 66 di essi. Alcuni di questi valori (Tabella 2.1) sono stati reperiti dall'articolo di riferimento; i rimanenti (Tabella 2.2) sono stati ricavati in parte dall'articolo di Wang et al. (2014) ed in parte da quello di Batalha et al. (2013), entrambi lavori riguardanti la convalida di un numero elevato di candidati kepleriani, riportati pertanto con il nome del catalogo KOI (Kepler Object of Interest). Per 3 pianeti (Kepler-238f, Kepler-279d e Kepler-328d, riportati nell'articolo di Xie et al. 2014) non è stato possibile reperire alcun valore del semiasse maggiore, pertanto essi sono stati scartati dal campione.

Il campione finale che verrà utilizzato per lo studio comprende:

- 232 pianeti non Kepler
- 131 pianeti Kepler

Gli esopianeti selezionati sono riportati nelle Tabelle 4.2 ed 4.3 in Appendice A.

Pianeta	a	Articolo
Kepler-10c	0.241	Dumusque et al. (2014)
Kepler-14b	0.0782	Buchhave et al. (2011)
Kepler-78b	0.0089	Pepe et al. (2013)
Kepler-102b	0.055	Wang et al. (2014)
Kepler-102d	0.086	Wang et al. (2014)
Kepler-102e	0.117	Wang et al. (2014)
Kepler-102f	0.166	Wang et al. (2014)

Tabella 2.1: Valori del semiasse maggiore a reperiti dall'articolo di referenza.

Wang et al. (2014)			Batalha et al. (2013)		
Catalogo Kepler	Catalogo KOI	a	Catalogo Kepler	Catalogo KOI	a
100b	041.02	0.076	94b	104.01	0.034
100c	041.01	0.114	95b	122.01	0.102
103b	108	0.128	96b	261.01	0.123
103c	108	0.647	97b	292.01	0.036
106b	123	0.065	98b	299.01	0.026
106c	123	0.065	99b	305.01	0.050
106e	123	0.110	114c	156.01	0.070
113b	153	0.050	144d	156.03	0.090
128b	274	0.127	122f	233.05	0.287
128c	274	0.167	177b	523.02	0.220
131b	283	0.125	177c	523.01	0.268
131c	283	0.170	238e	834.02	0.162
138b	314	0.079	276c	1203	0.200
138c	314	0.105	276d	1203.03	0.265
138d	314	0.134	279c	1236.01	0.219
145b	370	0.167	282d	1278.01	0.164
145c	370	0.254	282e	1278.02	0.241
227b	1215	0.137	305b	1536.01	0.055
227c	1215	0.213	305c	1536.02	0.073
338e	1930	0.089	307b	1576.01	0.091
396b	2672	0.231	307c	1576.02	0.106
396c	2672	0.374	328c	1873	0.348
406b	321	0.034	350c	2025.01	0.136
406c	321	0.053	350d	2025.02	0.176
048d	148	0.224	407c	1442	0.015
092b	285	0.118	408b	1612.01	0.036
092c	285	0.183	409b	1925.01	0.320

Tabella 2.2: Valori del semiasse maggiore a reperiti da Wang et al. (2014) e Batalha et al. (2013).

Capitolo 3

Analisi dei dati

3.1 Calcolo di irraggiamento, temperatura di equilibrio, segnale di trasmissione atmosferica e Jeans escape parameter

La quantità di radiazione stellare incidente sulla superficie di un pianeta è un parametro importante per lo studio dell'atmosfera e dell'evoluzione planetaria. Il profilo termico dell'atmosfera è fortemente modificato dagli effetti dell'irraggiamento: l'effetto principale prodotto è quello di ridurre drasticamente la perdita di calore dall'interno del pianeta. Ciò porta la contrazione gravitazionale a rallentare notevolmente rispetto a quella di un pianeta non irradiato; a causa del calore, inoltre, l'estensione dell'atmosfera può aumentare notevolmente e come risultato finale si avrà, a parità di età, un raggio più elevato rispetto a quello previsto dai modelli teorici, fino ad incrementi anche del 10% (si veda *Exoplanet* di S. Seager, parte III).

Un altro effetto possibile è la perdita di elementi leggeri a causa del forte vento stellare, nel caso di pianeti molto vicini alla stella ospitante, con conseguente diminuzione della densità.

Per il calcolo dell'irraggiamento è stata utilizzata la formula

$$I = \frac{(T_{\text{eff}})^4 R_{\star}^2}{a^2} \quad (3.1)$$

dove T_{eff} è la temperatura efficace della stella, R_{\star} il raggio stellare ed a il semiasse maggiore dell'orbita. Esso è normalizzato all'irraggiamento terrestre ($T_{\text{eff}\odot} = 5777 \text{ K}$, $R_{\star} = 1 R_{\odot}$, $a = 1 \text{ AU}$).

La legge di Stefan-Boltzmann può essere riscritta per calcolare la temperatura di equilibrio di un pianeta, che risulta dal bilancio tra la radiazione incidente proveniente dalla stella e quella assorbita dal pianeta o dalla sua atmosfera:

$$T_{\text{eq}} = T_{\text{eff}} \left(\frac{f R_{\star}}{a} \right)^{1/2} (1 - A_B)^{1/4} \quad (3.2)$$

dove T_{eff} è la temperatura effettiva della stella, R_{\star} il raggio stellare ed a il semiasse maggiore dell'orbita. La quantità A_B è il cosiddetto "albedo di Bond", ovvero una misura della riflettività del pianeta: è definito come il rapporto tra la radiazione totale incidente e quella riflessa. Viene ottenuto dall'albedo geometrico (ovvero il rapporto tra la luminosità di un corpo ad angolo di fase nullo e quella ideale di una superficie lambertiana di uguale sezione trasversale) facendo

una media pesata con lo spettro della sorgente che emette radiazione ed integrando su tutte le lunghezze d'onda:

$$A_B = \frac{\int_0^\infty A_{g,\lambda} I_{inc,\lambda} d\lambda}{\int_0^\infty I_{inc,\lambda} d\lambda} \quad (3.3)$$

dove l'indice λ è utilizzato per indicare quantità dipendenti dalla lunghezza d'onda. La quantità $(1-A_B)$ indica quindi la frazione di radiazione assorbita e può essere usata per fare una stima approssimativa della temperatura di equilibrio del pianeta. La quantità f è una misura del grado di efficienza della circolazione atmosferica e del grado in cui l'energia assorbita viene trasferita dal lato diurno (ovvero esposto direttamente alla radiazione) a quello notturno. Se posto uguale ad $1/4$, la riemissione è supposta essere isotropa e la temperatura di equilibrio è uniforme in entrambi gli emisferi; un valore di $1/2$ indica invece che il pianeta riemette solamente dal lato diurno e mostra quindi un valore della temperatura di equilibrio più elevato (mentre il lato notturno rimane freddo per l'assenza della circolazione atmosferica).

Nello studio si è posto $A_B = 0.3$, valore pari a quello terrestre ($A_{B\oplus} = 0.306$) e tipico anche per i pianeti come Giove ed i giganti gassosi (ad eccezione degli hot Jupiter, per i quali sembra assumere valori inferiori); si è posto inoltre $f = 1/4$, facendo quindi l'ipotesi di riemissione uniforme.

La formula 3.2 si basa sull'ipotesi semplificata che il pianeta non emetta una quantità significativa di radiazione e non possieda fonti interne di calore, come l'energia accumulata nel processo di formazione o contrazione, oppure quella proveniente dai decadimenti radioattivi o da forze mareali; inoltre essa non tiene conto del profilo di temperatura dell'atmosfera e fornisce solamente un valore medio. La prima assunzione è valida per pianeti di tipo roccioso, che hanno risorse di energia interna trascurabili, ma non è del tutto valida per i pianeti di tipo gassoso, per i quali la temperatura T_{eq} è in generale quindi una sottostima.

È necessario evidenziare come la temperatura così calcolata sia solamente una prima stima approssimativa, poichè vengono fatte delle assunzioni a priori che possono non essere valide per tutti i pianeti del campione; non essendo tuttavia possibile per ora ottenere dati più precisi in questo ambito (se non su un sottoinsieme molto piccolo di oggetti) tale stima di temperatura può fornire delle prime indicazioni interessanti sulle caratteristiche degli esopianeti.

Quando un pianeta transita dinanzi ad una stella, parte della luce emessa dall'astro viene intercettata dal sottile anello di atmosfera che circonda il bordo del pianeta: alle lunghezze d'onda dove l'atmosfera assorbe maggiormente la luce incidente, la profondità del transito aumenta. Ciò permette lo studio degli atomi e delle molecole assorbenti presenti nell'atmosfera tramite la spettroscopia di trasmissione (si veda *The Exoplanet Handbook*).

L'area dell'atmosfera intercettata è all'incirca un anello di dimensioni $\simeq 5H$, dove H è l'altezza di scala atmosferica ed è definita come:

$$H = \frac{k_B T}{\mu_m g_p} \quad (3.4)$$

dove k_B è la costante di Boltzmann, T la temperatura dell'atmosfera (T_{eq}), μ_m il peso molecolare medio ($\mu_m = 2$ per l'idrogeno) e g_p la gravità superficiale del pianeta.

Il contributo del segnale di trasmissione atmosferica è dato da

$$\delta \simeq 5 \left(\frac{2R_p H}{R_\star^2} \right) \quad (3.5)$$

3.1. CALCOLO DI IRRAGGIAMENTO, TEMPERATURA DI EQUILIBRIO, SEGNALE DI TRASMISSIONE

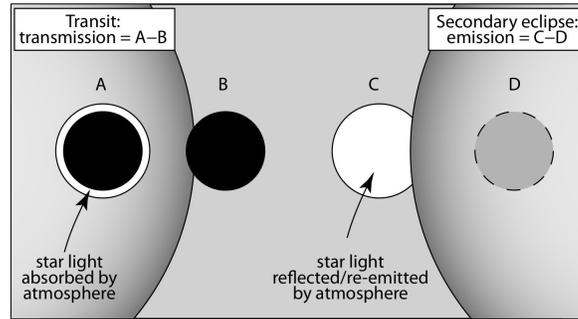


Figura 3.1: Geometria della spettroscopia di trasmissione (a sinistra) ed emissione (a destra). Durante il transit, parte della luce della stella passa attraverso l’atmosfera (anulare) del pianeta. Durante l’eclissi secondaria c’è una progressiva attenuazione, fino alla scomparsa, della luce riflessa o emessa dalla superficie corrispondente al lato diurno del pianeta. Immagine tratta da *The Exoplanet Handbook*.

Dal momento che δ è proporzionale al fattore di scala e pertanto $\delta \propto \mu_m^{-1}$, un’atmosfera dominata ad esempio da CO_2 , come quella di una ipotetica super-Terra, sarà più difficile da individuare rispetto ad una composta solamente da idrogeno.

La formula 3.5 viene utilizzata per il calcolo del segnale di trasmissione atmosferica del campione in analisi, a meno del fattore 5: considerare il quintuplo del fattore di scala potrebbe essere limitante, in quanto non tutti gli elementi chimici presenti nello spettro di trasmissione di un pianeta possono essere rilevati se si considera un valore così elevato (si veda Sing et al. 2016).

Si può applicare un semplice modello che permette di determinare, sotto opportune condizioni, se l’atmosfera di un pianeta è in equilibrio stabile su lunghi tempi scala oppure no. La quantità da calcolare è il cosiddetto Jeans escape parameter:

$$J = \frac{GM_p m_H}{k_B T_{\text{eq}} R_p} \quad (3.6)$$

dove G è la costante di gravitazione universale, M_p è la massa del pianeta, m_H è la massa dell’atomo di idrogeno, k_B è la costante di Boltzman, T_{eq} è la temperatura di equilibrio del pianeta e R_p è il raggio del pianeta. È interessante notare che J non dipende solamente da massa e raggio, ma anche dalla temperatura di equilibrio.

Se questo numero è minore di 20 sicuramente il pianeta non è stabile sui tempi scala delle tipiche età planetarie e quindi non può esistere; se è maggiore di 40 è stabile, mentre se è compreso tra 20 e 40 è necessario svolgere dei calcoli più approfonditi basati sulle caratteristiche del pianeta. Non è ancora stato elaborato un semplice criterio analitico per classificare la situazione in questo regime intermedio, anche se ci sono degli studi che procedono in tale direzione (Lammer et al. 2016).

L’analisi dei pianeti con valori $J < 20$ viene effettuata in sezione 4.1.4.

I valori ottenuti di irraggiamento, temperatura di equilibrio, segnale di trasmissione atmosferica e Jeans escape parameter vengono riportati, rispettivamente per i pianeti Kepler e non

Kepler, nelle Tabelle 4.2 e 4.3 in Appendice A.

Per l'analisi di dati, tabelle e grafici è stato utilizzato il programma Topcat (Tool for OPERations on Catalogues And Tables).

3.2 Confronto con il catalogo *TEPCat*

È stato effettuato un confronto con gli esopianeti riportati nel catalogo *TEPCat*. Esso è un catalogo delle proprietà fisiche dei pianeti extrasolari transitanti studiati in dettaglio, comprese alcune nane brune. Molti dei valori riportati sono frutto di un attento lavoro di ricerca nella letteratura effettuato da John Southworth; i rimanenti provengono dai cinque articoli *Homogeneous Studies of Transiting Extrasolar Planets* ad opera dello stesso autore. I dati sono reperibili al sito <http://www.astro.keele.ac.uk/jkt/tepcat/>.

Dalla tabella sono state selezionate alcune quantità aggiuntive rispetto a quelle raccolte in precedenza (si veda sezione 2.2):

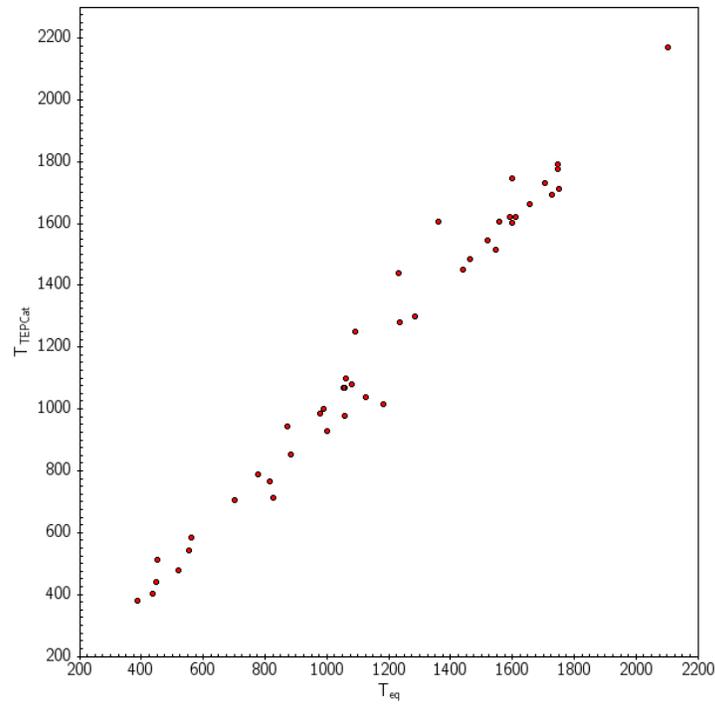
- Logaritmo della gravità superficiale stellare (unità *cgs*)
- Metallicità $[\text{Fe}/\text{H}]^1$
- Massa stellare (in unità solari)
- Temperatura di equilibrio del pianeta (in Kelvin)

Per quanto riguarda i pianeti non Kepler, solamente tre di essi non sono presenti nel catalogo *TEPCat*: HIP-116454b, KELT-14b, Lupus-TR-3b. I pianeti Kepler senza corrispettivo sono invece 27.

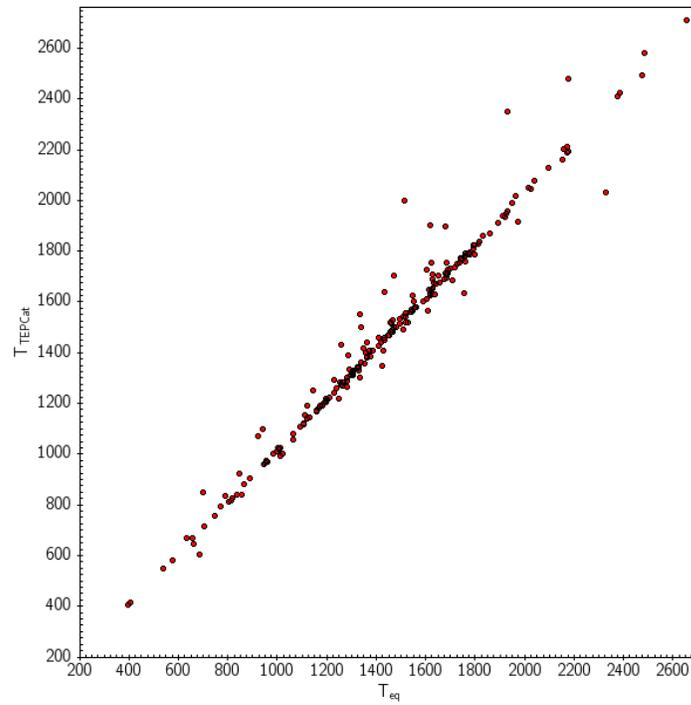
Nel caso in cui non ci fosse corrispondenza tra i pianeti del campione ed i pianeti di *TEPCat*, queste ulteriori quantità sono state reperite dagli articoli di riferimento. Esse serviranno in seguito per la costruzione dei diagrammi e per l'individuazione di pianeti peculiari.

La temperatura di equilibrio è stata selezionata per operare un confronto con quella calcolata tramite la formula 3.2. La relazione lineare che ci si aspetta è, in prima approssimazione, rispettata, come si può notare dalla Figura 3.2. Le discrepanze di alcuni valori sono dovute al fatto che autori diversi possono aver assunto ipotesi differenti sulle condizioni della circolazione atmosferica e sull'albedo dei pianeti, pertanto i valori reperiti da *TEPCat* potrebbero rivelarsi incompatibili con quelli calcolati per il campione in analisi. Bisogna inoltre considerare che quella in equazione 3.2 si tratta di una stima molto approssimativa della temperatura, con grandi possibilità di errore: si può affermare quindi che la maggior parte dei valori mostra un buon accordo, soprattutto per quanto riguarda i pianeti non Kepler. Dalla Figura 3.3 si nota infatti che per la maggior parte dei pianeti non Kepler la differenza ($T_{\text{eq}} - T_{\text{TEPCat}}$) assume valori molto prossimi allo zero, mentre i Kepler mostrano valori più dispersi. Le stelle che ospitano i pianeti non Kepler sono infatti studiate da molto più tempo: le temperature stellari sono state determinate in gran parte attraverso metodi spettroscopici, molto più precisi ed accurati rispetto a quelli fotometrici (indice di colore) utilizzati per le stelle analizzate da Kepler. Dal momento che nella formula 3.2 è presente la temperatura efficace della stella, ciò si ripercuote sulla precisione del calcolo della temperatura di equilibrio, portando ad una miglior corrispondenza per i pianeti non Kepler.

¹Nel caso in cui il valore $[\text{Fe}/\text{H}]$ non fosse reperibile si utilizza il valore $[\text{M}/\text{H}]$. La metallicità è espressa rapportata a quella solare in scala logaritmica.

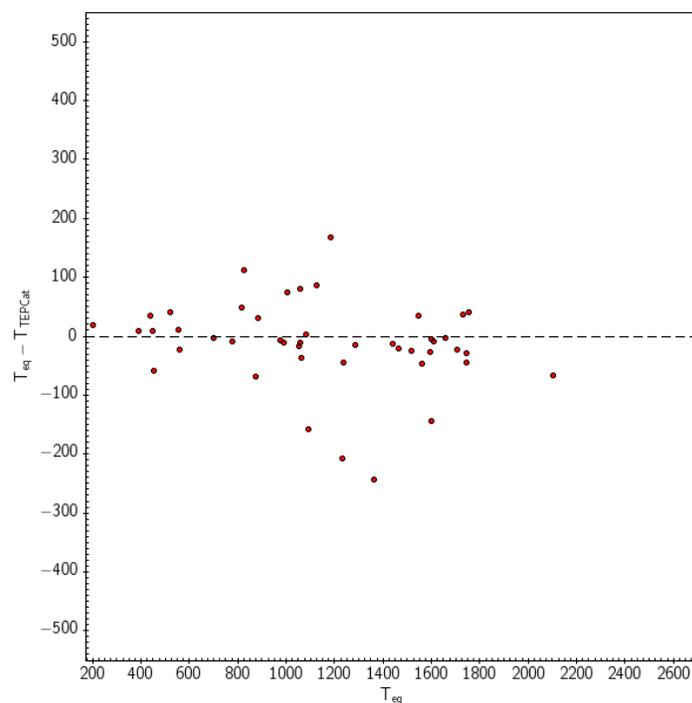


(a) Pianeti Kepler

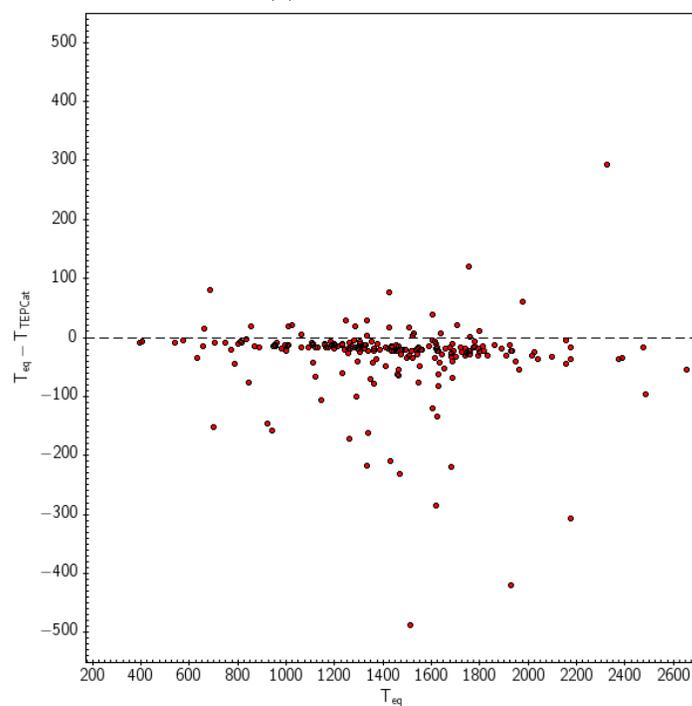


(b) Pianeti non Kepler

Figura 3.2: Confronto tra la temperatura di equilibrio calcolata (T_{eq}) e quella reperita dal catalogo TEPcat (T_{TEPCat}), espressa in Kelvin.



(a) Pianeti Kepler



(b) Pianeti non Kepler

Figura 3.3: Il grafico riporta la differenza tra la temperatura di equilibrio calcolata (T_{eq}) e quella reperita dal catalogo TEPcat, in funzione di T_{eq} (espressa in Kelvin).

3.3 Costruzione dei diagrammi

Abbiamo costruito tre diversi tipi di grafici:

1. Magnitudine visuale della stella in funzione del segnale di trasmissione atmosferica
2. Temperatura effettiva della stella in funzione del logaritmo della gravità superficiale
3. Raggio planetario in funzione della massa

I primi due grafici vengono elaborati per individuare i pianeti con caratteristiche peculiari da analizzare in modo più dettagliato, mentre il terzo riguarda in particolare lo studio della relazione massa-raggio.

3.3.1 Temperatura-Gravità

Il grafico in Figura 3.4 riporta in ascissa la temperatura efficace della stella ospitante in scala logaritmica (T_{eff}) ed in ordinata il logaritmo della gravità superficiale stellare $\log(g)$.

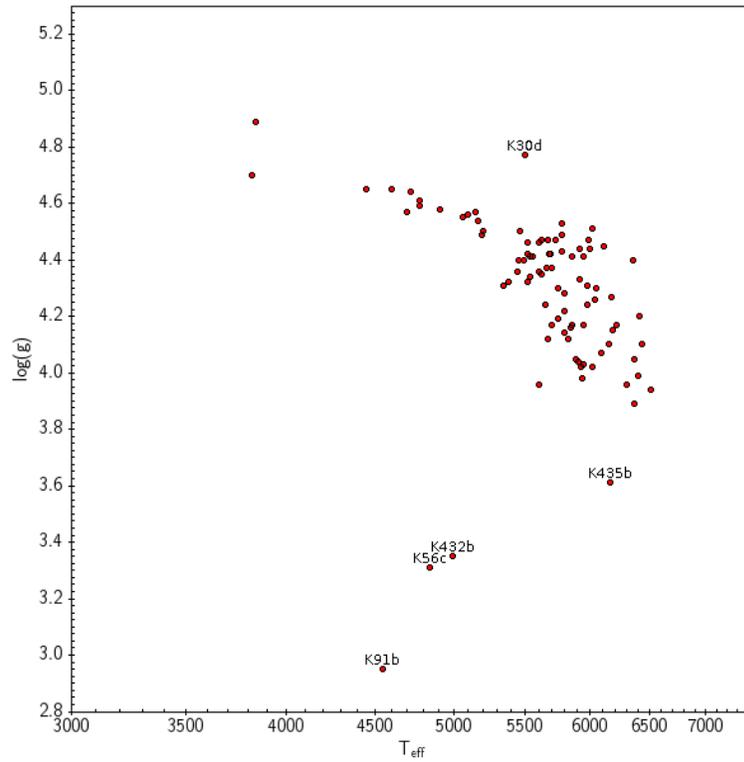
Esso viene utilizzato per valutare lo stato evolutivo delle stelle ospitanti: è possibile infatti evidenziare nel grafico la sequenza principale del diagramma HR, individuare le stelle non appartenenti ad essa e quindi in fasi più evolute. Esse sono di particolare interesse per lo studio dell'evoluzione planetaria. Sono di sicuro interesse scientifico le trasformazioni che i pianeti possono subire al variare dell'età e delle caratteristiche della propria stella, perchè possono aiutare capire se esista un processo evolutivo prevedibile e comune a tutti oppure se ogni pianeta segua una storia diversa in funzione di altre variabili esterne.

Non sono molti i casi di esopianeti orbitanti stelle non appartenenti alla sequenza principale, in quanto più difficili da individuare a causa dei cambiamenti e delle instabilità che la stella subisce. Essi sembrano mostrare caratteristiche differenti rispetto a quelli orbitanti stelle di sequenza principale. Secondo lo studio di Jones et al. (2014), essi sono più massicci, tendenzialmente con orbite poco eccentriche e semiasse maggiore superiore a 0.5 AU, con una grande concentrazione tra 0.5 e 0.9 AU. Nonostante le molte teorie proposte, il modo in cui i pianeti terminino la propria esistenza rimane ancora un'incognita a causa dell'assenza di una buona statistica.

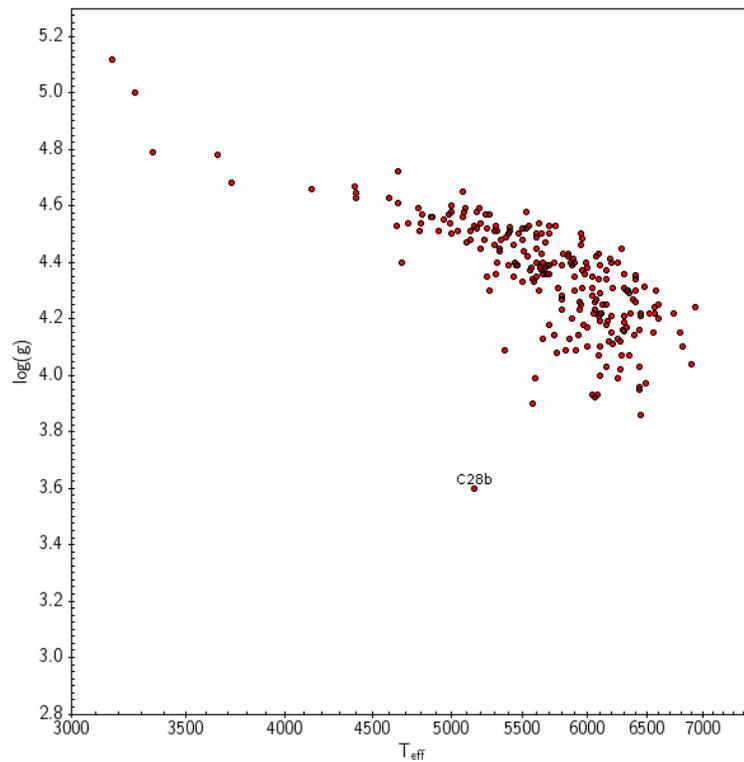
In Figura 3.4 si evidenziano diversi pianeti orbitanti stelle non appartenenti alla sequenza principale, riportati in Tabella 3.1. La loro descrizione viene riportata in sezione 4.1.1.

Pianeta	T_{eff}	$\log(g)$	R_{\star}
Corot-28b	5150	3.61	1.78
Kepler-91b	4550	2.95	6.3
Kepler-56b/c	4840	3.31	4.23
Kepler-432b	4995	3.35	4.87
Kepler-435b	6161	3.61	3.21
Kepler-30b/c/d	5498	4.77	0.95

Tabella 3.1: Pianeti non orbitanti una stella di sequenza principale. La temperatura effettiva della stella è espressa in Kelvin, il logaritmo della gravità superficiale in cm s^{-2} ed il raggio stellare in unità solari.

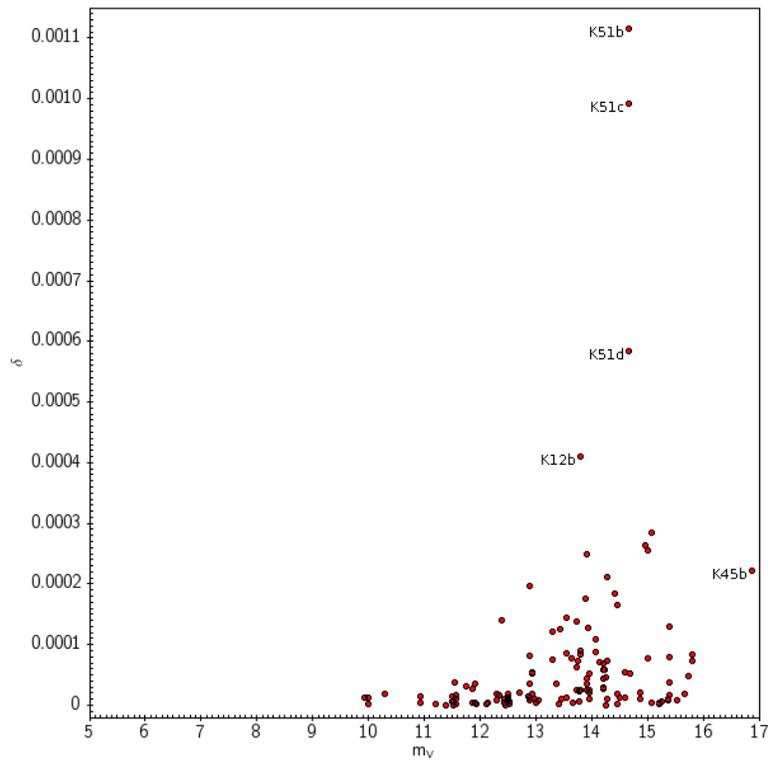


(a) Pianeti Kepler

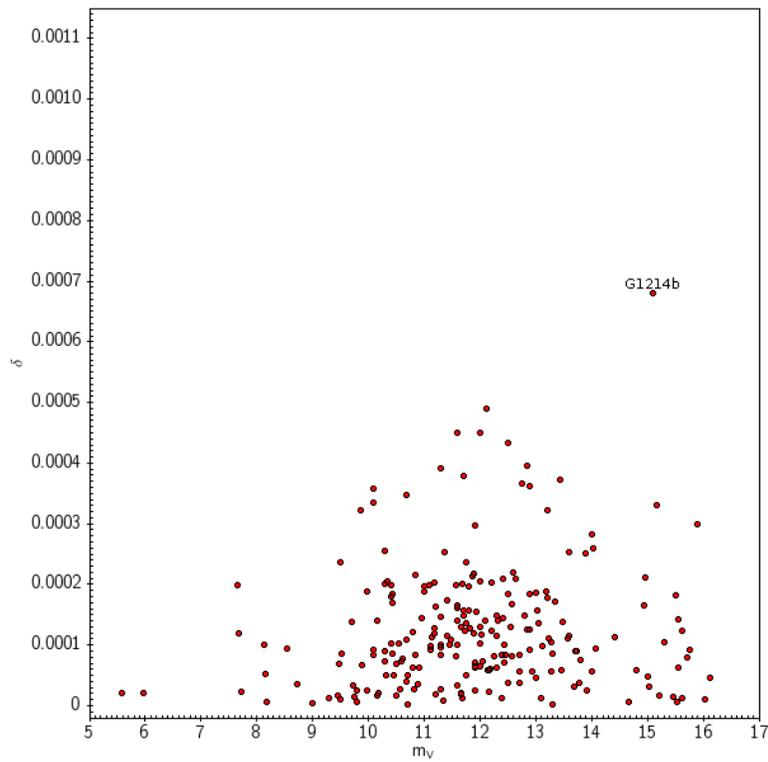


(b) Pianeti non Kepler

Figura 3.4: Grafico del logaritmo della gravità superficiale stellare, espressa in cm s^{-2} in funzione della temperatura efficace (Kelvin), riportata in scala logaritmica. Sono evidenziati i pianeti orbitanti stelle fuori dalla sequenza principale.



(a) Pianeti Kepler



(b) Pianeti non Kepler

Figura 3.5: Grafico del segnale di trasmissione atmosferica δ in funzione della magnitudine in banda V (m_V).

3.3.2 Magnitudine-Segnale di trasmissione atmosferica

Il grafico in Figura 3.5 riporta in ascissa la magnitudine apparente in banda V di Johnson² (m_V) ed in ordinata il segnale di trasmissione atmosferica (δ). A parità di segnale, gli oggetti più brillanti sono quelli di cui è più facile seguire il follow-up: un maggior numero di fotoni implica un miglior rapporto segnale-rumore e di conseguenza richiede un minor numero di transiti per lo studio del pianeta. Allo stesso modo, un pianeta con un segnale di trasmissione molto elevato sarà un buon candidato per lo studio dell'atmosfera attraverso la spettroscopia di trasmissione.

Dalla Figura 3.5 si nota che i pianeti non Kepler sono sistematicamente spostati verso magnitudini più basse, pertanto orbitano stelle apparentemente più brillanti. Questo si spiega considerando il fatto che *Kepler* ha monitorato un'area molto più piccola rispetto alle survey da Terra ($\sim 105 \text{ deg}^2$ contro 41253 deg^2 della sfera celeste): ha avuto quindi accesso a molte meno stelle brillanti di sequenza principale, le quali sono distribuite in modo all'incirca isotropo. L'analisi dei pianeti con valori anomali è posposta alla sezione 4.1.2.

3.3.3 Massa-Raggio

Per la discussione sull'importanza del diagramma massa-raggio si rimanda alla sezione 1.2.

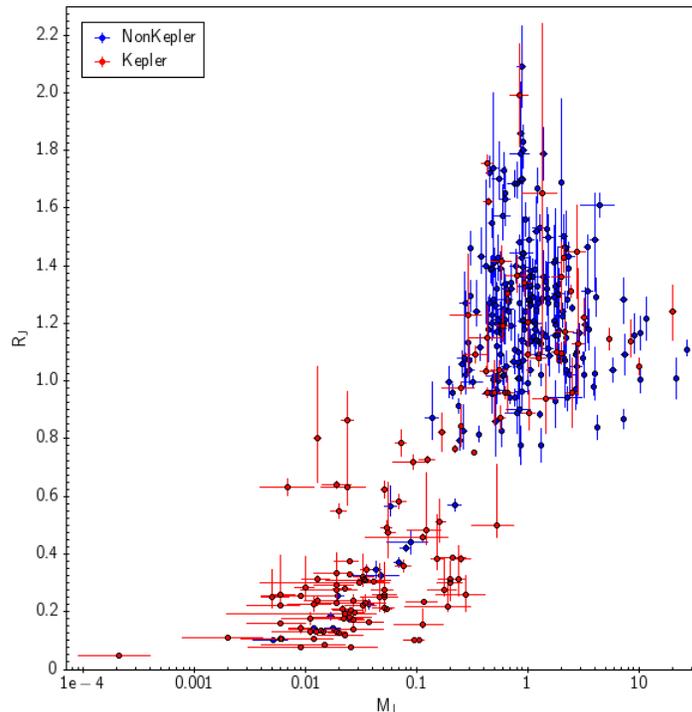


Figura 3.6: Grafico del raggio planetario in funzione della massa, riportata in scala logaritmica; entrambi sono espressi in unità gioviane. In rosso sono riportati i pianeti Kepler, in blu i non Kepler.

La Figura 3.6 riporta in ascissa i valori della massa, in scala logaritmica, ed in ordinata i valori del raggio dei pianeti: si può notare che, per valori di massa e raggio molto piccoli,

²Nel caso non fosse presente il valore in banda V si utilizza il valore della banda *Kepler* o della banda *Gaia*.

il numero dei pianeti Kepler è superiore rispetto a quello dei non Kepler: si evidenzia nuovamente come le osservazioni dallo spazio abbiano permesso di abbassare il limite di rivelabilità, introducendo la possibilità di analizzare molti pianeti di taglia sempre inferiore.

Vengono elaborati in seguito una serie di grafici riguardanti la relazione massa-raggio: i pianeti con caratteristiche anomale verranno descritti in sezione 4.1.3.

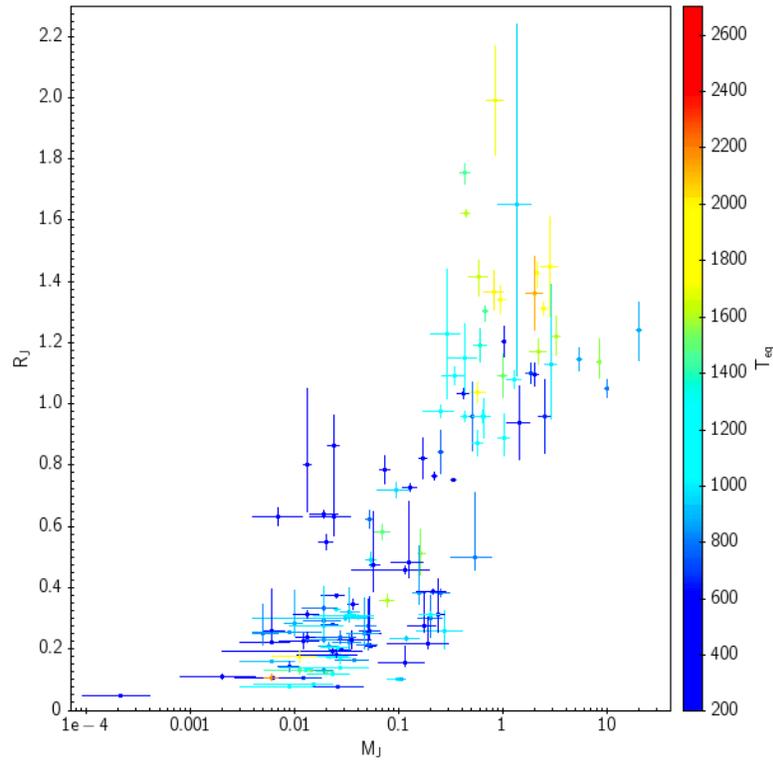
Si evidenzia subito (si veda in particolare la Figura 3.7a) un enorme errore nel raggio del pianeta Kepler 447b, orbitante una stella di classe G8 V: $R = 1.65^{+0.59}_{-0.56} R_J$. Dall'articolo di Lillo-Box et al. (2015) si evidenzia che il problema è dovuto alla breve durata del transito rispetto al campionamento temporale di *Kepler* ed al grande valore del parametro di impatto b . Il parametro di impatto è definito come la distanza espressa in raggi stellari tra i centri della stella e del pianeta al momento centrale del transito (si veda la Figura 1.3-B). Nel caso in cui $b = 1$ il transito avviene "radente", con il centro del pianeta che passa esattamente sul bordo della stella. Il parametro di impatto può assumere anche valori > 1 , come avviene per Kepler 447b ($b = 1.076$): in questo caso ottenere un valore attendibile del raggio è difficile e gli errori sono molto alti, in quanto non è facile capire se ciò che transita sia un pianeta molto piccolo oppure solo una parte di un pianeta più grande, che oscura la stella solo parzialmente.

Dalla Figura 3.7 è possibile notare, per entrambi i sotto-campioni, che la distribuzione dei pianeti non è continua, ma esiste una zona vuota lungo la sequenza sulla quale si dispongono i punti, attorno alle $\sim 50 M_{\oplus}$. Dal momento che ad oggi si è in grado di rivelare pianeti di massa anche molto inferiore, tale *gap* rispecchia una caratteristica fisica effettiva e non un semplice effetto di selezione degli strumenti. Gli studi compiuti finora sulla struttura degli esopianeti non hanno fornito una spiegazione soddisfacente per un tale "deserto".

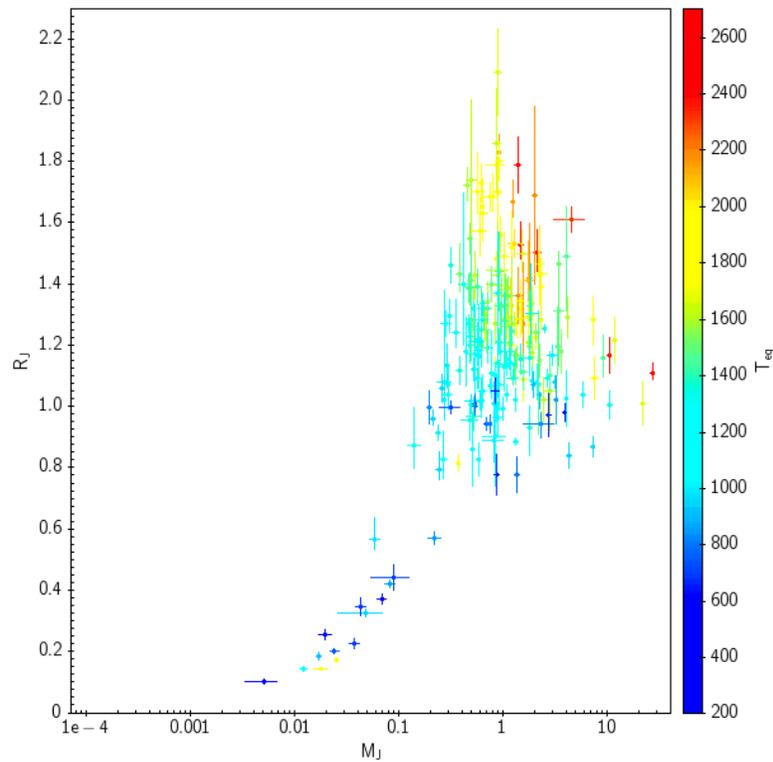
Dalla Figura 3.8b si evidenzia come, per quanto riguarda i corpi di tipo roccioso, i pianeti non Kepler sono piuttosto ben riprodotti dalle curve teoriche, ad esclusione di quelli che sono evidentemente al di fuori del regime dei corpi descritti dall'equazione di stato di elementi solidi e che non possono pertanto essere spiegati con le curve proposte, dal momento che probabilmente presentano una componente gassosa non trascurabile. I pianeti Kepler, invece, non sono riprodotti in modo preciso dalle curve teoriche (Fig. 3.8a): la maggior parte di essi, pur rientrando nel regime di massa dei corpi solidi, si colloca chiaramente al di sopra della linea che prevede una composizione di pura acqua. L'equazione di stato di un corpo solido prevede meno variabili rispetto a quella di un corpo gassoso e di conseguenza i modelli teorici sono piuttosto attendibili, o in ogni caso non possono discostarsi in modo esagerato da quelli proposti: si conclude che probabilmente, a meno di non ammettere grandi errori nella stima di massa e raggio, è in gioco una fisica ancora sconosciuta e che si stanno osservando pianeti probabilmente molto diversi da quelli del sistema solare.

Per quanto riguarda i corpi gassosi, invece, si nota che pianeti Kepler e non Kepler si dispongono circa nello stesso modo nel diagramma rispetto alle curve teoriche. Il fatto che i pianeti Kepler siano inferiori in numero rispecchia il fatto che nell'Universo i pianeti giganti siano piuttosto rari, in proporzione al gran numero di quelli di piccola massa: avendo *Kepler* un piccolo campo di vista, ma potendo rivelare corpi con raggio molto piccolo, viene rispecchiata la distribuzione effettiva dei pianeti, mentre il gran numero di hot Jupiter scoperti finora è dovuto solamente al fatto che essi sono più facilmente rivelabili, anche con telescopi a Terra.

È interessante notare che i pianeti gassosi, sia Kepler sia non Kepler, si dispongono per la maggior parte al di sopra delle curve teoriche, anche considerando età differenti (i pianeti del campione hanno quasi tutti $t > 0.3$ Gyr: età inferiori non sono state prese in considerazione).



(a) Pianeti Kepler



(b) Pianeti non Kepler

Figura 3.7: Diagramma massa-raggio per pianeti Kepler e non Kepler; viene riportata la temperatura di equilibrio (T_{eq}) in Kelvin.

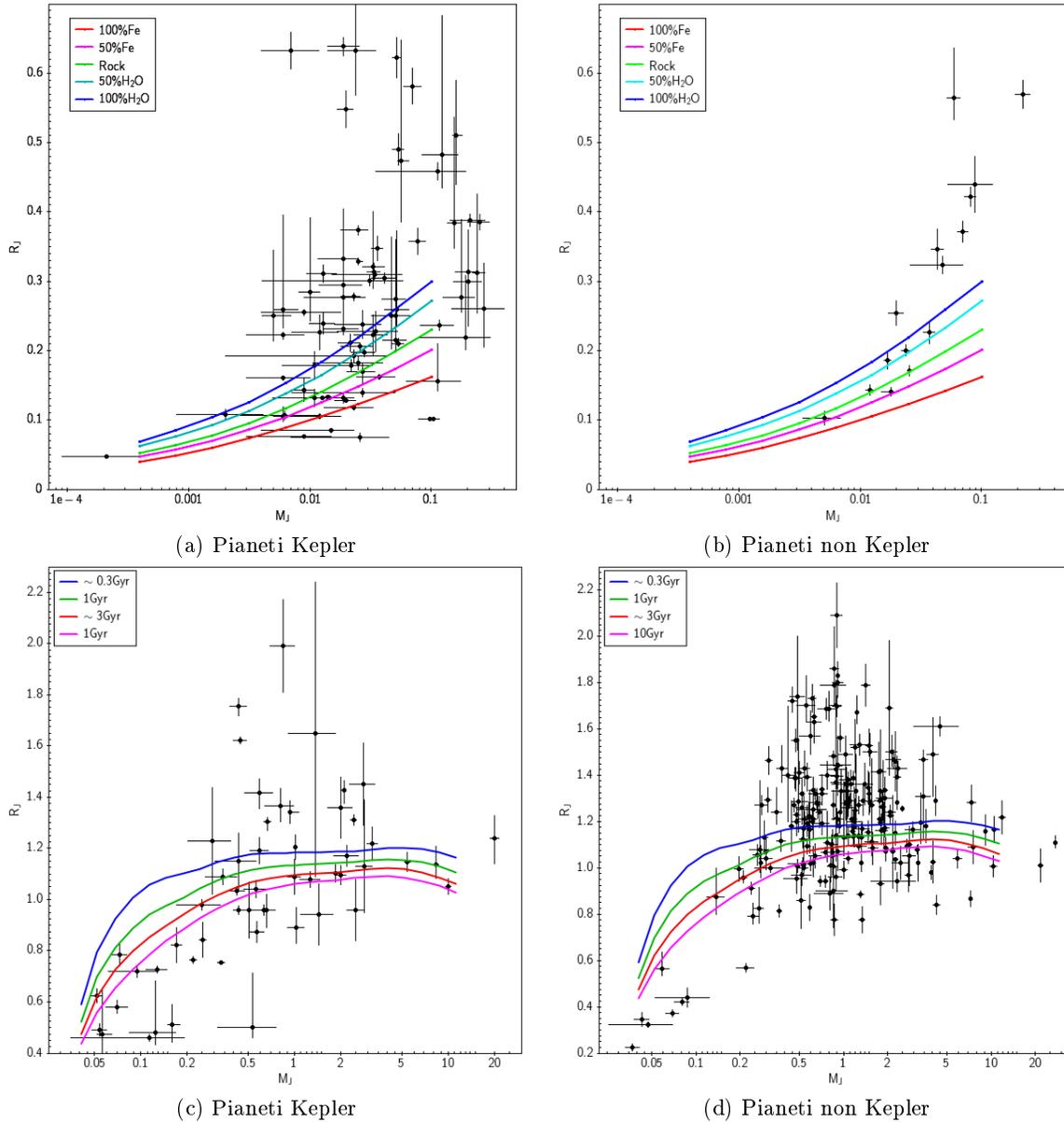


Figura 3.8: Particolari del diagramma massa-raggio, per i pianeti rocciosi e gassosi; vengono sovrapposte le curve teoriche tratte da Zeng et al. (2016) e Fortney et al. (2007). Le curve dei pianeti gassosi sono quelle previste per $M_{core} = 10 M_{\oplus}$ ed $a = 0.045$ AU.

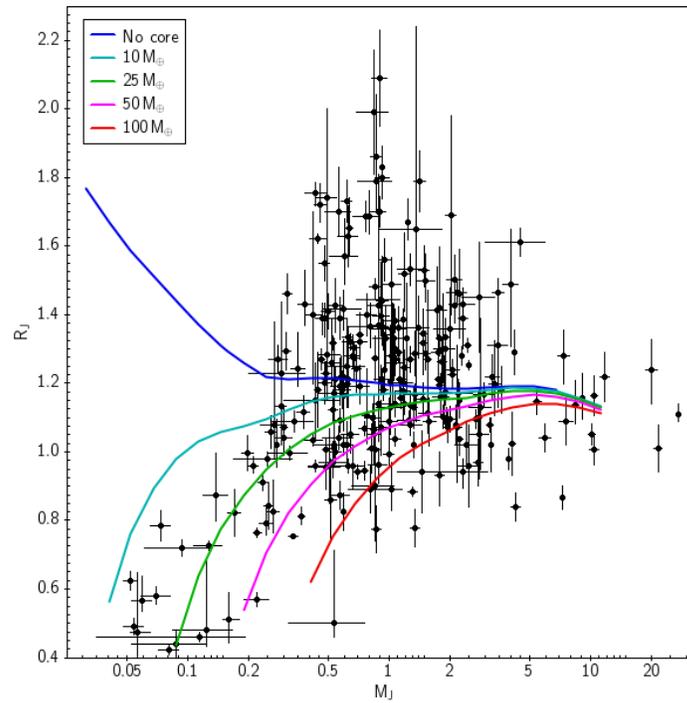
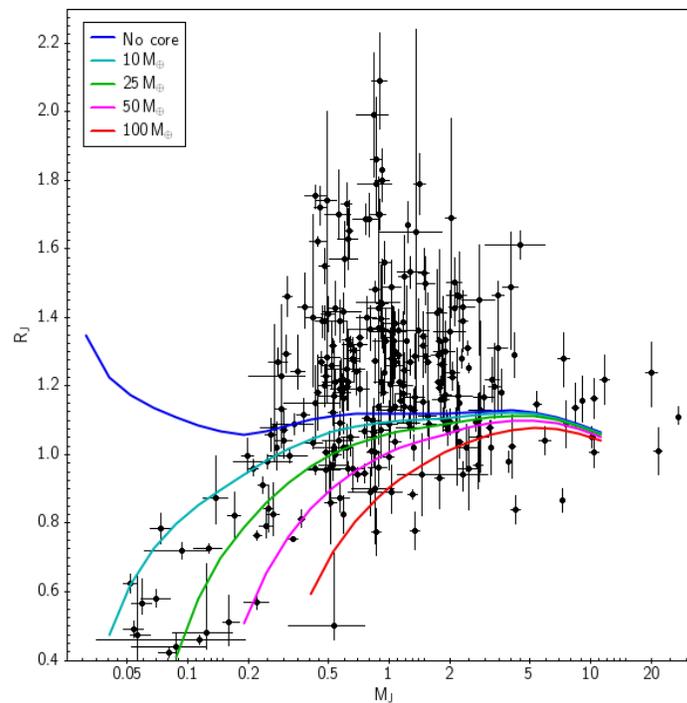
(a) $a = 0.02$ AU(b) $a = 0.045$ AU

Figura 3.9: Il grafico mostra le curve teoriche della relazione massa-raggio elaborate da Fortney et al. (2007) per i pianeti gassosi di eta' $t = 3.1623$ Gyr, al variare della massa del nucleo centrale e con semiasse maggiore $a = 0.02$ AU e $a = 0.045$ AU. Sono riportati tutti pianeti del campione, Kepler e non Kepler.

Dal momento che le Figure 3.8c e 3.8d evidenziano come i pianeti gassosi Kepler e non Kepler abbiano le stesse caratteristiche fisiche, in quanto si dispongono nello stesso modo sul diagramma, i grafici in Figura 3.9 sono stati costruiti unendo i due sotto-campioni.

Per cercare una miglior interpolazione dei dati si è provato a variare la massa del nucleo centrale roccioso previsto dei modelli di Fortney et al. (2007), dal momento che l'intervallo di variabilità previsto dalla teoria è molto elevato: Giove è il gigante gassoso meglio conosciuto, eppure nemmeno la massa del suo nucleo centrale è nota con precisione e anzi si suppone possa variare tra 0 e $60 M_{\oplus}$. Si può notare dalla Figura 3.9 che non si ottiene in nessun caso una buona corrispondenza con i dati, nemmeno al variare del semiasse maggiore (i pianeti del campione sono per la maggior parte hot Jupiter, perciò sono stati considerati solo i modelli con $a < 0.05$ AU).

Il raggio mostrato dalla maggior parte dei pianeti è, in tutti i casi considerati, molto maggiore di quello previsto dai modelli: il meccanismo di espansione che gli hot Jupiter subiscono non è quindi ancora stato compreso del tutto e modellato nel modo corretto. È possibile inoltre che ci siano in gioco ulteriori meccanismi ancora sconosciuti che portano ad avere una tale discrepanza.

3.4 Confronto tra i diagrammi relativi a diversi metodi di rivelazione

In questo paragrafo analizziamo, nel campione dei pianeti Kepler, le differenze tra le misure di massa effettuate tramite RV e TTVs, alla luce della discussione sul bias nella sensibilità dei due metodi affrontata in sezione 1.2.3.

Dalla Figura 3.12 è evidente come, al diminuire del valore della massa e del raggio, le barre di errore aumentino: nonostante sia ora possibile rilevarli, i pianeti di massa terrestre o inferiore hanno in ogni caso una grande incertezza nella misura, condivisa da entrambi i metodi.

Si può notare che i pianeti di grande raggio e massa sono prevalentemente misurati tramite RV, come ci si aspetta in quanto la velocità radiale della stella è più facilmente rilevabile se il pianeta è massiccio. Nella regione dei pianeti di piccola taglia le misure di TTVs aumentano ed è possibile notare che, a parità di raggio, il range in massa coperto è maggiore, come ci si aspetta dai risultati della sezione 1.2.3; le misure di RV sono invece concentrate in un piccolo intervallo di massa.

Dalla Figura 3.11 è possibile inoltre evidenziare come il metodo delle velocità radiali sia più sensibile a pianeti orbitanti vicino alla propria stella: il periodo orbitale dei pianeti Kepler con massa misurata tramite RV è sistematicamente più basso rispetto a quello dei pianeti analizzati con i TTVs.

Dal momento che in letteratura la massa di un dato pianeta misurata tramite entrambi RV e TTVs è, entro i limiti di errore, solitamente compatibile, si conclude che i due metodi osservano effettivamente pianeti con caratteristiche differenti.

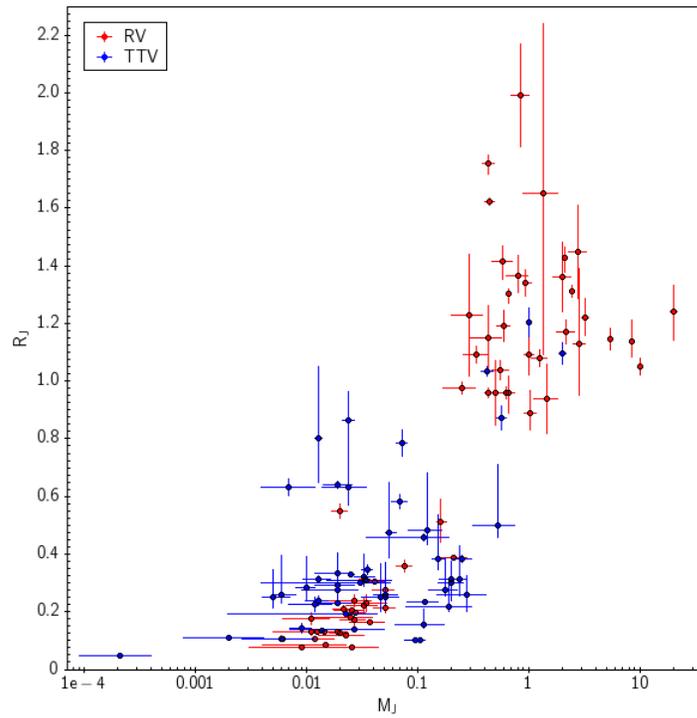


Figura 3.10: Confronto della misura di massa e raggio tra pianeti misurati tramite RV (rosso) e tramite TTVs (blu).

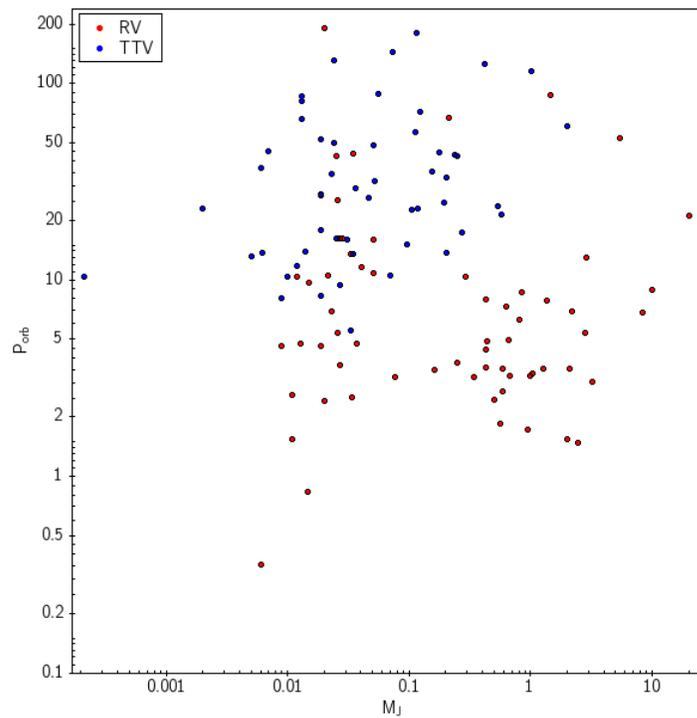


Figura 3.11: Periodo orbitale in funzione della massa planetaria, entrambi in scala logaritmica. In rosso sono mostrati i pianeti con massa misurata dalle RV, in blu quelli tramite TTVs.

3.4. CONFRONTO TRA I DIAGRAMMI RELATIVI A DIVERSI METODI DI RIVELAZIONE E1

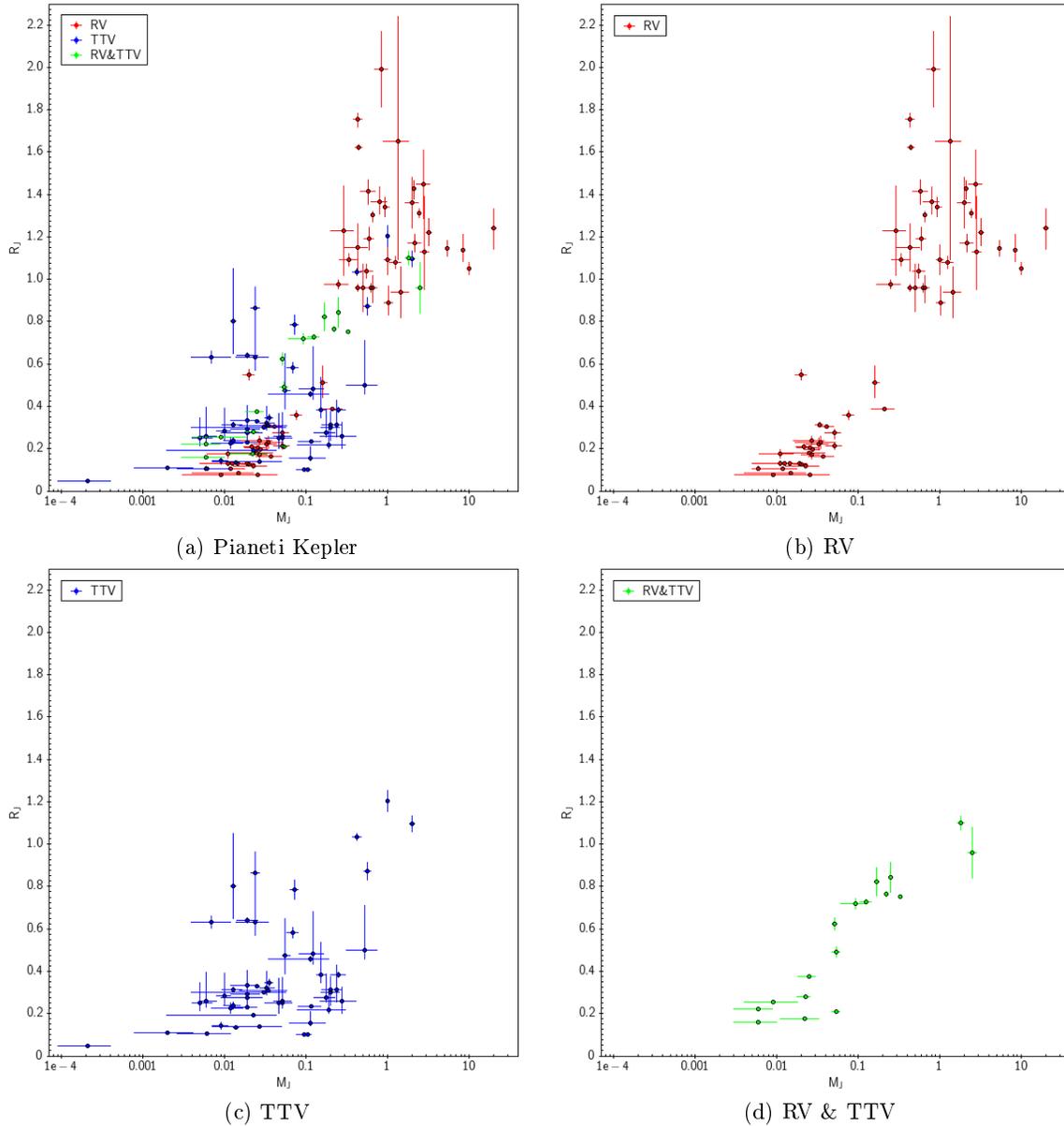


Figura 3.12: Confronto del valore del raggio in funzione della massa tra diversi metodi di rivelazione. Il campione totale è riportato in figura (a); si dividono poi i pianeti con massa misurata solo tramite RV (b), solo tramite TTVs (c) e misurata con entrambi i metodi (d).

3.5 Ricerca di eventuali correlazioni con ulteriori proprietà dei pianeti

Abbiamo studiato altre possibili correlazioni, come riportato nelle Figure 3.13 e 3.14.

Oltre ad essere nuovamente evidente come i pianeti Kepler abbiano sistematicamente massa più piccola rispetto ai non Kepler, si nota dalla Figura 3.13 che i due sotto-campioni non mostrano differenze significative per quanto riguarda le stelle ospitanti: si tratta perlopiù di stelle con massa e raggio simili a quelli solari. L'intervallo di metallicità e temperatura efficace in cui spaziano le stelle è all'incirca lo stesso.

Più interessante è invece l'analisi delle caratteristiche planetarie: è evidente che i pianeti Kepler sono molto diversi da quelli delle precedenti survey. Si tratta infatti di pianeti con semiasse maggiore più elevato (Fig. 3.14a), più freddi (Fig 3.14c) e molto meno irraggiati (Fig. 3.14d).

3.5. RICERCA DI EVENTUALI CORRELAZIONI CON ULTERIORI PROPRIETÀ DEI PIANETI43

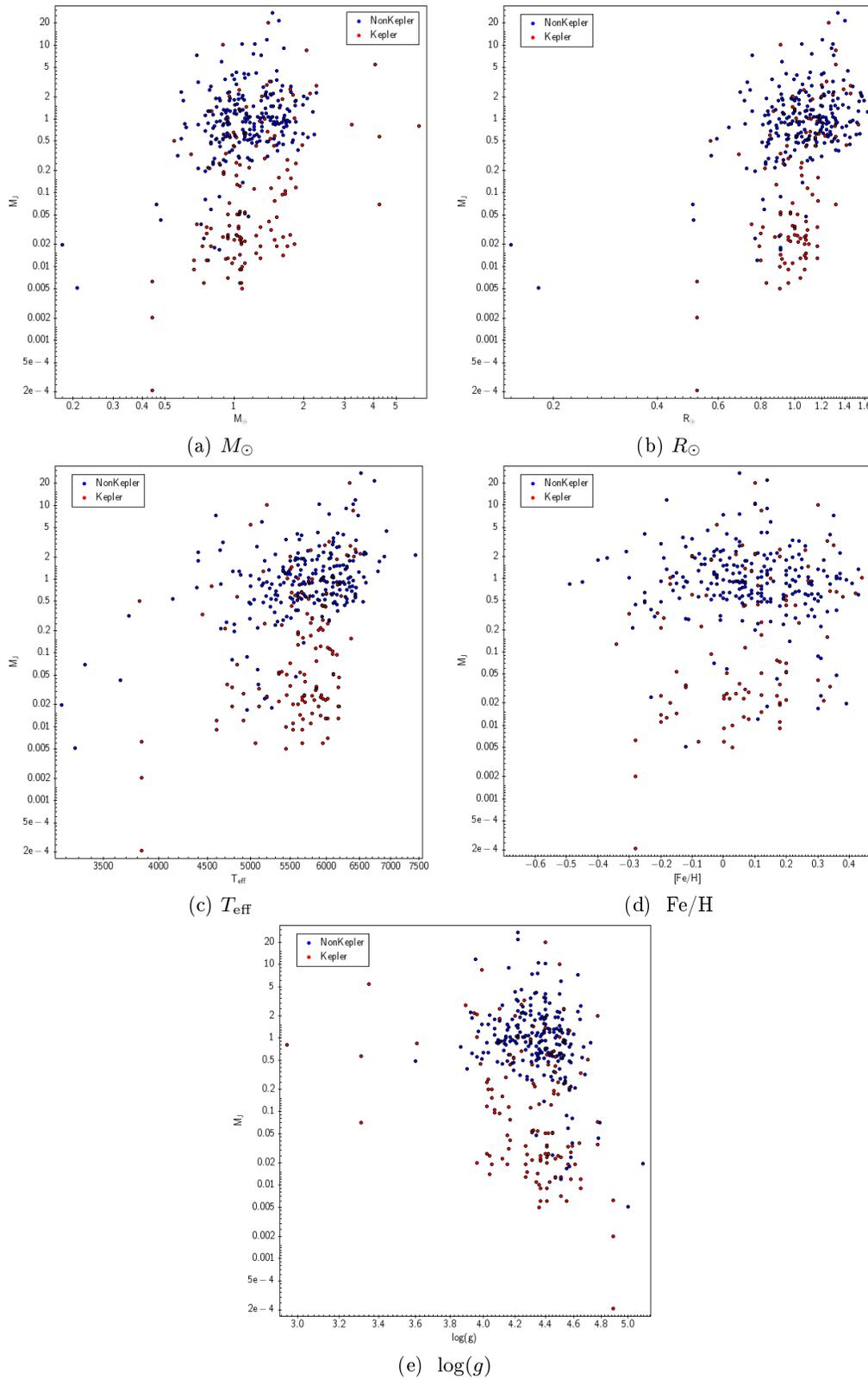


Figura 3.13: Correlazioni tra la massa planetaria, espressa in unità gioviane, e le varie proprietà delle stelle ospitanti: massa, raggio, temperatura efficace, metallicità e logaritmo della gravità superficiale. Gli assi sono riportati in scala logaritmica, tranne per il grafico della metallicità, in cui l'ascissa è in scala lineare.

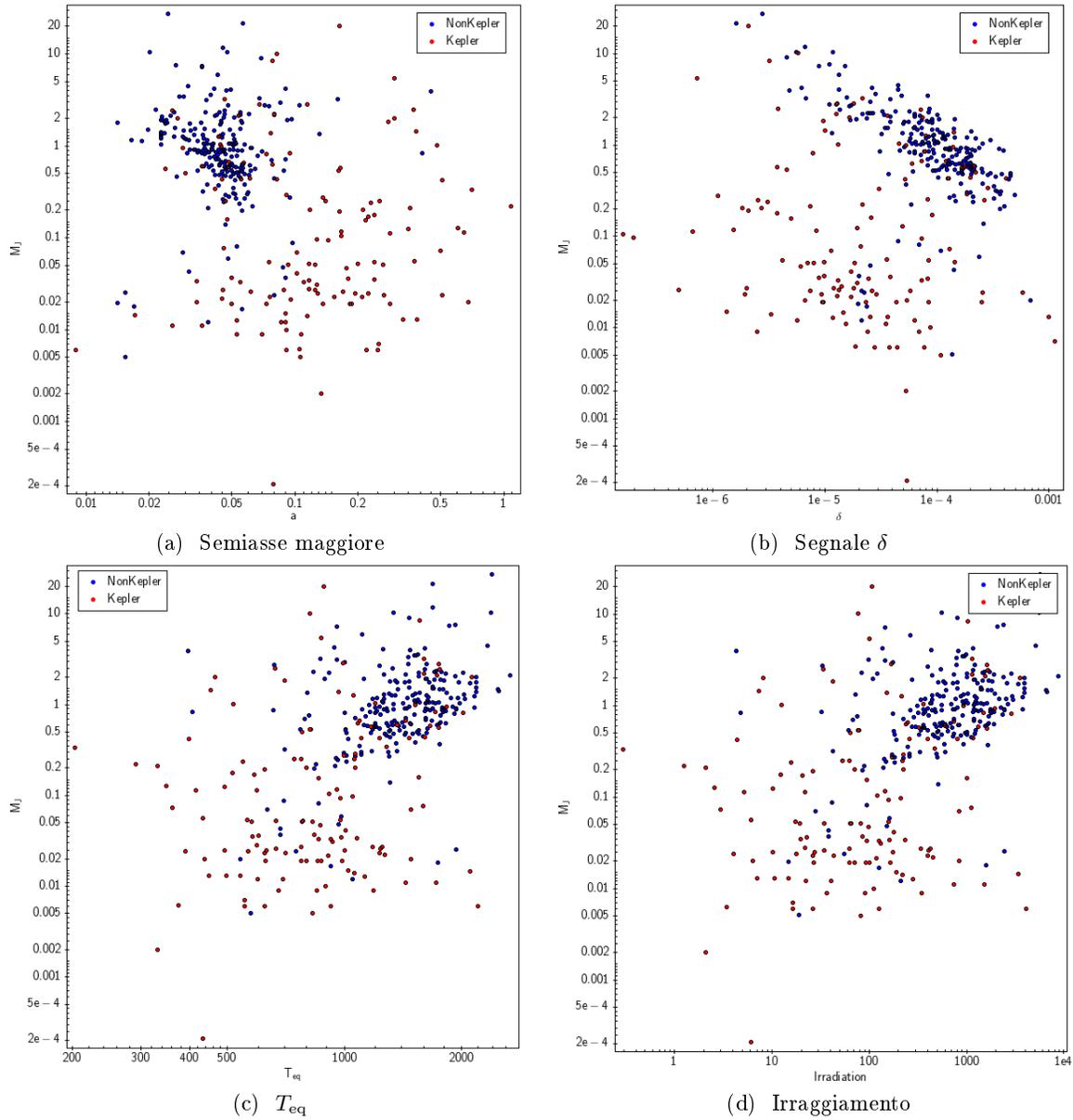


Figura 3.14: Correlazioni tra la massa planetaria, espressa in unità gioviane, e le varie proprietà degli esopianeti: semiassa maggiore, segnale di trasmissione atmosferica, temperatura di equilibrio e irraggiamento. Gli assi sono riportati in scala logaritmica.

Capitolo 4

Risultati e conclusioni

4.1 Individuazione dei pianeti peculiari

Dal nostro studio sono emersi diversi pianeti che mostrano caratteristiche peculiari, differenti rispetto alla media del campione: potrebbe essere interessante studiarli ulteriormente tramite le future missioni spaziali, che saranno in grado di fornire dati molto precisi e potrebbero quindi rispondere agli interrogativi che sono sorti riguardo a molti di questi pianeti “anomali”. I pianeti non Kepler potrebbero essere inseriti tra i target del satellite *CHEOPS*, che osserverà oggetti già noti per migliorarne i parametri. Per quanto riguarda i pianeti Kepler, invece, la maggior parte di essi mostra un alto valore della declinazione e risulta pertanto poco visibile dal campo di *CHEOPS*. Essi potrebbero essere quindi monitorati dal satellite *PLATO* che, oltre ad inquadrare un grande campo, possiede l’accuratezza e la precisione fotometrica per analizzare anche i più piccoli pianeti, di massa inferiore a quella terrestre, scoperti da *Kepler*.

4.1.1 Diagramma $T_{\text{eff}} - \log(g)$

In sezione 3.3.1 sono stati individuati alcuni pianeti orbitanti stelle non appartenenti alla sequenza principale: dalla Figura 3.4 si individuano diverse stelle che ospitano pianeti Kepler ed una sola con in orbita un pianeta non Kepler. Si riporta in seguito la loro analisi.

1. **Kepler-91b**: è uno dei pochi pianeti scoperti orbitanti una gigante rossa (classificata come K3) e tra di essi è il più vicino alla propria stella. È un hot Jupiter di $M = 0.88 M_J$ e $R = 1.367 R_J$; si suppone che esso si trovi nello stadio appena precedente “l’inghiottimento” da parte dell’astro, che avverrà secondo i modelli in meno di 55 Myr a seguito della sua espansione dovuta all’ascensione lungo il ramo delle giganti rosse. Al periastro, la stella sottende un angolo di 48° , coprendo il 10% del cielo visto dal pianeta (si consideri che il Sole visto dalla Terra occupa circa lo 0.0005%). L’atmosfera sembra aver subito un’espansione a causa dell’eccessivo irraggiamento; si stima inoltre che circa il 70% della superficie del pianeta risulti sempre illuminata (Lillo-Box et al. 2014). Si hanno valori di $I/I_\oplus = 2856.15$ e $T_{\text{eq}} = 2010$ K, i quarti in ordine di grandezza per tutto il campione di esopianeti. L’elevato valore dell’irraggiamento può spiegare la bassa densità del pianeta ($\rho = 0.33 \rho_J$). Il pianeta potrebbe essere un interessante candidato per l’elaborazione dei modelli di espansione dei pianeti gassosi sottoposti ad una forte radiazione stellare, soprattutto considerando che essa è stata subita per un periodo

di tempo più elevato rispetto a quella di un pianeta orbitante una stella di sequenza principale.

2. **Kepler-56b/c**: il sistema, composto da due pianeti rispettivamente di $R = 3.84 R_{\oplus}$ e $R = 7.85 R_{\oplus}$, orbita una gigante rossa. Le emissioni cromosferiche delle stelle giganti causano, a certe lunghezze d'onda, un illuminamento al bordo (ad esempio nelle righe H e K del calcio). Un confronto tra la durata del transito a queste lunghezze d'onda e quella nelle bande larghe misurata da *Kepler* potrebbe portare ad una misura diretta della grandezza della cromosfera stellare (Steffen et al. 2013), motivo per cui potrebbe essere interessante inserirlo (così come tutti i pianeti orbitanti stelle giganti) nei target di *PLATO*.
3. **Kepler-432b**: è un pianeta con $R = 1.145 R_J$ e $M = 5.41 M_J$ che si muove su un'orbita fortemente eccentrica ($e = 0.535$) attorno ad una gigante rossa di tipo K. Attualmente la distanza minima raggiunta al periastro è di $7.28 R_{\star}$; quando la stella raggiungerà la fine del ramo delle giganti, essa avrà un raggio di $\sim 8 R_{\odot}$ e, escludendo una degradazione dell'orbita dovuta al trasferimento di momento angolare, la distanza minima del pianeta dalla stella sarà di $\sim 3.8 R_{\star}$ (Ciceri et al. 2015). Il pianeta non verrà pertanto inglobato dalla stella, ma la seguirà nel suo processo evolutivo. Potrebbe essere quindi interessante cercare di prevedere, tramite simulazioni teoriche, come possano variare le condizioni fisiche del pianeta al variare di quelle della stella, considerando che quando essa giungerà al termine della propria esistenza il pianeta potrebbe essere ancora integro.
4. **Kepler-435b**: è un pianeta con $M = 0.84 M_J$ e $R = 1.99 R_J$. È uno dei più grandi pianeti transitanti scoperti situati a così grande distanza dalla Terra (2070 pc) ed orbita una stella sub-gigante di tipo F9, già proiettata verso il ramo delle giganti. Il forte irraggiamento subito ($I/I_{\oplus} = 1482.13$) potrebbe spiegare il valore così elevato del raggio e la conseguente bassissima densità ($\rho = 0.131 \text{ g cm}^{-3}$). Anche trascurando possibili interazioni mareali, il pianeta verrà inglobato dalla stella quando il raggio stellare raggiungerà l'attuale orbita ($a = 0.0948 \text{ AU}$) tra circa 260 Myr (Almenara et al. 2015). Come Kepler-91b, potrebbe essere un pianeta interessante all'interno dello studio del meccanismo di espansione subito dagli hot Jupiter.
5. **Kepler-30b/c/d**: la stella ospitante non si trova realmente fuori dalla sequenza principale. È una stella di tipo solare che mostra una veloce rotazione ed un gran numero di macchie solari: si stima quindi che sia più giovane del Sole (2 Gyr). È possibile che un valore così alto della gravità superficiale ($\log(g) = 4.77$) sia dovuto ad un errore nel calcolo della stessa, o ad un errore nel riportare il valore sul catalogo: raggio e massa sono infatti molto simili a quelli del Sole ($R_{\star} = 0.99 R_{\odot}$, $M_{\star} = 0.95 M_{\odot}$) e non sembrano esserci motivi apparenti per cui la gravità non assuma un valore simile a quello solare ($\log(g)_{\odot} = 4.44$).

Il sistema è in realtà interessante in quanto mostra orbite altamente complanari e quasi allineate con l'equatore della stella: ha quindi una struttura simile a quella del sistema solare, fatto non comune nei sistemi planetari finora analizzati (Sanchis-Ojeda et al. 2012). È quindi un sistema importante all'interno dello studio delle interazioni gravitazionali, le quali, ad esempio, sono supposte essere alla base della formazione degli hot Jupiter, se troppo intense o disturbanti.

6. **Corot-28b**: per quanto riguarda i pianeti non Kepler, dalla Figura 3.4b si può notare che solo una stella si discosta palesemente dalla sequenza principale. Il pianeta ospitato appartiene alla classe degli hot Jupiter ($M_p = 0.484M_J$, $R_p = 0.955M_J$), ma non mostra segni di un'espansione dovuta all'irraggiamento. La stella è classificata come una G8/9 IV ed ha un'età di 12 ± 1.5 Gyr, stimata grazie all'inserimento dei parametri stellari nei modelli teorici. Essa è quindi nella parte più antica della distribuzione delle popolazioni stellari. Tale età è consistente con il valore del raggio: per una stella di 5150 K, la gravità superficiale è molto bassa e ciò indica che la stella ha subito una fase di espansione e di diminuzione della pressione, portando ad un valore del raggio molto elevato per una temperatura così bassa rispetto a quello di una stella dello stesso tipo, ma appartenente alla sequenza principale.

Sembrano essere presenti tuttavia diverse incongruenze: l'età di 12 ± 1.5 Gyr è in conflitto con il valore della metallicità ($[Fe/H] = 0.15 \pm 0.05$), pertanto è possibile che non sia del tutto corretta o che altri fenomeni abbiano arricchito l'atmosfera stellare di metalli. Il periodo di rotazione misurato è inoltre molto elevato rispetto a quello calcolato sulla base dei modelli teorici, con un valore simile a quello di una stella di pochi Myr di età. È stata rivelata inoltre una quantità inaspettatamente alta di litio, che per le stelle di quella temperatura è tipico ad un'età di pochi Myr e pertanto in una fase precedente alla sequenza principale, fatto del tutto incongruente con i valori del raggio e della gravità superficiale. La spiegazione potrebbe in realtà risiedere nel meccanismo Cameron-Fowler, che avviene nei primi stadi evolutivi che seguono l'uscita dalla sequenza principale e che reintroduce la presenza di litio.

Queste questioni irrisolte aprono la strada ad interessanti ipotesi sull'evoluzione del sistema: è possibile ad esempio che fosse presente un ulteriore pianeta, che precipitando poi sulla stella ne abbia accelerato la rotazione ed arricchito l'atmosfera di elementi pesanti. Non è stato possibile ottenere prove osservative che dimostrino la validità dell'ipotesi: un futuro monitoraggio da parte di *CHEOPS* potrebbe fornire una soluzione definitiva. (Cabrera et al. 2015).

4.1.2 Diagramma $m_V - \delta$

Dalla Figura 3.5 vengono evidenziati alcuni pianeti, sia Kepler sia non Kepler, con valori che si discostano da quelli del resto del campione. Si riporta in seguito la loro analisi.

1. **Kepler-12b**: presenta un elevato valore del segnale atmosferico ($\log_{10}(\delta) = -3.387$). Si tratta di un pianeta di tipo gioviano, con $R = 1.754R_J$ e $M = 0.432M_J$: la bassa densità ($\rho = 0.11 \text{ g cm}^{-3}$) indica la presenza di un'atmosfera molto estesa (Esteves et al. 2015). Soprattutto se si considera che i dati indicano la presenza di un'atmosfera costituita da elementi leggeri, si avrà quindi una grande altezza di scala H ed un conseguente alto valore di δ (si veda sez. 3.1); bisogna inoltre considerare che il raggio è il secondo in ordine di grandezza tra i pianeti Kepler, perciò il rapporto R_p/R_* , con $R_* = 1.48R_\odot$, sarà piuttosto elevato, contribuendo ad aumentare il valore del segnale atmosferico (Kepler-453b possiede il raggio più elevato, ma come si è visto in sez. 3.3.1 orbita una gigante, pertanto δ è in ogni caso basso).
2. **Kepler-51**: è un sistema composto da tre pianeti, tutti con un elevato valore del segnale atmosferico, posti in orbite vicine ad una catena di risonanza 1:2:3. Tutti e tre i pianeti

hanno densità molto basse, che possono pertanto spiegare l'alto valore di δ . Il sistema è interessante in quanto sembra rientrare in un gruppo di sistemi planetari compatti, composti da pianeti a bassa densità e con almeno una coppia di orbite vicine alla MMR (come ad esempio Kepler-8, Kepler-30, Kepler-56, Kepler-87, Kepler-89, etc): si suppone che essi si siano formati dal disco originario attraverso una migrazione convergente e una conseguente "cattura" in risonanza (Masuda 2014).

- Kepler-51b: $\log_{10}(\delta) = -2.952$ $\rho = 0.03 \text{ g cm}^{-3}$
- Kepler-51c: $\log_{10}(\delta) = -3.003$ $\rho = 0.03 \text{ g cm}^{-3}$
- Kepler-51d: $\log_{10}(\delta) = -3.234$ $\rho = 0.046 \text{ g cm}^{-3}$

3. **GJ-1214b**: dei pianeti non Kepler, è quello che mostra il più elevato valore del segnale atmosferico ($\log_{10}(\delta) = -3.167$), dovuto principalmente al fatto che la stella ha un raggio molto piccolo e quindi la profondità del transito è elevata. È una super-Terra ($R_p = 2.85 R_{\oplus}$, $M_p = 6.26 M_{\oplus}$) che orbita un stella di tipo M4/5 V. È un pianeta estremamente interessante, in quanto lo spettro di trasmissione ottenuto non mostra alcun tratto distintivo, nemmeno se analizzato con strumenti che hanno la capacità di rivelare le caratteristiche spettrali dovute alla presenza di elementi con elevato peso molecolare medio presenti nell'atmosfera oltre ad elio ed idrogeno. L'elaborazione di modelli teorici di atmosfere composte da metano, H_2O , CO, CO_2 e N_2 mostra che, per spiegare i dati del pianeta, è necessaria la presenza di nubi spesse composte da tali elementi e collocate ad elevata altitudine. Esse bloccano la trasmissione del flusso stellare passante attraverso l'atmosfera, mascherando gli strati sottostanti (Kriedberg et al. 2013).

4.1.3 Diagramma $M_p - R_p$

In sezione 3.3.3 sono stati presentati diversi grafici relativi alla relazione massa-raggio. Si riporta in seguito l'analisi di alcuni pianeti risultati anomali.

Dalla Figura 3.7a si evidenziano tre pianeti Kepler che mostrano una temperatura discordante rispetto alla tendenza generale; risultano molto caldi in una zona di pianeti prevalentemente freddi e viceversa.

1. **Kepler-447b**: il pianeta mostra una temperatura piuttosto bassa ($T_{\text{eq}} = 966 \text{ K}$) per il punto nel diagramma in cui è situato. L'anomalia è solo apparente, perchè in realtà l'incertezza sul raggio è talmente elevata che il limite inferiore d'errore rientra in una zona in cui la temperatura sarebbe in accordo con il resto del campione, per quel valore del raggio.
Il pianeta è invece interessante perchè un transito di questo tipo ($b = 1.076$) potrebbe permettere, se monitorato in futuro da *PLATO*, lo studio di alcuni effetti sul sistema: si potrebbero rivelare segnali provocati da ulteriori corpi perturbanti (altri pianeti, satelliti, etc.) o eventuali pulsazioni della stella (che porterebbero ad una variazione del raggio stellare e quindi del parametro di impatto) oppure la rotazione e lo schiacciamento ai poli del pianeta (Lillo-Box et al. 2015).
2. **Kepler-78b**: il valore della temperatura ($T_{\text{eq}} = 2195 \text{ K}$) è maggiore rispetto alla tendenza mostrata nella parte del diagramma dove si colloca l'esopianeta, anzi risulta essere il maggiore raggiunto dai pianeti Kepler. È un pianeta roccioso di dimensioni simili a

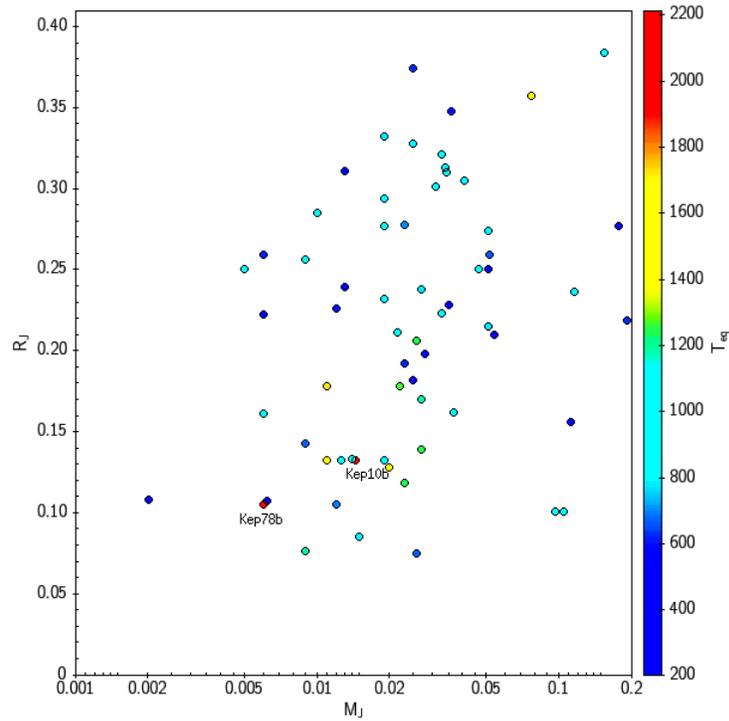


Figura 4.1: Particolare del diagramma massa-raggio dei pianeti Kepler. Si evidenziano i pianeti Kepler-10b e Kepler-78b con alta temperatura di equilibrio.

quelle terrestri ($R_p = 1.16 R_\oplus$, $M_p = 1.8 M_\oplus$), ma con un brevissimo periodo orbitale (0.355 giorni). Ci si aspetta che i pianeti di questo tipo abbiano un'atmosfera molto rarefatta, senza elementi volatili leggeri, rimossi dall'intensa radiazione stellare: si ha infatti un irraggiamento $I/I_\oplus = 4059.64$, valore più alto del campione. Si suppone che l'atmosfera sia composta dai vapori di elementi pesanti, a bassa pressione, inefficienti nel trasportare calore dall'emisfero illuminato a quello notturno: ciò potrebbe quindi determinare l'elevato valore ottenuto della temperatura di equilibrio (si veda Sanchis-Ojeda et al. 2013 per i dettagli).

3. **Kepler-10b**: anche in questo caso il pianeta risulta piuttosto caldo in una zona in cui prevalgono nettamente pianeti freddi ($T_{\text{eq}} = 2102 \text{ K}$). La temperatura è la terza in ordine di grandezza per i pianeti Kepler. Dalle analisi risulta che il pianeta è di tipo roccioso ($R_p = 1.47 R_\oplus$, $M_p = 4.59 M_\oplus$) ed ha un periodo orbitale molto breve (0.837 giorni). Ci si aspetta di conseguenza un elevato valore dell'irraggiamento: si è ottenuto infatti $I/I_\oplus = 3416.27$. È stato calcolato (Esteves et al. 2015) un valore dell'albedo geometrico molto elevato ($A_g = 0.583$) rispetto alla maggior parte dei pianeti (in realtà per la maggior parte gassosi) con orbite così brevi, che mostrano valori < 0.25 . La presenza di un'atmosfera inoltre, secondo il sopracitato studio, non è necessaria per giustificare i valori di massa e raggio; è possibile quindi che un valore così elevato dell'albedo sia comune a tutti i pianeti rocciosi con orbite molto brevi, che implicano alta temperatura di equilibrio.

Entrambi i pianeti, Kepler-78b e Kepler-10b, grazie alle caratteristiche che li rendono facilmente rilevabili ed analizzabili (breve periodo orbitale, bassa magnitudine apparente), sono di grande interesse per lo studio dei corpi rocciosi con breve periodo orbitale e dei fenomeni di evaporazione delle atmosfere planetarie. Potrebbe essere interessante monitorarli tramite il satellite *PLATO*, in previsione di individuare ad esempio gli effetti dell'interazione mareale, che a così breve distanza potrebbe portare ad una perdita di momento angolare e ad una conseguente riduzione del semiasse orbitale.

4.1.4 Jeans escape parameter: i pianeti “impossibili”

Per il campione selezionato, i valori del Jeans escape parameter sono stati considerati validi solamente per $R > 2 R_{\oplus}$: nella formula 3.6 si assume una composizione di puro idrogeno, il quale è dominante solo nel caso di pianeti gassosi. Nel caso di pianeti prevalentemente rocciosi sarebbe necessario considerare anche la presenza di elementi più pesanti; il valore di J potrebbe quindi non essere significativo o addirittura errato e pertanto non è stato preso in considerazione.

Tra i pianeti non Kepler con $R > 2 R_{\oplus}$ (98% del totale), il 95% mostra valori $J > 40$ ed il 5% ha $20 < J < 40$: nessun pianeta ha un'atmosfera instabile. Per il campione dei pianeti Kepler con $R > 2 R_{\oplus}$ (81% del totale), solo il 64% mostra valori $J > 40$ ed il 19% ha $20 < J < 40$; esiste quindi una percentuale (19%) di pianeti che non potrebbero esistere. Essi sono riportati in tabella 4.1.

Si può notare come i pianeti Kepler con $R < 2 R_{\oplus}$ siano di più rispetto ai non Kepler (25 contro 4), evidenziando ancora una volta come il limite di rivelabilità sia stato abbassato grazie a osservazioni dallo spazio. È interessante notare però come quasi tutti i pianeti non Kepler si trovino nella fascia di J che implica la stabilità dell'atmosfera secondo il criterio di Jeans e solo il 5% avrebbe bisogno di un calcolo più approfondito. I pianeti Kepler sono in media più piccoli, ma i parametri stimati sono meno precisi, in quanto solo il 64% mostra un'atmosfera stabile, il 19% necessita di ulteriori studi e il restante 17% risulta addirittura instabile.

I pianeti in Tabella 4.1 fisicamente non potrebbero esistere: non ci sono le caratteristiche necessarie affinché il pianeta si formi o rimanga integro una volta formato. È possibile che a causare un valore così basso di J siano delle stime poco precise dei parametri stellari: le stelle analizzate da *Kepler* hanno valori di massa, raggio e temperatura stimati in modo grossolano, che possono di conseguenza aver introdotto errori notevoli nel calcolo dell'irraggiamento e della temperatura planetaria. Un'ulteriore causa di errore potrebbe essere una stima errata della massa dei pianeti: la massa della maggior parte dei candidati kepleriani è stata calcolata tramite procedure automatizzate, che potrebbero non aver considerato eventuali variabili anomale per i singoli pianeti.

È interessante notare come i tre pianeti del sistema Kepler-51 rientrino nella categoria dei pianeti impossibili: essi erano stati analizzati in sezione 4.1.2 a causa dell'elevatissimo valore del segnale di trasmissione atmosferica ed era stata evidenziata la loro bassissima densità. Grazie al calcolo del Jeans escape parameter si può concludere che un tale valore della densità non permette ad un pianeta di mantenere un'atmosfera stabile; è probabile quindi che ci siano stati degli errori nel calcolo della massa o del raggio dei tre pianeti.

Nome	R/R_{\oplus}	ΔR^+	ΔR^-	J
Kepler-11c	0.256	0.004	-0.005	9.10
Kepler-11f	0.222	0.004	-0.006	10.69
Kepler-114d	0.226	0.025	-0.025	19.49
Kepler-177b	0.259	0.136	-0.027	8.15
Kepler-177c	0.633	0.331	-0.064	14.73
Kepler-305c	0.294	0.073	-0.029	17.77
Kepler-307b	0.285	0.107	-0.041	8.63
Kepler-307c	0.25	0.094	-0.037	5.30
Kepler-350c	0.277	0.127	-0.054	15.25
Kepler-36c	0.328	0.005	-0.005	16.69
Kepler-51b	0.633	0.027	-0.027	4.38
Kepler-51c	0.803	0.25	-0.152	7.93
Kepler-51d	0.865	0.045	-0.045	15.65
Kepler-56b	0.581	0.026	-0.025	17.90
Kepler-79c	0.332	0.007	-0.007	16.22
Kepler-79d	0.639	0.012	-0.014	10.44
Kepler-79e	0.311	0.012	-0.012	17.02
Kepler-87c	0.548	0.026	-0.026	18.32

Tabella 4.1: Pianeti Kepler con $J < 20$ ed $R > 2 R_{\oplus}$.

4.2 Risultati e conclusioni dello studio

La selezione di pianeti con massa e raggio noti ha portato ad un campione di 363 oggetti, di cui sono stati ricercati in letteratura i dati più attendibili riguardanti le proprietà fisiche di interesse per lo studio. Il campione è composto prevalentemente da pianeti di tipo hot Jupiter; in generale, anche per quanto riguarda i pianeti rocciosi con masse comparabili a quella terrestre o minori, si tratta sempre di pianeti con breve periodo orbitale, inferiore a 288 giorni.

Sono stati evidenziati i pochi pianeti orbitanti stelle non appartenenti alla sequenza principale, interessanti per gli studi sull'evoluzione planetaria: Corot-28b, Kepler-91b, Kepler-56b/c, Kepler-432b, Kepler-435b.

Tra i pianeti con elevato valore del segnale di trasmissione atmosferica, Kepler-51b/c/d sono da scartare in quanto risultano essere parte dei 18 pianeti Kepler con atmosfera instabile (ovvero con $J < 20$), a causa della bassissima densità. Valori particolarmente alti di δ si hanno quindi solo per Kepler-12b e GJ-1214b; è possibile tuttavia individuare pianeti con caratteristiche meno peculiari, ma in ogni caso favorevoli all'utilizzo della spettroscopia di trasmissione per lo studio delle atmosfere planetarie, che mostrano alti valori di δ e bassa m_V .

Kepler-10b e Kepler-78b mostrano una temperatura di equilibrio anomala, dovuta principalmente al brevissimo periodo orbitale e all'elevato valore dell'albedo: sono buoni candidati per studio dei corpi rocciosi con breve periodo orbitale e dei fenomeni di evaporazione delle atmosfere planetarie.

Il confronto tra i pianeti Kepler con massa misurata tramite RV e tramite TTVs ha portato ad evidenziare come i due metodi, pur portando a risultati compatibili se applicati ad uno stesso pianeta, in generale rivelino preferenzialmente due diverse tipologie di pianeti: le RV sono più sensibili a pianeti con massa maggiore e minor periodo orbitale. Inoltre, a parità di raggio, i TTVs coprono un intervallo in massa molto più ampio rispetto al metodo delle

RV: ciò risulta chiaro soprattutto per quanto riguarda i pianeti di piccola massa, in quanto è presente un buon numero di misure di TTVs. I pianeti con massa misurata in entrambi modi si collocano tutti nella zona di transizione tra pianeti rocciosi e gassosi, a cavallo del *gap*, la zona deserta, che si evidenzia nel diagramma massa-raggio a circa $50 M_{\oplus}$.

Dallo studio effettuato sul diagramma massa-raggio è emerso, come ci si aspettava, che tramite *Kepler* è stato possibile rivelare pianeti con raggio e massa molto inferiori (fino a $0.3 M_{\oplus}$) rispetto a quelli delle precedenti survey, nonostante gli errori piuttosto elevati. È emerso come i pianeti di piccola massa siano, rispetto ai giganti, molto più frequenti nell'Universo.

È stato evidenziato come i pianeti Kepler sembrino appartenere ad una tipologia diversa rispetto ai precedenti pianeti: si tratta di corpi più freddi, meno irraggiati e situati a distanza orbitale maggiore, nonostante le caratteristiche fisiche delle stelle ospitanti siano all'incirca le stesse del resto del campione.

Per quanto riguarda i pianeti di tipo roccioso, la sovrapposizione con le curve teoriche mostra un buon accordo per i pianeti non Kepler, mentre i rimanenti mostrano per la maggior parte raggi più elevati rispetto ai modelli basati sull'equazione di stato dei materiali solidi: è possibile che le misure di massa e raggio siano poco accurate, oppure che il problema sia dovuto a meccanismi fisici ancora sconosciuti. Un problema analogo si riscontra per quanto riguarda i pianeti gassosi: in questo caso i pianeti Kepler e non Kepler si collocano all'incirca nella stessa zona del diagramma massa-raggio, ma non mostrano un buon accordo con le curve teoriche, nemmeno al variare della massa del nucleo centrale solido o del semiasse maggiore. I pianeti mostrano in tutti i casi un raggio troppo elevato, a causa probabilmente di un meccanismo di espansione dovuto all'eccessivo irraggiamento, meccanismo non ancora del tutto compreso e teorizzato correttamente; è possibile inoltre che siano presenti ulteriori meccanismi sconosciuti che agiscono sui pianeti con breve periodo orbitale.

4.3 Sviluppi futuri

Lo studio ha evidenziato come, per avere una caratterizzazione completa ed una relazione massa-raggio più attendibile possibile, sia necessario ampliare il campione di esopianeti conosciuti e migliorare allo stesso tempo i dati già a disposizione, anche attraverso l'utilizzo ed in confronto con diversi metodi di rivelazione. Sono ancora molti i bias nella rilevazione dei pianeti e molti i campi ancora sconosciuti o poco studiati (ad esempio le stelle non appartenenti alla sequenza principale, i pianeti con elevato semiasse maggiore o quelli orbitanti stelle dei primi tipi spettrali).

Sono in corso diversi progetti che hanno come scopo principale lo studio dettagliato dei pianeti extrasolari: viene riportato in seguito un elenco dei principali.

PLATO. Missione proposta dall'ESA con lancio previsto per il 2025, *PLATO* (PLANetary Transit and Oscillations of stars) è un telescopio spaziale che si propone di studiare per sei anni consecutivi oltre 1 milione di stelle brillanti, coprendo $\sim 50\%$ del cielo, alla ricerca di segnali di transito. Lo strumento è composto da 34 telescopi a grande campo (32 raccoglieranno immagini ogni 25 s e 2 –collegati a delle *fast-cameras*– ogni 2.5 s), fornendo un campo di vista totale di 2232° quadrati ed un ampio intervallo fotometrico (4 – 16 mag). *PLATO* permetterà di ottenere curve di luce e raggi molto accurati anche per pianeti di piccola taglia, concentrandosi in particolare su pianeti simili alla Terra situati nella zona abitabile. Verranno inoltre identificati possibili candidati per future analisi spettroscopiche delle atmosfere planetarie e sarà possibile ottenere dati precisi

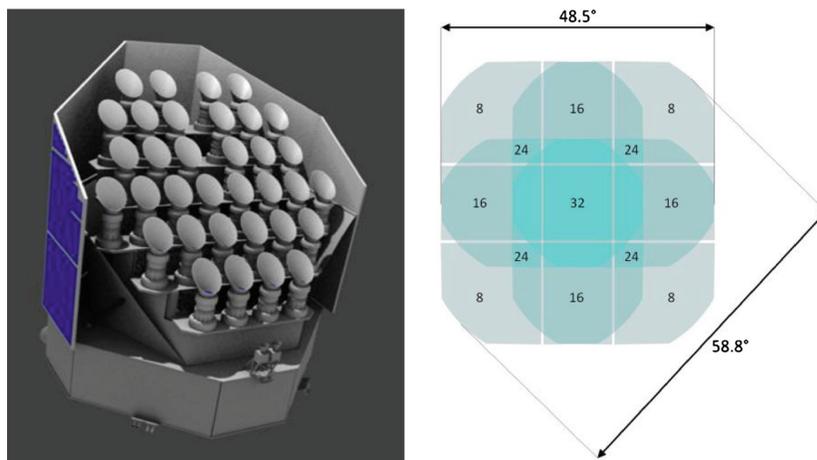


Figura 4.2: Progetto del telescopio *PLATO* (sinistra) e campo di vista dei 32 telescopi “normali” (destra). Immagine tratta da Rauer et al. (2014).

su massa, età e raggio delle stelle grazie all’astrosismologia; lo strumento ha inoltre le potenzialità per individuare satelliti orbitanti esopianeti, anelli planetari e corpi Troiani.¹ Oltre all’analisi degli esopianeti, i dati di *PLATO* permetteranno anche di migliorare i modelli stellari (compresa la relazione tra età e rotazione) e di esplorare così la struttura e l’evoluzione della nostra galassia (Rauer et al. 2014).

TESS. *TESS* (Transiting Exoplanet Survey Satellite) è una missione proposta dalla NASA, con lancio previsto per il dicembre 2017. Per due anni verranno osservate oltre 2×10^5 stelle di tipo spettrale compreso tra F5 ed M5 con $m_V \leq 12$ mag, utilizzando quattro telecamere ciascuna con un campo di 24° quadrati e collegata ad un array di quattro CCD, alla ricerca di pianeti transitanti con raggio fino a $\sim 1 R_\oplus$. Verranno effettuate misure su 200000 stelle precedentemente selezionate ogni 2 minuti ed ogni 30 minuti si avranno immagini in *full-frame*. È prevista una particolare attenzione per le stelle vicine e brillanti (10 – 100 volte più luminose di quelle osservate da *Kepler*, per avere misure di miglior qualità), in particolare vicino ai poli eclittici: sono infatti le zone ottimali per le osservazioni del *JWST*, a cui *TESS* fornirà una lista di possibili candidati (Ricker et al. 2014).

CHEOPS. Progetto dell’ESA previsto per il 2017, *CHEOPS* (CHAracterizing ExOPlanet Satellite) studierà molti pianeti con $1 R_\oplus < R_p < 4 R_\oplus$ identificati precedentemente grazie al monitoraggio delle stelle ospitanti tramite misure Doppler di alta precisione, con lo scopo di identificare i target migliori per un futuro studio della loro atmosfera, oltre a segnali di ulteriori pianeti presenti nei sistemi; migliorerà inoltre la precisione nella misura del raggio di molti pianeti di tipo nettuniano e studierà i flussi di energia e calore nell’atmosfera degli hot Jupiters (si veda il sito <http://sci.esa.int/cheops/>).

JWST. Progetto congiunto di NASA, ESA e CSA (Canadian Space Agency) *JWST* (James Webb Space Telescope) è un telescopio spaziale infrarosso con lo specchio primario di 6.5 m di diametro costituito di 18 segmenti separati, con lancio previsto per l’ottobre 2018. *JWST* verrà utilizzato per studiare ogni fase della storia dell’universo, dai primi

¹Corpi celesti in risonanza stabile 1:1 si dicono *Troiani*; possono essere pianeti, satelliti o asteroidi.

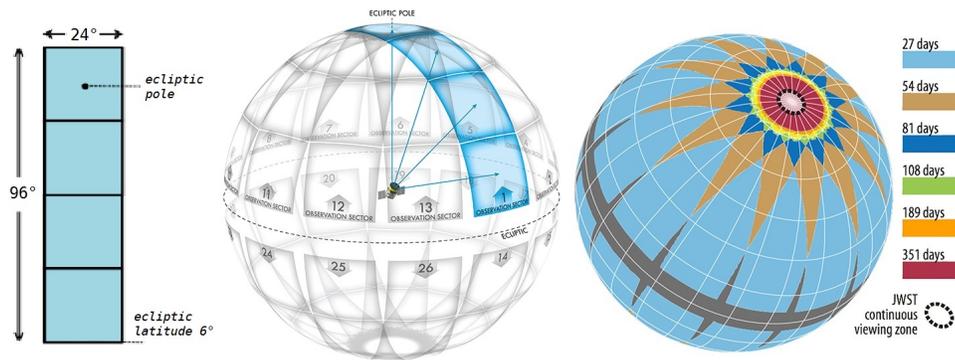


Figura 4.3: *Sinistra*– Campo di vista totale delle quattro telecamere di *TESS*. *Centro*– Divisione della sfera celeste in 26 settori di osservazione, 13 per emisfero. *Destra*– Durata delle osservazioni sulla sfera celeste. Immagine tratta da Ricker et al. (2014).

attimi dopo il Big Bang fino alla formazione dei sistemi planetari. Esso verrà utilizzato per ottenere curve di luce estremamente precise e spettri di pianeti extrasolari. Grazie ai quattro strumenti–NIRCam (0.6 – 5 μm), MIRI (5 – 29 μm), NIRSpec (1 – 5 μm) e FGS/NIRISS– sarà possibile ottenere misure delle eclissi primarie e secondarie di pianeti fino ad $1 M_{\oplus}$, oltre ad acquisire dati spettroscopici su un ampio intervallo di lunghezze d'onda con diverse possibili risoluzioni (tutte le informazioni dettagliate sono reperibili al sito www.jwst.nasa.gov).

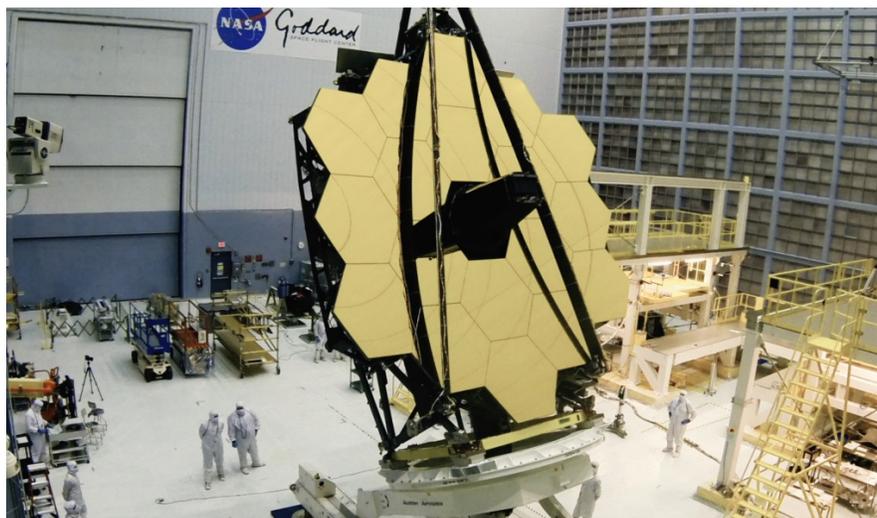


Figura 4.4: Fase di costruzione del *JWST*. Immagine tratta dal sito svs.gsfc.nasa.gov.

I futuri progetti forniranno cataloghi che permetteranno di ottenere una caratterizzazione anche degli oggetti di piccola massa, identificando inoltre tra essi quali abbiano mantenuto un'atmosfera primordiale composta da idrogeno o abbiano altre caratteristiche fisiche comuni. Sarà possibile confrontare con i modelli teorici la relazione tra la densità media e la distanza orbitale anche per gli oggetti di piccola taglia, verificare l'influenza della "migrazione" dei pianeti sull'architettura dei sistemi, identificare come i pianeti ed i sistemi varino al variare delle caratteristiche della stella ospitante (ad esempio in base all'età, al tipo spettrale ed alla metallicità) e studiare i pianeti e i sistemi planetari nelle diverse fasi dell'evoluzione.

* * *

La ricerca della relazione massa-raggio trarrà enorme giovamento dai nuovi dati a disposizione, in quanto permetterà di stimare la densità dei pianeti, stabilendo se siano rocciosi o gassosi, e quindi di individuare i pianeti più idonei per lo studio delle atmosfere, avendo sempre presente l'interesse per l'identificazione di pianeti extrasolari. Si spera che in un futuro prossimo sarà possibile identificare una relazione definitiva, o perlomeno stabilire *se* sia identificabile o meno, a causa dell'enorme ed affascinante varietà di pianeti che popolano l'Universo.

Appendice A

Tabella 4.2

<i>Nome</i>	<i>Massa</i>	<i>Raggio</i>	<i>a</i>	<i>I</i>	<i>T_{eq}</i>	$\log_{10}(\delta)$	<i>J</i>
Kepler-10 b	0.014	0.132	0.017	3416.27	2103	-4.836	11.47
Kepler-10 c	0.054	0.210	0.241	17.40	562	-5.376	100.54
Kepler-100 b	0.023	0.118	0.076	397.03	1228	-5.712	34.87
Kepler-101 b	0.160	0.510	0.047	1002.29	1548	-4.587	44.53
Kepler-102 d	0.012	0.105	0.086	40.69	695	-5.244	36.14
Kepler-102 e	0.028	0.198	0.117	21.98	596	-4.853	52.15
Kepler-103 b	0.031	0.301	0.128	132.54	933	-4.711	24.24
Kepler-103 c	0.114	0.459	0.647	5.19	415	-5.079	131.43
Kepler-106 c	0.033	0.223	0.110	94.44	857	-4.883	37.91
Kepler-106 e	0.035	0.228	0.241	19.68	579	-5.050	58.21
Kepler-11 b	0.006	0.161	0.091	125.20	920	-4.553	8.90
Kepler-11 c	0.009	0.256	0.107	90.56	848	-4.160	9.10
Kepler-11 d	0.023	0.278	0.155	43.15	705	-4.541	25.78
Kepler-11 e	0.025	0.374	0.195	27.27	629	-4.241	23.36
Kepler-11 f	0.006	0.222	0.250	16.59	555	-4.354	10.69
Kepler-113 b	0.037	0.162	0.050	85.16	836	-5.004	60.04
Kepler-114 c	0.009	0.143	0.070	36.96	678	-4.618	20.38
Kepler-114 d	0.012	0.226	0.090	22.36	598	-4.201	19.50
Kepler-117 b	0.094	0.719	0.144	159.33	977	-4.136	29.39
Kepler-117 c	01.840	1.101	0.280	42.31	702	-5.016	523.28
Kepler-12 b	0.432	1.754	0.055	803.81	1465	-3.387	36.94
Kepler-122 f	0.113	0.156	0.287	21.72	594	-6.182	267.95
Kepler-128 b	0.097	0.101	0.127	210.85	1048	-6.703	201.27
Kepler-128 c	0.105	0.101	0.167	121.94	914	-6.796	249.84
Kepler-131 b	0.051	0.215	0.125	63.63	777	-5.155	67.07
Kepler-131 c	0.026	0.075	0.170	34.40	666	-6.301	114.31
Kepler-138 b	0.000	0.047	0.079	6.06	432	-4.267	2.27
Kepler-138 c	0.006	0.107	0.105	3.43	374	-4.727	34.00
Kepler-138 d	0.002	0.108	0.134	2.11	331	-4.279	12.34
Kepler-14 b	8.400	1.136	0.078	1031.21	1559	-5.498	1042.05
Kepler-145 b	0.117	0.236	0.167	144.80	954	-5.813	114.13

Continua nella prossima pagina

Continua dalla pagina precedente

<i>Nome</i>	<i>Massa</i>	<i>Raggio</i>	<i>a</i>	<i>I</i>	<i>T_{eq}</i>	$\log_{10}(\delta)$	<i>J</i>
Kepler-145 c	0.250	0.385	0.254	62.59	774	-5.596	184.36
Kepler-15 b	0.660	0.960	0.057	249.15	1093	-4.134	138.19
Kepler-16 b	0.333	0.754	0.705	0.30	203	-4.517	476.86
Kepler-17 b	2.450	1.310	0.026	1645.68	1752	-4.145	234.49
Kepler-177 b	0.006	0.259	0.220	26.46	624	-4.111	8.16
Kepler-177 c	0.024	0.633	0.268	17.83	565	-3.592	14.74
Kepler-18 b	0.022	0.178	0.045	451.56	1268	-4.888	21.41
Kepler-18 c	0.054	0.490	0.075	159.55	978	-4.071	24.76
Kepler-18 d	0.052	0.623	0.117	65.69	783	-3.838	23.41
Kepler-20 b	0.027	0.170	0.045	341.03	1182	-4.923	29.51
Kepler-20 c	0.051	0.274	0.093	81.16	826	-4.733	49.52
Kepler-238 e	0.534	0.500	0.162	76.47	813	-5.340	288.42
Kepler-276 c	0.052	0.259	0.200	34.35	666	-5.004	66.23
Kepler-276 d	0.051	0.250	0.265	19.57	578	-5.103	77.46
Kepler-277 b	0.275	0.261	0.137	170.66	994	-5.957	232.80
Kepler-277 c	0.202	0.300	0.213	70.60	797	-5.737	185.50
Kepler-279 c	0.155	0.384	0.219	93.91	856	-5.300	103.55
Kepler-282 d	0.192	0.219	0.164	26.61	625	-5.684	308.26
Kepler-282 e	0.177	0.277	0.241	12.32	515	-5.426	272.36
Kepler-289 b	0.023	0.192	0.210	26.19	622	-5.027	42.29
Kepler-289 c	0.420	01.034	0.510	4.44	399	-4.287	223.45
Kepler-289 d	0.013	0.239	0.330	10.61	496	-4.592	24.07
Kepler-30 b	0.036	0.348	0.180	22.84	601	-4.417	37.79
Kepler-30 c	2.010	1.097	0.300	8.22	466	-4.779	864.14
Kepler-30 d	0.073	0.785	0.500	2.96	361	-3.886	56.62
Kepler-305 b	0.033	0.321	0.055	125.23	920	-4.139	24.54
Kepler-305 c	0.019	0.294	0.073	71.09	799	-4.076	17.77
Kepler-307 b	0.010	0.285	0.091	111.08	893	-4.060	8.63
Kepler-307 c	0.005	0.250	0.106	81.87	827	-3.963	5.31
Kepler-328 c	0.124	0.482	0.348	10.18	491	-4.712	115.01
Kepler-338 e	0.027	0.139	0.089	422.06	1247	-5.697	34.22
Kepler-34 b	0.220	0.764	0.1.090	1.24	290	-4.668	217.78
Kepler-35 b	0.127	0.728	0.603	2.58	349	-4.310	109.91
Kepler-350 c	0.019	0.277	0.136	166.28	988	-4.635	15.25
Kepler-350 d	0.047	0.250	0.176	99.29	868	-5.218	47.56
Kepler-36 b	0.014	0.133	0.115	218.90	1058	-5.483	21.85
Kepler-36 c	0.025	0.328	0.128	176.79	1003	-4.582	16.69
Kepler-39 b	20.100	1.240	0.164	106.30	883	-5.678	4031.43
Kepler-396 b	0.238	0.312	0.231	15.87	549	-5.514	305.19
Kepler-396 c	0.056	0.473	0.374	6.06	431	-4.448	60.27
Kepler-4 b	0.077	0.357	0.046	1127.28	1594	-4.681	29.73
Kepler-40 b	2.200	1.170	0.080	1142.33	1599	-4.900	258.29
Kepler-406 b	0.020	0.128	0.034	835.82	1479	-5.177	23.21

Continua nella prossima pagina

Continua dalla pagina precedente

<i>Nome</i>	<i>Massa</i>	<i>Raggio</i>	<i>a</i>	<i>I</i>	<i>T_{eq}</i>	$\log_{10}(\delta)$	<i>J</i>
Kepler-406 c	0.009	0.076	0.053	343.97	1185	-5.606	21.96
Kepler-41 b	0.560	1.040	0.024	1622.04	1746	-3.781	67.76
Kepler-412 b	0.941	1.341	0.029	1944.66	1827	-3.860	84.39
Kepler-413 b	0.211	0.388	0.355	2.11	332	-5.130	360.33
Kepler-419 b	2.500	0.960	0.370	33.92	664	-5.419	861.76
Kepler-420 b	01.450	0.940	0.382	7.29	452	-5.002	749.71
Kepler-422 b	0.430	1.150	0.082	260.97	1106	-3.904	74.29
Kepler-423 b	0.595	1.192	0.036	602.09	1362	-3.676	80.47
Kepler-424 b	1.030	0.890	0.044	363.92	1201	-4.340	211.60
Kepler-425 b	0.250	0.978	0.046	220.20	1060	-3.580	52.99
Kepler-426 b	0.340	1.090	0.041	475.96	1285	-3.547	53.33
Kepler-427 b	0.290	1.230	0.091	223.45	1063	-3.736	48.70
Kepler-428 b	1.270	1.080	0.043	215.44	1054	-4.096	245.12
Kepler-43 b	3.230	1.219	0.046	1138.64	1598	-4.661	364.27
Kepler-432 b	5.410	1.145	0.301	101.61	873	-6.142	1188.44
Kepler-433 b	2.820	1.450	0.068	1626.28	1747	-4.741	244.57
Kepler-434 b	2.860	1.130	0.114	166.91	989	-4.891	562.33
Kepler-435 b	0.840	1.990	0.095	1482.14	1707	-4.118	54.33
Kepler-44 b	1.000	1.090	0.045	930.25	1519	-4.276	132.66
Kepler-447 b	1.370	1.650	0.077	152.28	966	-3.851	188.75
Kepler-45 b	0.505	0.960	0.030	64.21	779	-3.655	148.40
Kepler-454 b	0.022	0.211	0.095	119.22	909	-4.769	24.65
Kepler-48 d	0.025	0.182	0.224	10.31	493	-5.133	61.22
Kepler-5 b	2.111	1.426	0.054	1561.59	1729	-4.439	188.06
Kepler-51 b	0.007	0.633	0.251	16.45	554	-2.953	4.38
Kepler-51 c	0.013	0.803	0.384	7.05	448	-3.004	7.93
Kepler-51 d	0.024	0.865	0.509	4.01	389	-3.234	15.65
Kepler-56 b	0.070	0.581	0.103	833.62	1478	-4.945	17.91
Kepler-56 c	0.570	0.874	0.165	322.80	1166	-5.426	122.87
Kepler-6 b	0.668	1.304	0.049	748.77	1439	-3.916	78.21
Kepler-68 b	0.026	0.206	0.062	408.11	1236	-4.877	22.43
Kepler-68 c	0.015	0.085	0.091	189.32	1020	-5.875	37.99
Kepler-7 b	0.441	1.622	0.061	1172.12	1609	-3.706	37.11
Kepler-74 b	0.630	0.960	0.078	239.13	1082	-4.226	133.27
Kepler-75 b	10.100	1.050	0.082	77.66	817	-5.237	2587.68
Kepler-76 b	2.010	1.360	0.027	3513.16	2118	-4.127	153.30
Kepler-77 b	0.430	0.960	0.045	402.99	1232	-3.896	79.84
Kepler-78 b	0.006	0.105	0.009	4059.65	2196	-4.420	5.72
Kepler-79 b	0.034	0.310	0.117	160.94	980	-4.607	24.81
Kepler-79 c	0.019	0.332	0.187	63.00	775	-4.363	16.22
Kepler-79 d	0.019	0.639	0.287	26.75	626	-3.603	10.44
Kepler-79 e	0.013	0.311	0.386	14.79	539	-4.441	17.02
Kepler-8 b	0.590	1.416	0.047	1321.03	1658	-3.753	55.19

Continua nella prossima pagina

Continua dalla pagina precedente

<i>Nome</i>	<i>Massa</i>	<i>Raggio</i>	<i>a</i>	<i>I</i>	<i>T_{eq}</i>	$\log_{10}(\delta)$	<i>J</i>
Kepler-87 b	1.020	1.204	0.481	12.63	519	-4.881	358.86
Kepler-87 c	0.020	0.548	0.676	6.40	437	-4.273	18.33
Kepler-9 b	0.252	0.842	0.140	53.04	742	-4.081	88.56
Kepler-9 c	0.171	0.823	0.225	20.54	586	-4.045	77.94
Kepler-91 b	0.810	01.367	0.073	2856.16	2011	-5.105	64.73
Kepler-92 b	0.202	0.313	0.118	223.06	1063	-5.562	133.36
Kepler-92 c	0.019	0.232	0.183	92.74	854	-5.021	21.08
Kepler-93 b	0.013	0.132	0.053	279.22	1124	-4.926	18.72
Kepler-94 b	0.034	0.313	0.034	234.23	1076	-4.084	22.17
Kepler-95 b	0.041	0.305	0.102	180.85	1009	-4.764	29.27
Kepler-96 b	0.027	0.238	0.125	62.62	774	-4.739	32.21
Kepler-97 b	0.011	0.132	0.036	741.56	1435	-4.814	12.75
Kepler-98 b	0.011	0.178	0.026	1539.27	1723	-4.454	7.88
Kepler-99 b	0.019	0.132	0.050	100.01	870	-5.013	36.35

Tabella 4.2: Dati relativi ai pianeti Kepler utilizzati nel nostro studio statistico. Massa e raggio sono espressi in unità gioviane; il semiasse maggiore (a) è espresso in AU; irraggiamento (I), temperatura di equilibrio, segnale di trasmissione atmosferica (δ) e Jeans escape parameter (J) sono calcolati secondo le formule 3.1, 3.2, 3.5, 3.6.

Tabella 4.3

<i>Nome</i>	<i>Massa</i>	<i>Raggio</i>	<i>a</i>	<i>I</i>	T_{eq}	$\log_{10}(\delta)$	<i>J</i>
55 Cnc e	0.025	0.171	0.015	2423.97	1930	-4.676	16.92
CoRoT-1 b	1.030	1.490	0.023	2660.56	1975	-3.597	76.87
CoRoT-10 b	2.750	0.970	0.106	33.37	661	-4.763	941.97
CoRoT-11 b	2.330	1.430	0.044	1523.71	1718	-4.249	208.27
CoRoT-12 b	0.917	1.440	0.040	723.77	1427	-3.740	98.05
CoRoT-13 b	1.308	0.885	0.051	439.54	1259	-4.493	257.77
CoRoT-14 b	7.600	1.090	0.027	2390.24	1923	-4.959	796.34
CoRoT-16 b	0.535	1.170	0.062	339.00	1180	-3.912	85.10
CoRoT-17 b	2.430	1.020	0.046	1158.59	1605	-4.866	326.10
CoRoT-18 b	3.470	1.310	0.030	902.90	1508	-4.319	385.90
CoRoT-19 b	1.110	1.290	0.052	1252.18	1636	-4.244	115.52
CoRoT-2 b	3.470	1.466	0.028	950.10	1527	-4.085	340.47
CoRoT-20 b	4.240	0.840	0.090	137.15	941	-5.207	1177.91
CoRoT-23 b	2.800	1.050	0.048	1223.11	1627	-4.895	360.10
CoRoT-24 b	0.017	0.186	0.056	127.04	923	-4.629	21.49
CoRoT-24 c	0.088	0.440	0.098	41.48	698	-4.348	62.93
CoRoT-25 b	0.270	1.080	0.058	506.15	1305	-3.676	42.09
CoRoT-26 b	0.520	1.260	0.053	1014.55	1552	-4.039	58.40
CoRoT-27 b	10.390	1.007	0.048	559.67	1338	-5.257	1694.05
CoRoT-28 b	0.484	0.955	0.060	549.95	1332	-4.430	83.58
CoRoT-29 b	0.850	0.900	0.039	373.37	1209	-4.202	171.58
CoRoT-3 b	21.660	1.010	0.057	1406.52	1684	-5.791	2796.56
CoRoT-4 b	0.720	1.190	0.090	222.61	1062	-4.050	125.09
CoRoT-5 b	0.467	1.388	0.049	718.82	1424	-3.549	51.89
CoRoT-6 b	2.960	1.166	0.086	175.64	1001	-4.597	556.88
CoRoT-7 b	0.018	0.141	0.017	1593.73	1738	-4.704	16.14
CoRoT-8 b	0.220	0.570	0.063	89.26	845	-4.230	100.28
CoRoT-9 b	0.840	1.050	0.407	4.79	407	-4.506	431.82
GJ 1132 b	0.005	0.103	0.015	19.08	575	-3.863	18.92
GJ 1214 b	0.020	0.254	0.014	14.74	539	-3.168	31.61
GJ 3470 b	0.043	0.346	0.031	38.26	684	-3.853	39.90
GJ 436 b	0.070	0.372	0.029	28.24	634	-3.966	65.19
HAT-P-1 b	0.525	1.319	0.056	507.88	1306	-3.689	66.96
HAT-P-11 b	0.081	0.422	0.053	93.79	856	-4.159	49.26
HAT-P-12 b	0.211	0.959	0.038	139.39	945	-3.403	51.14
HAT-P-13 b	0.851	1.272	0.044	1160.68	1605	-4.106	91.54
HAT-P-14 b	2.232	1.150	0.061	1001.74	1547	-4.621	275.51
HAT-P-15 b	1.946	1.072	0.096	108.24	887	-4.626	449.44
HAT-P-16 b	4.193	1.289	0.041	1163.03	1606	-4.582	444.83
HAT-P-17 b	0.534	1.010	0.088	61.63	771	-3.985	150.69
HAT-P-18 b	0.197	0.995	0.056	85.95	837	-3.437	51.93

Continua nella prossima pagina

Continua dalla pagina precedente

<i>Nome</i>	<i>Massa</i>	<i>Raggio</i>	<i>a</i>	<i>I</i>	<i>T_{eq}</i>	$\log_{10}(\delta)$	<i>J</i>
HAT-P-19 b	0.292	1.132	0.047	172.25	996	-3.442	56.86
HAT-P-2 b	9.090	1.157	0.069	798.46	1462	-5.342	1180.29
HAT-P-20 b	7.246	0.867	0.036	146.12	956	-5.052	1919.66
HAT-P-21 b	4.063	1.024	0.049	433.76	1255	-4.871	694.32
HAT-P-22 b	2.147	1.080	0.041	447.42	1265	-4.473	345.19
HAT-P-23 b	2.070	1.224	0.023	2412.78	1928	-4.151	192.70
HAT-P-24 b	0.685	1.242	0.046	1192.63	1616	-3.895	74.95
HAT-P-25 b	0.567	1.190	0.047	348.43	1188	-3.726	88.07
HAT-P-26 b	0.059	0.565	0.048	162.40	982	-3.627	23.36
HAT-P-27 b	0.620	1.020	0.040	358.39	1197	-3.906	111.56
HAT-P-28 b	0.626	1.212	0.043	599.91	1361	-3.804	83.34
HAT-P-29 b	0.778	1.107	0.067	412.07	1239	-4.147	124.57
HAT-P-3 b	0.591	0.827	0.039	277.68	1123	-4.084	139.80
HAT-P-30 b	0.711	1.340	0.042	1201.29	1619	-3.743	71.97
HAT-P-31 b	2.171	1.070	0.055	742.28	1436	-4.668	310.43
HAT-P-32 b	0.860	1.789	0.034	1753.13	1780	-3.408	59.33
HAT-P-33 b	0.762	1.686	0.050	1673.16	1759	-3.695	56.43
HAT-P-34 b	3.328	1.197	0.068	789.18	1458	-4.803	418.91
HAT-P-35 b	1.054	1.332	0.050	1035.94	1560	-4.082	111.38
HAT-P-36 b	1.832	1.264	0.024	1831.56	1799	-4.094	176.93
HAT-P-37 b	1.169	1.178	0.038	442.62	1262	-3.951	172.78
HAT-P-38 b	0.267	0.825	0.052	224.06	1064	-3.887	66.80
HAT-P-39 b	0.599	1.571	0.051	1553.56	1727	-3.680	48.50
HAT-P-4 b	0.671	1.274	0.044	1375.14	1675	-4.004	69.07
HAT-P-40 b	0.615	1.730	0.061	1619.88	1745	-3.831	44.75
HAT-P-41 b	0.800	1.685	0.043	2326.44	1910	-3.702	54.59
HAT-P-42 b	1.044	1.280	0.058	691.02	1410	-4.226	127.04
HAT-P-43 b	0.662	1.281	0.044	561.72	1339	-3.763	84.77
HAT-P-44 b	0.352	1.242	0.051	247.62	1091	-3.491	57.06
HAT-P-45 b	0.892	1.426	0.045	1228.50	1628	-3.826	84.38
HAT-P-46 b	0.493	1.284	0.058	740.97	1435	-3.812	58.77
HAT-P-49 b	1.730	1.413	0.044	3388.30	2099	-4.300	128.15
HAT-P-5 b	1.060	1.260	0.041	933.24	1520	-3.988	121.55
HAT-P-50 b	1.350	1.288	0.045	1965.30	1831	-4.308	125.71
HAT-P-51 b	0.309	1.293	0.051	332.95	1175	-3.428	44.68
HAT-P-52 b	0.818	1.009	0.037	360.98	1199	-4.030	148.53
HAT-P-53 b	1.484	1.318	0.032	1656.46	1755	-4.042	140.94
HAT-P-54 b	0.760	0.944	0.041	75.57	811	-3.941	218.06
HAT-P-55 b	0.582	1.182	0.046	491.32	1295	-3.752	83.52
HAT-P-56 b	2.180	1.466	0.042	1905.83	1817	-4.200	179.73
HAT-P-6 b	1.057	1.330	0.052	1300.24	1652	-4.072	105.69
HAT-P-7 b	1.781	1.419	0.036	3918.90	2176	-4.296	126.68
HAT-P-8 b	1.520	1.500	0.049	1395.45	1681	-4.134	132.40

Continua nella prossima pagina

Continua dalla pagina precedente

<i>Nome</i>	<i>Massa</i>	<i>Raggio</i>	<i>a</i>	<i>I</i>	<i>T_{eq}</i>	$\log_{10}(\delta)$	<i>J</i>
HAT-P-9 b	0.780	1.400	0.053	904.86	1509	-3.825	81.12
HATS-1 b	1.855	1.302	0.044	584.44	1352	-4.136	231.40
HATS-10 b	0.526	0.969	0.045	643.43	1385	-4.012	86.07
HATS-13 b	0.543	1.212	0.041	401.75	1231	-3.602	79.92
HATS-14 b	1.071	1.039	0.038	435.49	1257	-4.127	180.20
HATS-17 b	1.338	0.777	0.131	72.77	803	-4.934	470.83
HATS-2 b	1.345	1.168	0.023	1025.48	1557	-3.952	162.51
HATS-3 b	1.071	1.381	0.048	1216.27	1624	-4.000	104.87
HATS-4 b	1.323	1.020	0.036	504.64	1304	-4.227	218.54
HATS-5 b	0.237	0.912	0.054	182.95	1012	-3.678	56.43
HATS-6 b	0.319	0.998	0.036	42.71	703	-3.480	99.85
HATS-8 b	0.138	0.873	0.047	509.04	1306	-3.585	26.58
HATS-9 b	0.837	1.065	0.030	1801.55	1792	-4.249	96.34
HD 149026 b	0.368	0.813	0.043	1656.98	1755	-4.275	56.66
HD 17156 b	3.220	1.020	0.161	98.88	867	-5.170	799.46
HD 189733 b	1.150	1.156	0.031	342.42	1183	-3.925	184.68
HD 209458 b	0.640	1.320	0.046	689.31	1409	-3.703	75.57
HD 219134 b	0.012	0.143	0.038	209.37	1046	-4.672	17.57
HD 80606 b	3.940	0.980	0.449	4.34	397	-5.314	2224.42
HD 97658 b	0.024	0.200	0.080	54.84	749	-4.650	35.21
HIP 116454 b	0.037	0.226	0.091	38.00	683	-4.695	52.66
KELT-1 b	27.230	1.110	0.025	5676.32	2387	-5.559	2257.00
KELT-15 b	0.910	1.443	0.046	1199.28	1619	-3.922	85.58
KELT-2 A b	1.522	1.286	0.055	1423.91	1690	-4.461	153.86
KELT-3 b	1.477	1.345	0.041	1804.37	1793	-4.173	134.56
KELT-4 A b	0.902	1.699	0.043	1828.15	1799	-3.727	64.84
KELT-6 b	0.442	1.180	0.080	507.83	1306	-3.992	63.01
KELT-7 b	1.280	1.533	0.044	2926.47	2023	-4.030	90.66
KELT-8 b	0.867	1.860	0.046	1312.74	1656	-3.665	61.84
KELT-14 b	1.196	1.520	0.030	2183.90	1880	-3.840	91.92
Lupus-TR-3 b	0.810	0.890	0.046	175.13	1001	-4.197	199.79
OGLE-TR-056 b	1.390	1.363	0.024	3915.08	2176	-3.978	102.96
OGLE-TR-10 b	0.620	1.250	0.043	817.24	1471	-3.780	74.08
OGLE-TR-111 b	0.530	1.019	0.047	178.26	1005	-3.845	113.67
OGLE-TR-113 b	1.260	1.093	0.023	534.47	1323	-3.945	191.47
OGLE-TR-132 b	1.180	1.200	0.030	2523.98	1950	-4.095	110.79
OGLE-TR-182 b	1.010	1.130	0.051	552.10	1333	-4.143	147.25
OGLE-TR-211 b	1.030	1.360	0.051	1484.84	1707	-4.119	97.43
OGLE2-TR-L9 b	4.500	1.610	0.031	5115.12	2326	-4.344	263.93
POTS-1 b	2.310	0.941	0.037	83.96	833	-4.373	647.64
Qatar-1 b	1.275	1.136	0.023	577.14	1348	-3.903	182.87
Qatar-2 b	2.494	1.254	0.022	548.19	1331	-4.071	328.24
TrES-1 b	0.752	1.067	0.039	285.88	1131	-3.864	136.88

Continua nella prossima pagina

Continua dalla pagina precedente

<i>Nome</i>	<i>Massa</i>	<i>Raggio</i>	<i>a</i>	<i>I</i>	<i>T_{eq}</i>	$\log_{10}(\delta)$	<i>J</i>
TrES-2 b	1.197	1.247	0.037	780.16	1454	-3.937	145.05
TrES-3 b	1.910	1.336	0.023	1209.51	1622	-3.841	193.60
TrES-4 b	0.919	1.799	0.051	1750.63	1779	-3.791	63.07
TrES-5 b	1.790	1.194	0.025	802.99	1464	-4.044	224.90
WASP-1 b	0.854	1.483	0.039	1894.15	1815	-3.803	69.71
WASP-10 b	3.150	1.080	0.038	146.89	958	-4.416	669.05
WASP-100 b	2.030	1.690	0.046	3895.06	2173	-4.198	121.42
WASP-101 b	0.500	1.410	0.051	978.34	1538	-3.594	50.64
WASP-103 b	1.490	1.528	0.020	6580.50	2477	-3.853	86.46
WASP-104 b	1.272	1.137	0.029	872.57	1495	-4.036	164.38
WASP-106 b	1.925	1.085	0.092	277.10	1122	-4.723	347.27
WASP-11 b	0.487	1.005	0.044	182.00	1010	-3.781	105.36
WASP-117 b	0.276	1.021	0.095	182.45	1011	-3.854	58.63
WASP-12 b	1.410	1.790	0.023	6643.25	2483	-3.696	69.68
WASP-13 b	0.477	1.389	0.054	874.92	1496	-3.771	50.43
WASP-135 b	1.900	1.300	0.024	1452.39	1698	-3.981	189.07
WASP-14 b	7.341	1.281	0.036	2088.27	1859	-4.817	676.99
WASP-15 b	0.542	1.428	0.050	1243.30	1633	-3.706	51.04
WASP-16 b	0.855	1.008	0.042	482.25	1289	-4.076	144.55
WASP-17 b	0.490	1.740	0.051	1209.13	1622	-3.347	38.14
WASP-18 b	10.430	1.165	0.020	5548.06	2374	-4.933	828.41
WASP-19 b	1.168	1.386	0.017	3028.76	2040	-3.659	90.72
WASP-2 b	0.915	1.071	0.031	470.06	1281	-3.922	146.53
WASP-20 b	0.311	1.462	0.060	599.46	1361	-3.459	34.33
WASP-21 b	0.300	1.070	0.052	487.98	1293	-3.700	47.64
WASP-22 b	0.617	1.199	0.049	840.31	1481	-3.886	76.33
WASP-23 b	0.884	0.962	0.038	264.68	1109	-4.034	181.94
WASP-24 b	1.071	1.300	0.037	1621.64	1745	-4.003	103.68
WASP-25 b	0.580	1.220	0.047	359.05	1197	-3.663	87.22
WASP-26 b	1.028	1.281	0.040	1187.88	1615	-4.018	109.16
WASP-28 b	0.907	1.213	0.045	763.52	1446	-3.930	113.60
WASP-29 b	0.244	0.792	0.046	149.62	962	-3.834	70.35
WASP-3 b	1.760	1.290	0.032	2601.69	1964	-4.164	152.56
WASP-31 b	0.478	1.549	0.047	1018.68	1554	-3.421	43.62
WASP-32 b	3.600	1.180	0.039	985.97	1541	-4.552	434.79
WASP-33 b	2.120	1.501	0.026	8685.37	2655	-3.999	116.84
WASP-34 b	0.590	1.220	0.052	298.33	1143	-3.700	92.93
WASP-35 b	0.720	1.320	0.043	736.35	1433	-3.723	83.62
WASP-36 b	2.303	1.281	0.026	1461.63	1701	-4.073	232.20
WASP-37 b	1.800	1.160	0.045	510.43	1307	-4.254	260.71
WASP-38 b	2.691	1.094	0.075	401.26	1231	-4.779	438.90
WASP-39 b	0.280	1.270	0.049	261.62	1106	-3.309	43.78
WASP-4 b	1.216	1.330	0.023	1275.60	1644	-3.734	122.17

Continua nella prossima pagina

Continua dalla pagina precedente

<i>Nome</i>	<i>Massa</i>	<i>Raggio</i>	<i>a</i>	<i>I</i>	<i>T_{eq}</i>	$\log_{10}(\delta)$	<i>J</i>
WASP-41 b	0.940	1.180	0.040	401.25	1231	-3.855	142.14
WASP-42 b	0.527	1.122	0.056	180.20	1008	-3.776	102.38
WASP-43 b	1.780	0.930	0.014	600.38	1362	-4.076	308.78
WASP-44 b	0.889	1.140	0.035	551.11	1333	-3.899	128.53
WASP-45 b	1.002	0.992	0.040	313.21	1157	-4.185	191.74
WASP-46 b	1.910	1.174	0.023	1196.92	1618	-4.041	220.89
WASP-47 b	1.073	1.139	0.052	424.64	1249	-4.195	165.71
WASP-47 d	0.048	0.324	0.087	150.30	963	-4.595	33.66
WASP-48 b	0.907	1.396	0.033	2437.28	1933	-3.909	73.84
WASP-49 b	0.378	1.115	0.038	589.95	1356	-3.595	54.93
WASP-5 b	1.580	1.087	0.027	1409.42	1685	-4.198	189.45
WASP-50 b	1.468	1.153	0.029	620.66	1373	-4.001	203.71
WASP-52 b	0.460	1.270	0.027	473.03	1283	-3.347	62.02
WASP-54 b	0.636	1.653	0.050	1672.76	1759	-3.737	48.05
WASP-55 b	0.627	1.335	0.056	473.33	1283	-3.704	80.41
WASP-56 b	0.571	1.092	0.055	364.94	1202	-3.962	95.54
WASP-57 b	0.644	1.050	0.038	537.22	1324	-3.869	101.74
WASP-58 b	0.890	1.370	0.056	441.62	1261	-3.884	113.17
WASP-59 b	0.863	0.775	0.070	32.13	655	-4.332	373.52
WASP-6 b	0.485	1.230	0.041	323.15	1166	-3.527	74.27
WASP-60 b	0.514	0.860	0.053	501.09	1301	-4.216	100.88
WASP-61 b	2.060	1.240	0.051	1002.10	1548	-4.420	235.80
WASP-62 b	0.570	1.390	0.057	711.18	1420	-3.698	63.41
WASP-63 b	0.380	1.430	0.057	926.41	1517	-3.790	38.47
WASP-64 b	1.271	1.271	0.026	1222.48	1626	-3.940	135.06
WASP-65 b	1.550	1.112	0.033	806.85	1466	-4.204	208.86
WASP-66 b	2.320	1.390	0.055	1727.76	1773	-4.483	206.74
WASP-67 b	0.420	1.400	0.052	191.55	1023	-3.363	64.40
WASP-68 b	0.950	1.240	0.062	812.24	1468	-4.295	114.61
WASP-69 b	0.260	1.057	0.045	142.09	950	-3.491	56.90
WASP-7 b	0.960	1.330	0.062	805.94	1466	-4.064	108.18
WASP-70 A b	0.590	1.164	0.049	625.44	1376	-3.916	80.94
WASP-71 b	2.242	1.460	0.046	2894.77	2018	-4.570	167.19
WASP-72 b	1.546	1.270	0.037	3903.56	2174	-4.443	123.00
WASP-73 b	1.880	1.160	0.055	1679.61	1761	-4.776	202.17
WASP-74 b	0.950	1.560	0.037	2239.09	1892	-3.860	70.70
WASP-75 b	1.070	1.270	0.038	1402.45	1683	-4.002	109.95
WASP-76 b	0.920	1.830	0.033	3762.48	2154	-3.628	51.26
WASP-77 A b	1.760	1.210	0.024	1286.37	1647	-4.045	193.96
WASP-78 b	0.890	1.700	0.036	2426.79	1931	-3.690	59.57
WASP-79 b	0.900	2.090	0.054	1392.33	1680	-3.447	56.30
WASP-8 b	2.244	1.038	0.080	121.52	913	-4.597	519.98
WASP-80 b	0.538	0.999	0.034	77.76	817	-3.671	144.83

Continua nella prossima pagina

Continua dalla pagina precedente

<i>Nome</i>	<i>Massa</i>	<i>Raggio</i>	<i>a</i>	<i>I</i>	<i>T_{eq}</i>	$\log_{10}(\delta)$	<i>J</i>
WASP-82 b	1.240	1.670	0.045	3785.88	2158	-4.077	75.59
WASP-83 b	0.300	1.040	0.059	261.92	1107	-3.733	57.26
WASP-84 b	0.694	0.942	0.077	67.70	789	-4.081	205.11
WASP-88 b	0.560	1.700	0.064	1605.36	1741	-3.761	41.56
WASP-89 b	5.900	1.040	0.043	263.92	1109	-4.873	1124.02
WASP-90 b	0.630	1.630	0.056	1903.67	1817	-3.806	46.73
WASP-94 A b	0.452	1.720	0.055	1115.69	1590	-3.475	36.31
WASP-95 b	1.130	1.210	0.034	986.38	1541	-4.032	133.08
WASP-96 b	0.480	1.200	0.045	454.06	1270	-3.691	69.20
WASP-97 b	1.320	1.130	0.033	934.98	1521	-4.139	168.70
WASP-98 b	0.830	1.100	0.036	316.09	1160	-3.730	142.91
WASP-99 b	2.780	1.100	0.072	788.55	1458	-4.956	380.86
WTS-1 b	4.010	1.490	0.047	819.61	1472	-4.346	401.68
WTS-2 b	1.120	1.363	0.019	916.65	1513	-3.525	119.26
XO-1 b	0.920	1.210	0.049	360.93	1199	-3.892	139.31
XO-2 N b	0.597	1.019	0.037	548.34	1331	-3.945	96.69
XO-3 b	11.790	1.217	0.045	1416.15	1687	-5.177	1261.16
XO-4 b	1.780	1.330	0.056	733.40	1431	-4.413	205.38
XO-5 b	1.190	1.140	0.052	375.52	1211	-4.237	189.37

Tabella 4.3: Dati relativi ai pianeti non Kepler utilizzati nel nostro studio statistico. Massa e raggio sono espressi in unità gioviane; il semiasse maggiore (a) è espresso in AU; irraggiamento (I), temperatura di equilibrio, segnale di trasmissione atmosferica (δ) e Jeans escape parameter (J) sono calcolati secondo le formule 3.1, 3.2, 3.5, 3.6.

M_{\oplus}	100% Fe	50% Fe	30% Fe	25% Fe	20% Fe	Rock	25% H ₂ O	50% H ₂ O	100% H ₂ O
0.125	0.445	0.523	0.547	0.553	0.558	0.58	0.649	0.697	0.776
0.25	0.55	0.645	0.672	0.679	0.685	0.711	0.793	0.851	0.952
0.5	0.676	0.789	0.823	0.832	0.84	0.872	0.969	1.039	1.163
1	0.823	0.961	1.005	1.016	1.026	1.067	1.182	1.27	1.41
2	0.99	1.164	1.22	1.23	1.25	1.3	1.44	1.54	1.71
4	1.176	1.4	1.47	1.49	1.5	1.57	1.74	1.85	2.05
8	1.38	1.66	1.75	1.77	1.79	1.88	2.07	2.21	2.45
16	1.59	1.94	2.06	2.08	2.11	2.22	2.45	2.61	2.9
32	1.82	2.25	2.38	2.42	2.45	2.58	2.85	3.04	3.36

Tabella 4.4: La tabella riporta il valore del raggio planetario in funzione della massa, in unità terrestri, per diverse composizioni chimiche: ferro (Fe), silicati di magnesio (Rock) e acqua (H₂O) in diverse percentuali. Tabella tratta da Zeng et al. (2016).

M_{\oplus}	M_J	R_J	M_{\oplus}	M_J	R_J
12.92	0.041	0.59	12.92	0.041	0.523
16.68	0.052	0.796	16.68	0.052	0.698
21.54	0.068	0.924	21.54	0.068	0.812
27.83	0.088	1.006	27.83	0.088	0.888
35.94	0.113	1.057	35.94	0.113	0.941
46.42	0.146	1.085	46.42	0.146	0.975
59.95	0.189	1.101	59.95	0.189	1.007
77.43	0.244	1.12	77.43	0.244	1.043
100.0	0.315	1.146	100.0	0.315	1.075
129.15	0.406	1.165	129.15	0.406	1.099
166.81	0.525	1.177	166.81	0.525	1.117
215.44	0.678	1.182	215.44	0.678	1.127
278.26	0.875	1.182	278.26	0.875	1.132
317.89	1.0	1.183	317.89	1.0	1.134
359.38	1.131	1.184	359.38	1.131	1.137
464.16	1.46	1.185	464.16	1.46	1.14
599.48	1.886	1.187	599.48	1.886	1.143
774.26	2.436	1.186	774.26	2.436	1.147
1000.0	3.146	1.195	1000.0	3.146	1.154
1291.55	4.063	1.202	1291.55	4.063	1.158
1668.1	5.247	1.203	1668.1	5.247	1.155
2154.43	6.777	1.197	2154.43	6.777	1.145
2782.56	8.753	1.184	2782.56	8.753	1.128
3593.81	11.305	1.165	3593.81	11.305	1.105

(a) t=0.316 Gyr (b) t=1 Gyr

Tabella 4.5: La tabella riporta i valori di massa (in unità terrestri e gioviane) e raggio (in raggi gioviani) per pianeti di tipo gioviano e nettuniano previsti da Fortney et al. (2007) con $a = 0.045$ AU e $M_{core} = 10 M_{\oplus}$ all'età di 0.316 Gyr e 1 Gyr.

M_{\oplus}	M_J	R_J	M_{\oplus}	M_J	R_J
12.92	0.041	0.472	12.92	0.041	0.435
16.68	0.052	0.62	16.68	0.052	0.56
21.54	0.068	0.725	21.54	0.068	0.654
27.83	0.088	0.799	27.83	0.088	0.726
35.94	0.113	0.854	35.94	0.113	0.786
46.42	0.146	0.897	46.42	0.146	0.838
59.95	0.189	0.941	59.95	0.189	0.885
77.43	0.244	0.981	77.43	0.244	0.928
100.0	0.315	1.016	100.0	0.315	0.966
129.15	0.406	1.044	129.15	0.406	0.997
166.81	0.525	1.067	166.81	0.525	1.023
215.44	0.678	1.082	215.44	0.678	1.042
278.26	0.875	1.091	278.26	0.875	1.055
317.89	1.0	1.094	317.89	1.0	1.06
359.38	1.131	1.098	359.38	1.131	1.064
464.16	1.46	1.103	464.16	1.46	1.07
599.48	1.886	1.106	599.48	1.886	1.075
774.26	2.436	1.113	774.26	2.436	1.084
1000.0	3.146	1.12	1000.0	3.146	1.09
1291.55	4.063	1.122	1291.55	4.063	1.092
1668.1	5.247	1.118	1668.1	5.247	1.086
2154.43	6.777	1.106	2154.43	6.777	1.073
2782.56	8.753	1.086	2782.56	8.753	1.053
3593.81	11.305	1.061	3593.81	11.305	1.028

(a) t=3.1623 Gyr (b) t=10 Gyr

Tabella 4.6: La tabella riporta i valori di massa (in unita' terrestri e gioviane) e raggio (in raggi gioviani) per pianeti di tipo gioviano e nettuniano previsti da Fortney et al. (2007) con $a = 0.045$ AU e $M_{core} = 10 M_{\oplus}$ all'eta' di 3.1623 Gyr e 10 Gyr.

M_{\oplus}	M_J	R_J	M_{\oplus}	M_J	R_J
10.0	0.031	1.769	10.0	0.031	1.349
12.92	0.041	1.668	12.92	0.041	1.224
16.68	0.052	1.589	16.68	0.052	1.174
21.54	0.068	1.511	21.54	0.068	1.138
25.0	0.079	1.47	27.83	0.088	1.109
29.0	0.091	1.429	35.94	0.113	1.085
35.94	0.113	1.371	46.42	0.146	1.068
46.42	0.146	1.309	59.95	0.189	1.057
50.0	0.157	1.293	77.43	0.244	1.068
59.95	0.189	1.258	100.0	0.315	1.086
77.43	0.244	1.219	129.15	0.406	1.102
100.0	0.315	1.212	166.81	0.525	1.113
129.15	0.406	1.214	215.44	0.678	1.119
166.81	0.525	1.214	278.26	0.875	1.119
215.44	0.678	1.209	317.89	1.0	1.119
278.26	0.875	1.2	359.38	1.131	1.118
317.89	1.0	1.196	464.16	1.46	1.119
359.38	1.131	1.193	599.48	1.886	1.118
476.84	1.5	1.189	774.26	2.436	1.122
635.78	2.0	1.185	1000.0	3.146	1.127
774.26	2.436	1.183	1291.55	4.063	1.128
953.67	3.0	1.187	1668.1	5.247	1.122
1271.56	4.0	1.192	2154.43	6.777	1.109
1668.1	5.247	1.19	2782.56	8.753	1.089
2154.43	6.777	1.18	3593.81	11.305	1.063

(a) $a = 0.02$ AU (b) $a = 0.045$ AU

Tabella 4.7: La tabella riporta i valori di massa (in unità terrestri e gioviane) e raggio (in unità gioviane) previsti dall'elaborazione dei modelli di Fortney et al. (2007) per i pianeti di tipo nettuniano e gioviano, in assenza di un nucleo centrale e con $t = 3.1623$ Gyr, per semiasse maggiore $a = 0.02$ AU e $a = 0.045$ AU.

M_{\oplus}	M_J	R_J	M_{\oplus}	M_J	R_J
12.92	0.041	0.562	12.92	0.041	0.472
16.68	0.052	0.762	16.68	0.052	0.62
21.54	0.068	0.894	21.54	0.068	0.725
27.83	0.088	0.978	27.83	0.088	0.799
35.94	0.113	1.03	35.94	0.113	0.854
46.42	0.146	1.058	46.42	0.146	0.897
59.95	0.189	1.074	59.95	0.189	0.941
77.43	0.244	1.097	77.43	0.244	0.981
100.0	0.315	1.124	100.0	0.315	1.016
129.15	0.406	1.145	129.15	0.406	1.044
166.81	0.525	1.159	166.81	0.525	1.067
215.44	0.678	1.166	215.44	0.678	1.082
278.26	0.875	1.168	278.26	0.875	1.091
317.89	1.0	1.169	317.89	1.0	1.094
359.38	1.131	1.17	359.38	1.131	1.098
464.16	1.46	1.171	464.16	1.46	1.103
599.48	1.886	1.172	599.48	1.886	1.106
774.26	2.436	1.173	774.26	2.436	1.113
1000.0	3.146	1.18	1000.0	3.146	1.12
1291.55	4.063	1.186	1291.55	4.063	1.122
1668.1	5.247	1.185	1668.1	5.247	1.118
2154.43	6.777	1.176	2154.43	6.777	1.106
2782.56	8.753	1.158	2782.56	8.753	1.086
3593.81	11.305	1.133	3593.81	11.305	1.061

(a) $a = 0.02$ AU (b) $a = 0.045$ AU

Tabella 4.8: La tabella riporta i valori di massa (in unità terrestri e gioviane) e raggio (in unità gioviane) previsti dall'elaborazione dei modelli di Fortney et al. (2007) per i pianeti di tipo nettuniano e gioviano, con un nucleo centrale di $M_{core} = 10 M_{\oplus}$ e $t = 3.1623$ Gyr, per semiasse maggiore $a = 0.02$ AU e $a = 0.045$ AU.

M_{\oplus}	M_J	R_J	M_{\oplus}	M_J	R_J
27.83	0.088	0.437	27.83	0.088	0.408
35.94	0.113	0.638	35.94	0.113	0.58
46.42	0.146	0.773	46.42	0.146	0.698
59.95	0.189	0.872	59.95	0.189	0.788
77.43	0.244	0.947	77.43	0.244	0.859
100.0	0.315	1.005	100.0	0.315	0.917
129.15	0.406	1.051	129.15	0.406	0.965
166.81	0.525	1.084	166.81	0.525	1.002
215.44	0.678	1.107	215.44	0.678	1.03
278.26	0.875	1.124	278.26	0.875	1.051
317.89	1.0	1.131	317.89	1.0	1.061
359.38	1.131	1.136	359.38	1.131	1.067
464.16	1.46	1.145	464.16	1.46	1.079
599.48	1.886	1.152	599.48	1.886	1.088
774.26	2.436	1.157	774.26	2.436	1.099
1000.0	3.146	1.169	1000.0	3.146	1.109
1291.55	4.063	1.177	1291.55	4.063	1.114
1668.1	5.247	1.178	1668.1	5.247	1.111
2154.43	6.777	1.17	2154.43	6.777	1.101
2782.56	8.753	1.154	2782.56	8.753	1.082
3593.81	11.305	1.129	3593.81	11.305	1.058

(a) $a = 0.02$ AU (b) $a = 0.045$ AU

Tabella 4.9: La tabella riporta i valori di massa (in unità terrestri e gioviane) e raggio (in unità gioviane) previsti dall’elaborazione dei modelli di Fortney et al. (2007) per i pianeti di tipo nettuniano e gioviano, con un nucleo centrale di $M_{core} = 25 M_{\oplus}$ e $t = 3.1623$ Gyr, per semiasse maggiore $a = 0.02$ AU e $a = 0.045$ AU.

M_{\oplus}	M_J	R_J	M_{\oplus}	M_J	R_J
59.95	0.189	0.539	59.95	0.189	0.508
77.43	0.244	0.706	77.43	0.244	0.656
100.0	0.315	0.821	100.0	0.315	0.761
129.15	0.406	0.905	129.15	0.406	0.841
166.81	0.525	0.971	166.81	0.525	0.905
215.44	0.678	1.018	215.44	0.678	0.952
278.26	0.875	1.055	278.26	0.875	0.991
317.89	1.0	1.07	317.89	1.0	1.006
359.38	1.131	1.082	359.38	1.131	1.019
464.16	1.46	1.104	464.16	1.46	1.042
599.48	1.886	1.119	599.48	1.886	1.059
774.26	2.436	1.133	774.26	2.436	1.077
1000.0	3.146	1.15	1000.0	3.146	1.091
1291.55	4.063	1.161	1291.55	4.063	1.099
1668.1	5.247	1.166	1668.1	5.247	1.1
2154.43	6.777	1.16	2154.43	6.777	1.091
2782.56	8.753	1.146	2782.56	8.753	1.075
3593.81	11.305	1.123	3593.81	11.305	1.052

(a) $a = 0.02$ AU (b) $a = 0.045$ AU

Tabella 4.10: La tabella riporta i valori di massa (in unità terrestri e gioviane) e raggio (in unità gioviane) previsti dall'elaborazione dei modelli di Fortney et al. (2007) per i pianeti di tipo nettuniano e gioviano, con un nucleo centrale di $M_{core} = 50 M_{\oplus}$ e $t = 3.1623$ Gyr, per semiasse maggiore $a = 0.02$ AU e $a = 0.045$ AU.

M_{\oplus}	M_J	R_J	M_{\oplus}	M_J	R_J
129.15	0.406	0.619	129.15	0.406	0.592
166.81	0.525	0.754	166.81	0.525	0.715
215.44	0.678	0.851	215.44	0.678	0.805
278.26	0.875	0.924	278.26	0.875	0.874
317.89	1.0	0.955	317.89	1.0	0.904
359.38	1.131	0.981	359.38	1.131	0.928
464.16	1.46	1.023	464.16	1.46	0.969
599.48	1.886	1.056	599.48	1.886	1.005
774.26	2.436	1.087	774.26	2.436	1.035
1000.0	3.146	1.114	1000.0	3.146	1.058
1291.55	4.063	1.131	1291.55	4.063	1.071
1668.1	5.247	1.14	1668.1	5.247	1.077
2154.43	6.777	1.141	2154.43	6.777	1.074
2782.56	8.753	1.13	2782.56	8.753	1.061
3593.81	11.305	1.111	3593.81	11.305	1.042

(a) $a = 0.02$ AU (b) $a = 0.045$ AU

Tabella 4.11: La tabella riporta i valori di massa (in unità terrestri e gioviane) e raggio (in unità gioviane) previsti dall'elaborazione dei modelli di Fortney et al. (2007) per i pianeti di tipo nettuniano e gioviano, con un nucleo centrale di $M_{core} = 100 M_{\oplus}$ e $t = 3.1623$ Gyr, per semiasse maggiore $a = 0.02$ AU e $a = 0.045$ AU.

Bibliografia

- [1] , Almenara J.M. et al., *SOPHIE velocimetry of Kepler transit candidates. XV. KOI-614b, KOI-206b, and KOI-680b: a massive warm Jupiter orbiting a G0 metallic dwarf and two highly inflated planets with a distant companion around evolved F-type stars*, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 575, 2015
- [2] Alonso R., *The Transatlantic Exoplanet Survey (TReS): a review* , *Transiting Extrasolar Planets Workshop*, vol. 366 di *ASP ConfSer*, p. 13 – 22, 2002
- [3] Akeson R.L. et al., *The NASA Exoplanet Archive: Data and Tools for Exoplanet Research*, *Publications of the Astronomical Society of Pacific*, vol. 125, p. 989 – 999, 2013
- [4] Auvergne M., *The CoRoT satellite in flight: description and performance*, *Astronomy and Astrophysics*, vol. 506, p.411 – 424, 2009
- [5] Bakos G. et al., *Wide-Field Millimagnitude Photometry with the HAT: A Tool for Extrasolar Planet Detection*, *The Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, vol. 116, p. 266 – 277, 2004
- [6] Bakos G. et al., *HAT-South: A Global Network of Southern Hemisphere Automated Telescopes to Detect Transiting Exoplanets*, *IAU Symposium* vol. 253, p. 354 – 357, 2009
- [7] Batalha N.M. et al., *VizieR Online Data Catalog: Kepler planetary candidates. III, VizieR On-line Data Catalog: J/ApJS/204/24* originally published by *The Astrophysical Journal Supplement*, 2013
- [8] Borucki W.J. et al., *Kepler Planet-Detection Mission: Introduction and First Results*, *Science*, vol. 327, p. 977, 2010
- [9] Buchhave et al., *Kepler-14b: A Massive Hot Jupiter Transiting an F Star in a Close Visual Binary*, *The Astrophysical Journal Supplement*, vol. 197, 2011
- [10] Cabrera J. et al., *Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. XXVII. CoRoT-28b, a planet orbiting an evolved star, and CoRoT-29b, a planet showing an asymmetric transit*, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 579, 2015
- [11] Charbonneau D. et al., *Detection of Planetary Transits Across a Sun-like Star*, *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 529, 2000
- [12] Chen J. & Kipping D., *Probabilistic Forecasting Of The Masses And Radii Of Other Worlds*, 2016

- [13] Ciceri S. et al., *Kepler-432 b: a massive planet in a highly eccentric orbit transiting a red giant*, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 573, 2015
- [14] Collier-Cameron A., *The WASP transit surveys, IAU Symposium*, vol. 253, p. 29 – 35, 2009
- [15] Collier-Cameron A., *Line-profile tomography of exoplanet transits - II. A gas-giant planet transiting a rapidly rotating A5 star*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 407, p. 507 – 514, 2010
- [16] , Dumusque X. et al., *The Kepler-10 Planetary System Revisited by HARPS-N: A Hot Rocky World and a Solid Neptune-Mass Planet*, *The Astrophysical Journal*, vol. 789, 2014
- [17] Enoch B. et al., *Factors affecting the radii of close-in transiting exoplanets*, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 540, 2012
- [18] Esteves L.J. et al., *Changing Phases of Alien Worlds: Probing Atmospheres of Kepler Planets with High-precision Photometry*, *The Astrophysical Journal*, vol. 804, 2015
- [19] Fischer D.A. et al., *Exoplanet Detection Techniques, Protostars and Planets VI*, University of Arizona Press, Tucson, p. 715 – 737, 2014
- [20] Fortney J.J. et al., *Planetary Radii across Five Orders of Magnitude in Mass and Stellar Insolation: Application to Transits*, *The Astrophysical Journal*, vol. 659, p. 1661 – 1672, 2007
- [21] Henry G.W. et al., *A Transiting “51 Peg-like” Planet*, *The Astrophysical Journal*, vol. 529, 2000
- [22] Howard A.W., *Observed Properties of Extrasolar Planets*, *Science*, vol. 340, p. 572 – 576, 2013
- jones:giant* Jones M.I. et al., *The properties of planets around giant stars*, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 566, 2014
- [23] Kane S.R. & Gelino D.M., *The Habitable Zone Gallery, Publications of the Astronomical Society of Pacific*, vol. 124, p. 323 – 328, 2012
- [24] Koch D.G. et al., *Kepler Mission Design, Realized Photometric Performance and Early Science*, *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 713, 2010
- [25] Kovacs G. et al., *Comprehensive time series analysis of the transiting extrasolar planet WASP-33b*, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 553, 2013
- [26] Kriedberg L. et al., *Clouds in the atmosphere of the super-Earth exoplanet GJ1214b*, *Nature*, vol. 505, 2014
- [27] Lammer H. et al., *Identifying the ‘true’ radius of the hot sub-Neptune CoRoT-24b by mass-loss modelling*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, vol. 461, 2016
- [28] Laughlin G. & Lissauer J.J., *Exoplanetary Geophysics—An Emergin Discipline*, Review chapter to appear in *Treatise on Geophysics*, 2nd Edition, 2015

- [29] Lillo-Box J. et al., *Kepler-91b: a planet at the end of its life. Planet and giant host star properties via light-curve variations*, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 562, 2014
- [30] Lillo-Box J. et al., *Kepler-447b: a hot-Jupiter with an extremely grazing transit*, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 577, 2015
- [31] Lissauer J.J. et al., *A closely packed system of low-mass, low-density planets transiting Kepler-11*, *Nature*, vol. 470, 2011
- [32] McCullough P.R. et al., *The XO Project: Searching for Transiting Extrasolar Planet Candidates*, *The Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, vol. 117, p. 783–795, 2005
- [33] Moutou C. et al., *CoRoT-22 b: a validated $4.9 R_{\oplus}$ exoplanet in 10-d orbit*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 444, p. 2783–2792, 2014
- [34] Pepe F.A. & Lovis C., *From HARPS to CODEX: exploring the limits of Doppler measurements*, *Physica Scripta*, vol. 130, 2008
- [35] Pepe F.A. et al., *An Earth-sized planet with an Earth-like density*, *Nature*, vol. 503, 2013
- [36] Perryman M., *The Exoplanet Handbook*, Cambridge University Press, New York, 2014
- [37] Rauer H. et al., *The PLATO 2.0 mission*, *Experimental Astronomy*, vol. 38, p. 249–330, 2014
- [38] Ricker G.R. et al., *Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS)*, *Proceedings of the SPIE*, vol. 9143, 2014
- [39] Sanchis-Ojeda R. et al., *Alignment of the stellar spin with the orbits of a three-planet system*, *Nature*, vol. 487, pp. 449–453, 2012
- [40] Sanchis-Ojeda R. et al., *Transits and Occultations of an Earth-sized Planet in an 8.5 hr Orbit*, *The Astrophysical Journal*, vol. 774, 2013
- [41] Sahu K.C. et al., *Planets in the Galactic Bulge: Results from the SWEEPS Project*, *Extreme Solar Systems*, vol. 398 di *ASP ConfSer*, p. 93, 2007
- [42] Seager S. et al., *Mass-Radius Relationships for Solid Exoplanets*, *The Astrophysical Journal*, vol. 669, p. 1279–1297, 2007
- [43] Seager S., *Exoplanets*, University of Arizona Press, Tucson, 2010
- [44] Sing D.K. et al., *A continuum from clear to cloudy hot-Jupiter exoplanets without primordial water depletion*, *Nature*, vol. 529, p. 59–62, 2016
- [45] Smith A.M.S. et al., *Thermal emission from WASP-33b, the hottest known planet*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 416, p. 2096–2101, 2011
- [46] Steffen J.H. et al., *Transit timing observations from Kepler - VII. Confirmation of 27 planets in 13 multiplanet systems via Transit Timing Variations and orbital stability*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 428, p. 1077–1087, 2013

- [47] Steffen J.H., *Sensitivity bias in the mass-radius distribution from Transit Timing Variations and Radial Velocity measurements*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 457, p. 4384 – 4392, 2015
- [48] Udalsky A. et al., *The Optical Gravitational Lensing Experiment. Search for Planetary and Low-Luminosity Object Transits in the Galactic Disk. Results of 2001 Campaign*, *Acta Astronomica*, vol. 52, p.1-37, 2002
- [49] Udalsky A., *Transit Campaigns of the OGLE-III Survey*, *Transiting Extrasolar Planets Workshop*, vol. 366 di *ASP ConfSer*, p. 51 – 57, 2007
- [50] Valencia D. et al., *Internal Structure of massive terrestrial planet, Icarus*, vol. 181, p. 545, 2006
- [51] Wang J. et al., *Influence of Stellar Multiplicity on Planet Formation. I. Evidence of Suppressed Planet Formation due to Stellar Companions within 20 AU and Validation of Four Planets from the Kepler Multiple Planet Candidates*, *The Astrophysical Journal*, vol. 783, 2014
- [52] Weiss L.M. & Marcy G.W., *The Mass-Radius Relation for 65 Exoplanets Smaller than 4 Earth Radii*, *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 783 n.°1, 2014
- [53] Wolfgang A. et al., *MR relation: Posterior predictive mass distribution*, *ArXiv e-prints*, 2015
- [54] Wolszczan A. & Frail D.A., *A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12*, *Nature*, vol. 355, p. 145-147, 1992
- [55] Xie J.W., *Transit Timing Variation of Near-resonance Planetary Pairs. II. Confirmation of 30 Planets in 15 Multiple-planet Systems*, *The Astrophysical Journal Supplement*, vol. 210, 2014
- [56] Zeng L. & Sasselov D., *A Detailed Model Grid for Solid Planets from 0.1 through 100 Earth Masses*, *Publications of the Astronomical Society of Pacific*, vol. 125, p. 227, 2013
- [57] Zeng L. et al., *Mass-Radius Relation for Rocky Planets based on PREM*, *The Astrophysical Journal*, vol. 819, 2016