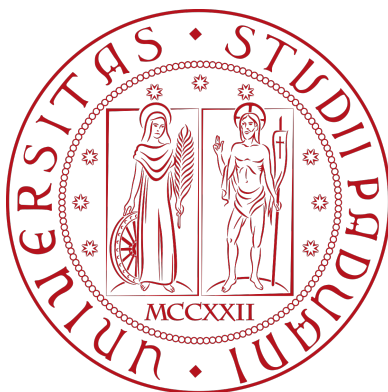




UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea triennale in Astronomia

Tesi di Laurea

Le prospettive per lo studio degli effetti mareali negli esopianeti transitanti nell’era di TESS e PLATO

Relatore

Prof. Giampaolo Piotto

Correlatore

Dr. Valerio Nascimbeni

Laureanda

Linda Giuliani

Anno Accademico 2022/2023

Sommario

In questo lavoro di tesi si è analizzato il fenomeno del rallentamento mareale in una particolare tipologia di sistemi planetari, quelli che ospitano cosiddetti hot Jupiter (pianeti giganti con periodi orbitali di pochi giorni), riassumendo prima le tecniche di individuazione degli esopianeti tramite transiti, gli effetti del tidal decay su questi pianeti e passando poi in rassegna le caratteristiche delle missioni TESS e della missione spaziale europea PLATO.

In seguito si è compilata una lista di hot Jupiters, che sono stati monitorati dalla missione TESS e che cadono all'interno del futuro campo di vista di lunga durata di PLATO. Di questi pianeti sono stati estratti e comparati i parametri fisici e orbitali che permettono di stimare l'ampiezza dell'effetto di rallentamento mareale sull'evoluzione del periodo orbitale, ovvero sui tempi di transito. Seguendo una trattazione semplificata, sono stati ricavati dei valori stimati di dP/dt e di *time shift* orbitale, ovvero di deviazione dei tempi di transito rispetto ad una effemeride lineare che assume un periodo costante. Per avere una prima idea di quale siano i migliori candidati del campione in termini di ampiezza e misurabilità dell'effetto, è stata effettuata un'approssimazione: si è considerato un tidal quality factor pari al valore solare. In questo modo il time shift stimato risulta dipendente solo dal periodo orbitale P_{orb} , dalla massa del pianeta M_p e dalla baseline delle osservazioni T_{dur} , dunque è una quantità di facile calcolo.

Si sono quindi individuati i sistemi planetari più promettenti del campione, ovvero quelli con il T_{shift} più grande e di conseguenza più facilmente misurabile :

- WASP-121, con un $T_{shift} \approx 17 \pm 1.1$ s,
- WASP-64, con un $T_{shift} \approx 5.3 \pm 0.28$ s,
- WASP-122, con un $T_{shift} \approx 2.5 \pm 0.062$ s.

Indice

1	Introduzione	1
1.1	La tecnica dei transiti	1
1.2	Il rallentamento mareale	3
1.3	TESS e PLATO	5
1.3.1	TESS	5
1.3.2	PLATO	6
2	Selezione del campione	9
3	Analisi del campione	23
	Conclusioni e prospettive future	29

Capitolo 1

Introduzione

Dall’annuncio dalla scoperta del primo esopianeta da parte di [Mayor and Queloz \(1995\)](#), migliaia di pianeti extrasolari sono stati scoperti, e le tecniche di ricerca e lo studio di questi pianeti si sono ampiamente sviluppati.

Per individuare un esopianeta si può procedere attraverso un’osservazione diretta oppure tramite una rivelazione indiretta. Poiché solo in circostanze molto particolari è possibile osservare direttamente al telescopio un esopianeta, si utilizzano prevalentemente metodi indiretti di rilevamento, ovvero non si osserva direttamente il pianeta ma si osservano gli effetti che esso induce sulla sua stella ospite.

Tra le varie tecniche che vengono utilizzate, una di quelle più fruttuose è la cosiddetta tecnica dei transiti.

1.1 La tecnica dei transiti

La tecnica dei transiti è una tecnica fotometrica, che consiste nello studio delle diminuzioni di luminosità periodiche e regolari nella curva di luce di una stella che avvengono in corrispondenza del transito del pianeta di fronte ad essa ([Deeg and Belmonte, 2018](#)). Questo fenomeno chiaramente può avvenire solo quando il piano orbitale del pianeta è parallelo o quasi alla linea di vista dell’osservatore, una caratteristica che quindi riguarda una piccola percentuale di pianeti extrasolari.

La probabilità che un pianeta abbia un’orbita (assunta circolare) inclinata in modo favorevole affinché si verifichi un transito è pari a

$$p = \frac{R_{\star}}{a} = 0.005 \left(\frac{R_{\star}}{R_{\odot}} \right) \left(\frac{a}{1 \text{ au}} \right)^{-1} \quad (1.1)$$

con $R_{\star}$ raggio della stella, $R_{\odot}$ raggio del Sole e a semiasse maggiore dell’orbita del pianeta [Winn \(2010\)](#).

Inoltre, il segnale di transito è chiaramente meglio rivelabile quanto più è grande il raggio del pianeta, in quanto un raggio maggiore comporta un abbassamento più significativo della curva di luce. Più in dettaglio, è facile vedere che in prima approssimazione la

profondità del transito d è proporzionale al rapporto tra le aree di pianeta e stella, ovvero

$$d = \left(\frac{R_p}{R_\star} \right)^2 \quad (1.2)$$

Quella dei transiti è una tecnica che permette in primo luogo la scoperta di nuovi pianeti, andando a monitorare un'ampia area di cielo, con un gran numero di stelle per lungo tempo, verificando se sono presenti diminuzioni di luminosità periodiche per qualcuna di queste stelle (anche se non è sufficiente questo per poter dichiarare la scoperta di un pianeta, è necessario associare il transito a dati ottenuti tramite altre tecniche di indagine). In secondo luogo, se utilizzata su pianeti extrasolari già scoperti, permette di ricavare parametri importanti che consentono una migliore caratterizzazione dell'esopianeta.

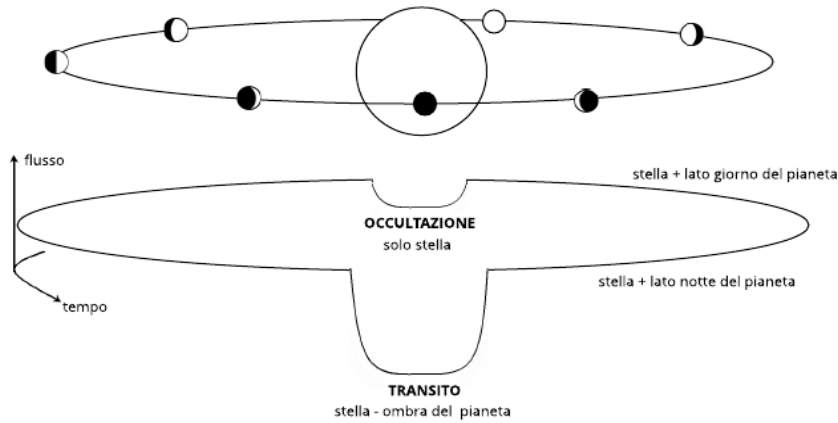


Figura 1.1: Rappresentazione schematica della geometria di un transito planetario, riadattato da [Deeg and Belmonte \(2018\)](#)

Dallo schema in Figura 1.1 si può notare che oltre alla diminuzione di flusso quando l'esopianeta passa davanti alla sua stella ospite, il flusso che si riceve quando invece il pianeta viene nascosto dalla stella stessa, in quella che si chiama *eclisse secondaria* o *occultazione*, diminuisce anch'esso leggermente: questo perché il flusso che si riceve dalla stella quando il pianeta non si trova sulla congiungente osservatore-stella è dato dalla somma della luce stellare più la luce che viene riflessa dal lato illuminato del pianeta, per quanto questa rappresenti un piccolo contributo. Per questo motivo, anche nel momento in cui il pianeta viene occultato dalla stella, si verifica una leggera diminuzione di flusso nella curva di luce.

Come scritto più sopra, dalla forma della curva di luce durante il transito si riesce a stimare, oltre al periodo orbitale, l'inclinazione, il rapporto $a/R_\star$, il raggio del pianeta. Questo dato, se combinato con la massa del pianeta, informazione da ottenere attraverso altri metodi di indagine quali la tecnica delle velocità radiali, può essere utilizzato per rica-

vare la densità del pianeta, parametro fondamentale per avere un'idea della sua struttura interna.

Con il transito di un pianeta è anche possibile caratterizzare la sua atmosfera tramite la tecnica detta *spettroscopia di trasmissione*: durante il transito, una parte della luce stellare viene assorbita dall'atmosfera planetaria, che lascia una impronta molto specifica nello spettro della stella, e da ciò è possibile studiarne la sua composizione e le sue condizioni fisico-chimiche. All'opposto, quando il pianeta è occultato dalla stella, viene meno la componente di luce riflessa da esso: la differenza di flusso tra quando il pianeta è visibile e durante l'eclissi secondaria, fornisce importanti informazioni riguardo la temperatura di brillantezza superficiale del pianeta, l'albedo planetaria, e le sue caratteristiche spettrali. Tale tecnica è nota come *spettroscopia di emissione*.

1.2 Il rallentamento mareale

Tramite la tecnica dei transiti è stato scoperto nel 2008 WASP-12b, un pianeta extra-solare di massa $1.47 M_J$ (M_J essendo la massa di Giove), in orbita intorno a una stella di tipo F, con un periodo di rivoluzione di 1.09 giorni [Hebb et al. \(2009\)](#). WASP-12b è un cosiddetto *hot Jupiter*: sono definiti hot Jupiters tutti i pianeti giganti gassosi di massa simile alla massa di Giove, ma che si trovano in orbita nelle vicinanze della loro stella ospite, con un periodo orbitale di massimo 5 giorni. Dalla scoperta di WASP-12b ad oggi, le osservazioni hanno mostrato una costante decrescita del suo periodo orbitale pari a $29 \pm 2 \text{ ms yr}^{-1}$.

In linea di principio, sono diversi i fenomeni che potrebbero spiegare tale variazione del periodo orbitale di un pianeta: potrebbe essere dovuta ad un'interazione con altri pianeti in orbita, oppure ad un effetto di precessione orbitale, o ad una perdita di massa da parte del pianeta, o ancora ad un effetto cinematico dovuto ad un'accelerazione da parte della stella ospite rispetto nella direzione dell'osservatore. Dopo accurati studi però si è potuto dimostrare che la decrescita del periodo di WASP-12b è dovuta effettivamente ad un effetto di decadimento mareale ([Yee et al., 2019](#)).

Il *tidal decay*, o *rallentamento mareale*, è un effetto dovuto alle interazioni mareali tra stella e pianeta: forze mareali sono presenti sempre nelle interazioni tra due o più corpi estesi, ma tanto più il pianeta è vicino alla stella e tanto più il pianeta è massiccio, quindi in particolare nel caso degli hot Jupiters, tanto più gli effetti mareali possono condurre a un decadimento orbitale nel tempo. Questo avviene quando le forze mareali, agendo sul pianeta, generano un'energia mareale che viene dissipata all'interno del pianeta, rilasciando calore e causando una perdita di energia meccanica nel moto orbitale e quindi una diminuzione del raggio orbitale del pianeta attorno alla stella. Dunque il pianeta si avvicina gradualmente alla stella, diminuendo il proprio periodo orbitale e spostandosi verso orbite a potenziale gravitazionale progressivamente minore.

I meccanismi di dissipazione delle oscillazioni mareali in calore da parte delle stelle non sono ancora noti in ogni dettaglio, ma il tasso di cambiamento del periodo orbitale di

un pianeta sottoposto a forze mareali, sotto determinate assunzioni, risulta descritto da [Patra et al. \(2020\)](#) e [Ogilvie \(2014\)](#) tramite la formula:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{-27\pi}{2Q'_\star} \frac{M_p}{M_\star} \left(\frac{R_\star}{a} \right)^5 \quad (1.3)$$

dove M_p è la massa del pianeta, $M_\star$ è la massa della stella, $R_\star$ il raggio della stella, a il raggio orbitale (assumendo un'orbita circolare) e $Q'_\star$ il *tidal quality factor* ridotto. Quest'ultimo è dato da $Q'_\star = Q_\star/k_2$, con k_2 *tidal Love number*, ovvero rappresenta una normalizzazione di $Q_\star$, il *tidal quality factor*, che è un parametro che rappresenta la capacità di un oggetto di dissipare energia mareale. Valori elevati di $Q_\star$ indicano che l'oggetto è in grado di dissipare energia mareale in modo più efficiente rispetto a valori bassi, quindi maggiore il valore di $Q_\star$, più lento sarà il decadimento mareale del pianeta ([Bonomo et al., 2017](#)). Il tidal quality factor dipende da diverse proprietà fisiche del corpo, come la sua densità, la sua viscosità e la sua rigidità. In generale, i corpi più densi e rigidi hanno un valore di tidal quality factor più alto, mentre i corpi meno densi e più viscosi hanno un valore di tidal quality factor più basso. Inoltre più il pianeta è massiccio e più è vicino alla stella, tanto più il decadimento mareale sarà veloce.

Nell'espressione (1.3) si è assunta un'orbita planetaria circolare, una velocità angolare di rotazione della stella molto minore della velocità angolare orbitale, e si è trascurata la tidal dissipation del pianeta. Questa è sicuramente una formulazione semplificata, ma la dipendenza dal rapporto tra le masse e la forte dipendenza dalla separazione orbitale sono in generale valide per le teorie mareali, e permettono di effettuare delle considerazioni valide in prima approssimazione.

Questo fenomeno non è interessante solo dal punto di vista della struttura stellare, bensì ha importanti conseguenze per l'evoluzione dei sistemi planetari. Se il decadimento orbitale è piuttosto rapido, potrebbe interferire con la sopravvivenza a lungo termine del pianeta. Ovvero, il pianeta potrebbe avvicinarsi alla stella e superare il limite di distruzione, dove appunto l'effetto di marea sarebbe così forte da disgregare il corpo. Questo avviene su lunghe scale temporali, più lunghe del tempo di vita attuale dei pianeti che conosciamo, quindi è un fenomeno che attualmente è impossibile osservare.

Oltre A WASP-12 b, un altro sistema planetario in cui si è recentemente evidenziata una decrescita di periodo orbitale e per cui si sono escluse altre possibili motivazioni, lasciando come unica possibilità quella di un effetto di decadimento mareale, è Kepler-1658, un hot Jupiter molto massiccio di massa pari a $5.9 M_J$. Il periodo orbitale di Kepler-1658b risulta in decrescita con un tasso di $\frac{dP}{dt} = 131^{+20}_{-22}$ ms yr⁻¹, che implica un tidal quality factor pari a $Q'_\star = 2.50^{+85}_{-62} \times 10^4$ ([Vissapragada et al., 2022](#)).

Continuano le ricerche per trovare evidenze di questo effetto in altri hot Jupiters. In particolare, nel giro di qualche anno, si avranno a disposizione una gran quantità di nuovi dati forniti da strumentazione d'avanguardia (descritti nella sezione che segue) che potranno essere utilizzati per questo scopo.

1.3 TESS e PLATO

1.3.1 TESS

Tra le più importanti missioni dedicate alla ricerca e allo studio di pianeti extrasolari c'è TESS, Transiting Exoplanet Survey Satellite, una missione NASA condotta dal MIT. Il lancio di TESS è avvenuto il 18 aprile 2018, ed è una missione ancora attiva.

Il telescopio spaziale TESS è formato da quattro camere con lenti grandangolari, ottimizzate per osservare ad una lunghezza d'onda di 600-1000 nm, ognuna dotata di un mosaico di quattro CCD, caratterizzati da basso rumore e basso consumo, da 16.8 Mpix e campo visivo di $24^\circ \times 24^\circ$. Il campo di vista complessivo ha quindi una dimensione angolare pari a $24^\circ \times 96^\circ$, ed è denominata *settore*. La missione iniziale di TESS, che ha impiegato i primi due anni successivi al lancio, ha mappato la quasi totalità del cielo settentrionale e meridionali con 26 settori successivi. I settori si sovrappongono parzialmente ai poli eclittici, in una zona che viene quindi osservata con una copertura temporale fino ad un anno, e sono le stesse regioni di cielo ottimalmente osservabili dal James Webb Space Telescope, lanciato a fine 2021, in quanto i poli eclittici coincidono con la sua zona di osservazione continua. TESS si trova in un'orbita terrestre altamente ellittica, con un'orbita di 13.7 giorni e in risonanza orbitale 2:1 con la Luna, per assicurare una visione libera dell'emisfero nord e sud celesti (Ricker et al., 2014).

L'obiettivo della missione primaria di TESS era esaminare per due anni tutta la sfera celeste, osservando 200 000 stelle di classe spettrale F5-M5 per creare un catalogo di centinaia di candidati esopianeti attraverso la tecnica fotometrica dei transiti. In particolare ha osservato stelle per scoprire pianeti con periodo inferiore a 10 giorni con raggio $< 2.5R_\oplus$ ($R_\oplus$ raggio terrestre) in orbita attorno alle stelle più brillanti dei dintorni solari e pianeti con raggio $\geq 2.5R_\oplus$ distribuiti in tutta la sfera celeste. Inoltre ha ricercato esopianeti con periodo lungo fino a 120 giorni nelle circa 10 000 stelle localizzate nelle regioni attorno i poli. In seguito alla compilazione di questo catalogo, una serie di osservazioni di follow-up condotte da terra hanno verificato se i candidati fossero veri pianeti extrasolari.

Durante la missione primaria lo strumento ha osservato per 27.4 giorni ogni settore mappando il cielo nord nel primo anno e il cielo sud nel secondo anno. Ogni camera effettuava misure con una cadenza di due minuti su un campione di stelle prioritaria precedentemente selezionate, e ogni trenta minuti scaricava a terra le immagini a tutto campo per cercare nuovi transiti su un insieme molto più vasto di stelle. Al termine della missione primaria TESS ha osservato il 75% della sfera celeste con una mappatura a 26 settori, scoprendo 66 nuovi pianeti extrasolari confermati e 2100 candidati.

La prima estensione di missione per TESS è avvenuta dal 2020 al 2022. In questi anni il telescopio spaziale ha continuato le sue osservazioni in modo leggermente diverso: con una cadenza di due minuti per il campione principale, con una cadenza molto più rapida di 20 secondi per un piccolo insieme selezionato di oggetti, e ogni 10 minuti per le osservazioni a tutto campo, invece di 30. La missione è stata estesa per una seconda volta da settembre 2022 a settembre 2023, con tecniche uguali alla prima estensione ma scaricando immagini

a tutto campo ogni 200 secondi. Ad ora, TESS ha scoperto 291 pianeti confermati con più di 6000 candidati.

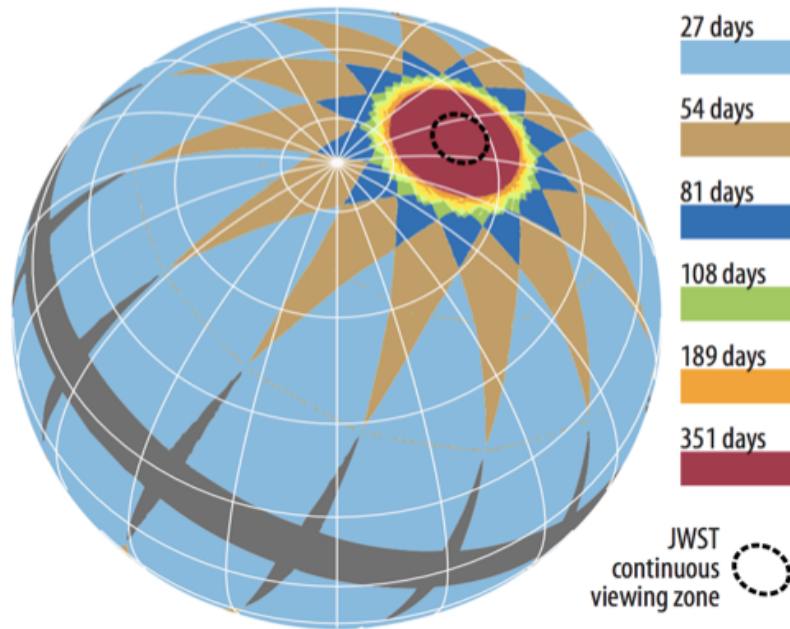


Figura 1.2: Copertura sulla volta celeste delle osservazioni di TESS effettuate durante la missione primaria. La durata complessiva delle osservazioni è codificata nella scala di colore.

1.3.2 PLATO

PLANetary Transit and Oscillations of stars, ovvero PLATO, è una missione ESA in corso di preparazione, programmata per il lancio a fine 2026. PLATO si concentrerà sulla scoperta di esopianeti transitanti attorno a stelle brillanti e vicine, con una particolare attenzione alla ricerca di pianeti rocciosi in orbita attorno a stelle di tipo solare e nella zona abitabile. La missione ha una durata iniziale prevista di 4 anni, con possibile estensione ad 8 anni.

Il design ottico di PLATO si basa su 26 camere con una pupilla d'ingresso dal diametro di 12 cm, ottimizzate per osservare ad una lunghezza d'onda di 450-1000 nm. Le camere non punteranno tutte lo stesso oggetto, ma sono organizzate in 4 gruppi da 6 con linee di vista sfalsate, più due camere per osservazioni a cadenza rapida e con informazione sul colore. Il campo di vista di PLATO sarà quindi molto ampio, di circa $49^\circ \times 49^\circ$, e quindi potrà osservare simultaneamente circa il 5% della sfera celeste.

I dettagli della strategia osservativa di PLATO non sono ancora formalmente definiti, ma consisteranno in due fasi principali: ci saranno fino a due aree monitorate durante una Long-duration Observation Phase, ovvero una fase di osservazione a lunga durata (campi LOP), e questi campi saranno integrati da osservazioni più brevi durante la "Step and stare" Observation Phase (campi SOP), che espanderanno il totale dell'area di cielo

osservata al 40%. Attualmente è in corso la delicata fase di selezione dei campi di vista che PLATO osserverà nei suoi anni di operatività. In particolare, per la Long-duration Observation Phase (LOP), attualmente si sono individuati due campi LOP provvisori, uno per ciascun emisfero, chiamati LOPS1 (LOP field South 1) e LOPN1 (LOP field North 1), che verranno osservati per due anni ciascuno. (Nascimbeni et al., 2022). Tramite comunicazione privata si è già a conoscenza di una versione aggiornata dei campi di vista di PLATO a sud per la Long-duration Phase, chiamato LOPS2, che risulta spostato per motivi ingegneristici di qualche grado verso il polo eclittico sud. Non sono campi ancora ufficialmente approvati dallo science team, ma verosimilmente saranno molto vicini o coincidenti con la scelta finale per i campi di vista di PLATO.

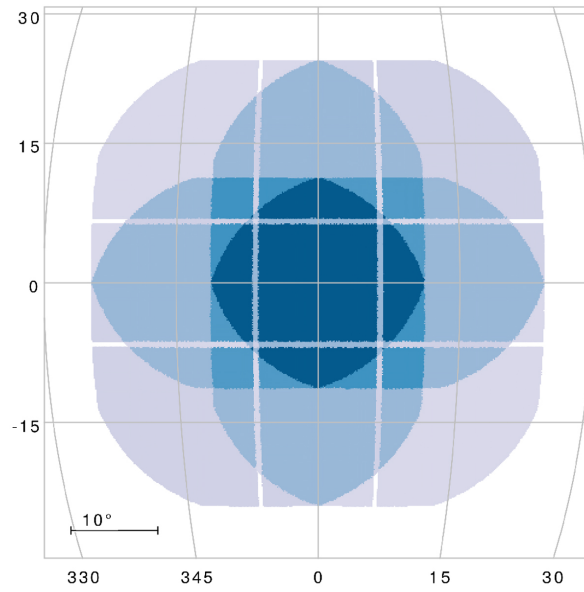
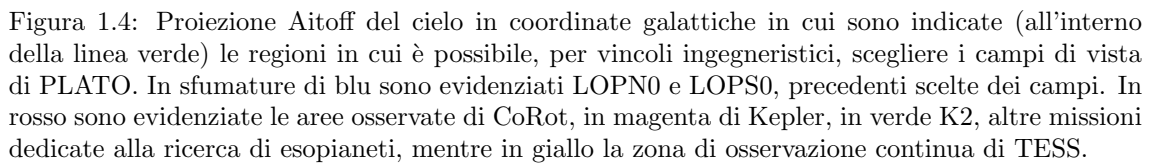


Figura 1.3: Geometria del campo di vista simultaneo di PLATO, con le aree di sovrapposizione delle camere codificate in diverse sfumature di blu. Partendo dalla sfumatura più intensa, abbiamo sovrapposizioni di 24, 18, 12 e 6 telescopi.



Capitolo 2

Selezione del campione

L'obiettivo di questo lavoro è individuare i sistemi planetari più favorevoli per uno studio sugli effetti di decadimento mareale combinando i dati di letteratura con le future osservazioni di PLATO.

Al fine di selezionare un campione iniziale, in Figura 2.1 sono evidenziati tutti i pianeti extrasolari solidamente confermati (ovvero, con sia la massa che il raggio misurati) che si trovano all'interno del campo di vista LOPS2 di PLATO; i pianeti sono stati individuati a partire dal NASA Exoplanet Archive¹. I sistemi planetari in questione sono per lo più pianeti giganti transitanti, con breve periodo orbitale.

Nello stesso grafico, quelli che sono evidenziati in colore rosso sono i pianeti che rispettano criteri più restrittivi di selezione del campione, ovvero:

- periodo orbitale < 5 giorni;
- massa planetaria $> 0.2 M_J$;
- osservazioni presenti in letteratura almeno dal 2018.

Nello specifico, i primi due criteri sul periodo orbitale e sulla massa ci permettono di selezionare solo pianeti convenzionalmente considerati *hot Jupiter*, con un raggio orbitale (e quindi un a/R_*) molto piccolo e una massa tale da massimizzare l'ampiezza dell'effetto di frenamento mareale (Eq. 1.3). Il vincolo introdotto sulla data di scoperta, invece, permetterà di avere una base osservativa di almeno dieci anni al momento dell'inizio delle osservazioni scientifiche di PLATO, in modo da rendere più facilmente misurabile la deviazione rispetto ad una effemeride lineare, deviazione che per definizione si cumula progressivamente nel tempo.

I 13 sistemi planetari selezionati sono: KELT-15, WASP-23, WASP-62, WASP-63, WASP-64, WASP-79, WASP-100, WASP-101, WASP-119, WASP-120, WASP-121, WASP-122 e WASP-126. Tutti questi sistemi planetari sono composti da hot Jupiters già osservati da TESS come target primari (cadenza temporale: 120 secondi).

¹<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>

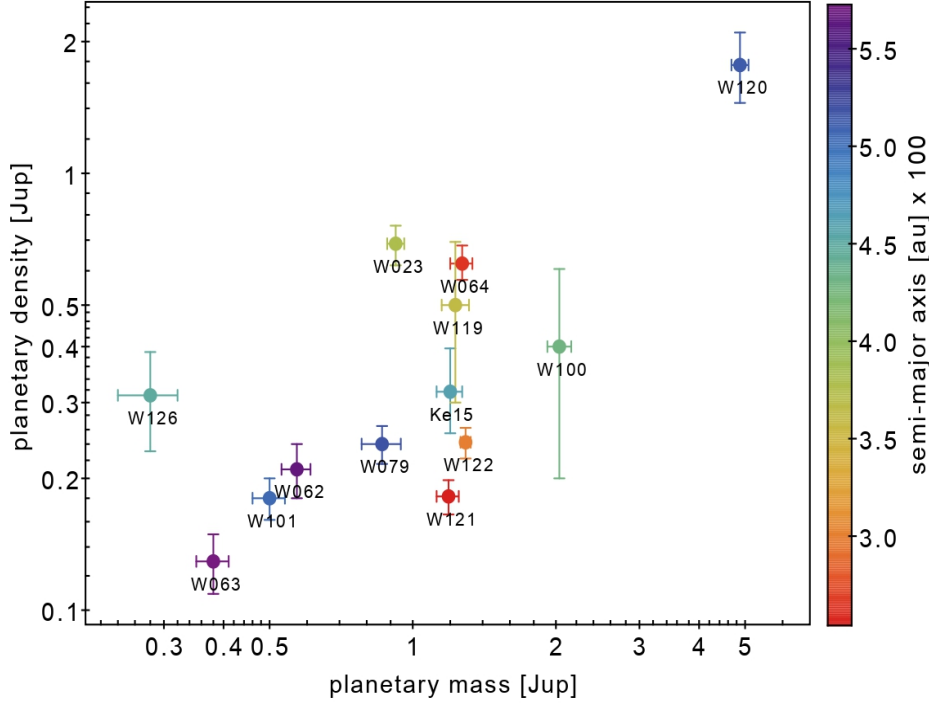


Figura 2.2: Parametri fisici dei tredici pianeti selezionati dal nostro campione. Dati raccolti dal NASA Exoplanet Archive.

metallicità di tipo solare. Si stima che la stella abbia un'età di circa $0.7^{+0.4}_{-0.3}$ Gyr (Stassun et al., 2017).

- WASP-63b (Figura 2.6) (Hellier et al., 2012) è un pianeta di massa $0.37 \pm 0.09 M_J$ e raggio $1.41 \pm 0.14 R_J$, con periodo orbitale di 4.378080 ± 0.000006 giorni. La stella ospite è di tipo G8 con metallicità solare, con magnitudine $V = 11.2$ e temperatura efficace 5550 ± 100 K. Si stima che abbia un'età di circa 6^{+5}_{-3} Gyr. Il raggio della stella risulta “gonfiato” rispetto a quello che ci si aspetterebbe per una stella di questo tipo spettrale in sequenza principale, e questo indica che WASP-63 è già leggermente evoluta. Il pianeta risulta essere uno dei meno massicci e meno densi ($\rho = 0.13 \rho_J$) di questo campione. (Stassun et al., 2017).
- WASP-64b (Figura 2.7) (Gillon et al., 2013) è un pianeta di massa $1.271 \pm 0.068 M_J$ e raggio $1.271 \pm 0.039 R_J$ in orbita con un periodo molto corto, pari a 1.5732918 ± 0.0000015 giorni, attorno ad una stella di tipo G7 con magnitudine $V = 12.3$, temperatura efficace pari a 5400 ± 100 K e metallicità assunta pari a zero. WASP-64 è una stella variabile attiva con un ciclo simile a quello solare, e oltre a questa sembra essere presente un'altra stella legata fisicamente nel sistema, WASP-64A, di magnitudine $V = 11.24$.
- WASP-79b (Figura 2.8) (Smalley et al., 2012) è un pianeta di massa $0.850 \pm 0.180 M_J$ e raggio $1.67 \pm 0.15 R_J$ in orbita intorno ad una stella di tipo F5, temperatura efficace di 6600 ± 100 K e magnitudine $V = 10.1$, con periodo orbitale di 3.662380 ± 0.000005

giorni. WASP-79 ha una metallicità $[\text{Fe}/\text{H}]=0.03$ e un'età stimata di $1.29^{+0.35}_{-0.29}$ Gyr (Stassun et al., 2017).

- WASP-100b (Figura 2.9) (Hellier et al., 2014) è un pianeta di massa $1.26 \pm 0.45 M_J$, raggio $1.33 \pm 0.14 R_J$ e periodo orbitale di 2.849380 ± 0.000008 giorni, in orbita attorno ad una stella di tipo F2, con temperatura pari a 6900 ± 120 K e magnitudine $V=10.8$. L'età stimata della stella è $1.57^{+0.30}_{-0.20}$ Gyr ed ha una metallicità $[\text{Fe}/\text{H}]=-0.03$. Nel sistema si suppone essere presente anche un'altra stella legata fisicamente, WASP-100 B. Stassun et al. (2017) (Bonomo et al., 2017).
- WASP-101b (Figura 2.10) (Hellier et al., 2014) è un pianeta di massa $0.51 \pm 0.08 M_J$ e raggio $1.43 \pm 0.09 R_J$, in orbita attorno ad una stella di tipo F6, con temperatura efficace di 6380 ± 120 K e magnitudine $V = 10.3$, con periodo di 3.585720 ± 0.000004 giorni. Ha un'età stimata di $1.14^{+0.70}_{-0.65}$ Gyr e metallicità $[\text{Fe}/\text{H}]=0.20$. Stassun et al. (2017) (Bonomo et al., 2017).
- WASP-119b (Figura 2.11) (Maxted et al., 2016) è un tipico hot Jupiter con massa $1.23 \pm 0.08 M_J$ e raggio $1.4 \pm 0.2 R_J$, con periodo pari a 2.49979 ± 0.00001 giorni in orbita attorno ad una stella di tipo spettrale G5 e magnitudine $V = 12.2 \pm 0.4$, una stella simile al Sole, di temperatura efficace 5650 ± 100 K ma apparentemente più vecchia, con un'età stimata di 8.00 ± 2.50 Gyr e una metallicità pari a $[\text{Fe}/\text{H}]=0.14$.
- WASP-120b (Figura 2.12) (Turner et al., 2016) è un pianeta molto massiccio, con una massa di $4.85 \pm 0.21 M_J$ e raggio $1.473 \pm 0.096 R_J$, in un'orbita di 3.6112706 ± 0.0000043 giorni che risulta piuttosto eccentrica ($e=0.059$), una caratteristica comune di pianeti molto massicci. La stella ospite è una stella di tipo F5 con magnitudine $V = 11.0$ e temperatura 6450 ± 120 K. La stella sembra avere un livello di attività simile a quello del Sole, un'età di 2.6 ± 0.5 Gyr e metallicità pari a $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.050 \pm 0.070$.
- WASP-121b (Figura 2.13) (Delrez et al., 2016) è un pianeta di massa $1.157 \pm 0.070 M_J$ e raggio $1.753 \pm 0.036 R_J$ con periodo molto breve, di $1.27492504^{+0.00000015}_{-0.00000014}$ giorni in orbita attorno ad una stella attiva di tipo F6 in main-sequence di magnitudine $V=10.51$ e temperatura 6459 ± 140 K. La metallicità della stella risulta $[\text{Fe}/\text{H}]=0.13 \pm 0.09$ e la sua età stimata è di 1.5 ± 1.0 Gyr. Un'importante proprietà di WASP-121b è che il semiasse maggiore della sua orbita risulta solo ~ 1.15 volte più grande del suo limite di Roche, che potrebbe indicare che il pianeta si trovi vicino alla distruzione mareale. Inoltre risulta ci sia un disallineamento tra l'asse di spin della stella ospite e il piano orbitale del pianeta, il pianeta quindi rivolge in un'orbita quasi polare. Questo importante disallineamento può indicare una migrazione planetaria che coinvolge possibili forti eventi dinamici che coinvolgono un terzo corpo (Bourrier et al., 2020).
- WASP-122b (nota anche con il nome di KELT-14b) (Figura 2.14) (Turner et al., 2016) è un Hot Jupiter di massa $1.284 \pm 0.032 M_J$ e raggio $1.743 \pm 0.047 R_J$, in orbita

attorno ad una stella di tipo G4 con magnitudine $V = 11.0$, temperatura 5720 ± 130 K, molto ricca di metalli: $[\text{Fe}/\text{H}] = +0.32 \pm 0.09$. Il breve periodo orbitale del pianeta è di $1.7100566^{+0.0000032}_{-0.0000026}$ giorni. La stella risulta essere vicino al punto di turn-off della main sequence ma non ancora nell'Hertzsprung gap. Già in [Rodriguez et al. \(2016\)](#), in cui si annunciava la scoperta di KELT-14b in modo indipendente dalla scoperta di WASP-122b, si segnalava che il corrente stadio evolutivo della stella suggeriva una possibilità che il pianeta stia spiraleggiando verso la stella in modo rapido, e che venga distrutto nel prossimo 1 Gyr, quindi il pianeta non sembra destinato a sopravvivere oltre la fase subgigante della stella.

- WASP-126b (Figura 2.15) ([Maxted et al., 2016](#)) è un pianeta di massa $0.28 \pm 0.04 M_J$, il meno massivo di questo campione, e raggio $0.960^{+0.100}_{-0.050} R_J$, in orbita con un periodo di 3.28880 ± 0.00001 giorni, attorno a una stella di tipo spettrale G2 temperatura efficace pari a 5800 ± 100 K e magnitudine $V = 10.8 \pm 0.5$. La stella ha una metallicità $[\text{Fe}/\text{H}] = 0.17 \pm 0.08$. Alcuni studi evidenziano nel sistema la presenza di anche WASP-126c, un altro candidato esopianeta, non confermato in modo indipendente, di $0.202 \pm 0.077 M_J$ masse gioviane e periodo pari a 7.63 ± 0.17 giorni ([Pearson, 2019](#)).

Si riportano ora nella tabella che segue i dati relativi alle osservazioni presenti in letteratura di questi sistemi planetari, in particolare la data della prima osservazione fotometrica del transito che ha confermato l'esistenza del pianeta extrasolare, le date della prima e ultima osservazione del sistema da parte di TESS, i settori di TESS interessati e la base temporale delle osservazioni, ovvero quanti anni di osservazioni si hanno a disposizione in anni giuliani.

Nome	Prima osservazione fotometrica transito	Prime osservazioni TESS	Settori TESS	Ultime osservazioni TESS	Baseline osservazioni (anni giuliani)
KELT-15	16/01/2015 2457039.0	07/01/2019- 02/02/2019	7, 9, 34, 35, 36, 61, 62	12/02/2022- 01/03/2023	8.11
WASP-23	12/01/2008 2454812.0	11/12/2018- 07/01/2019	6,7,34,61	01/01/2023- 01/02/2023	14.13
WASP-62	24/11/2011 2455889.0	25/07/2018- 22/08/2018	1-4, 6-13, 27-34, 36- 39, 61, 62, 64, 65, 67-69	12/02/2022- 01/03/2023	11.26
WASP-63	04/12/2011 2455900.0	11/12/2018- 07/01/2019	6,7, 32, 33	17/12/2020- 13/01/2021	9.11
WASP-64	20/01/2011 2455581.0	11/12/2018- 07/01/2019	6, 7, 33, 34	13/01/2021- 09/02/2021	10.05
WASP-79	26/09/2011 2455830.0	18/10/2018- 15/11/2018	4, 5, 31, 32	19/11/2020- 17/12/2020	9.22
WASP-100	04/12/2012 2456265.0	25/07/2018- 22/08/2018	1-13, 27-39, 61-69	12/02/2023- 10/03/2023	10.26
WASP-101	11/01/2012 2455937.0	11/12/2018- 07/01/2019	6, 33	17/12/2020- 13/01/2021	9.00
WASP-119	15-11-13 2456611.0	25/07/2018- 22/08/2018	1-4, 7, 11, 27-31, 34, 37, 61-65, 67-69	12/02/2023- 10/03/2023	9.31
WASP-120	12/11/2013 2456608.0	18/10/2018- 15/11/2018	4, 5, 30, 31	21/10/2020- 19/11/2020	7.02
WASP-121	09/12/2013 2456636.0	07/01/2019- 02/02/2019	7, 33, 34, 61	18/01/2023- 12/02/2023	9.17
WASP-122	17/12/2013 2456644.0	07/01/2019- 02/02/2019	7, 33, 34, 61	18/01/2023- 12/02/2023	9.15
WASP-126	08/01/2014 2456666.0	25/07/2018- 22/08/2018	1-13, 27-34, 36-39, 61, 63-69	18/01/2023- 12/02/2023	9.09

Tabella 2.1: Dati delle osservazioni dei target

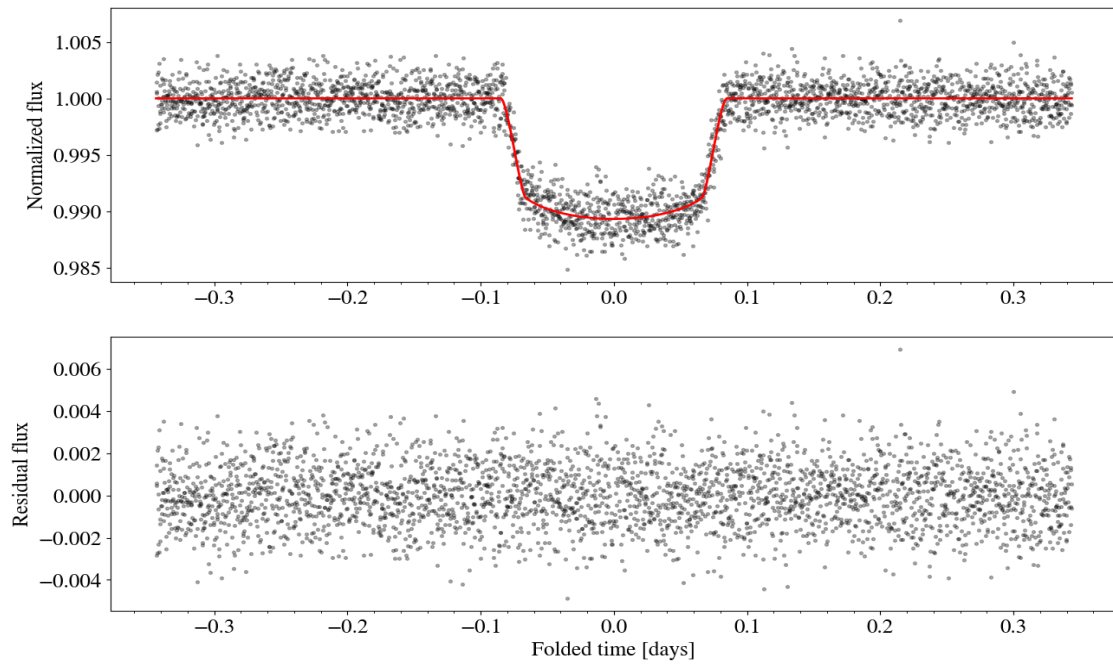


Figura 2.3: Curva di luce in funzione della fase orbitale di KELT-15.

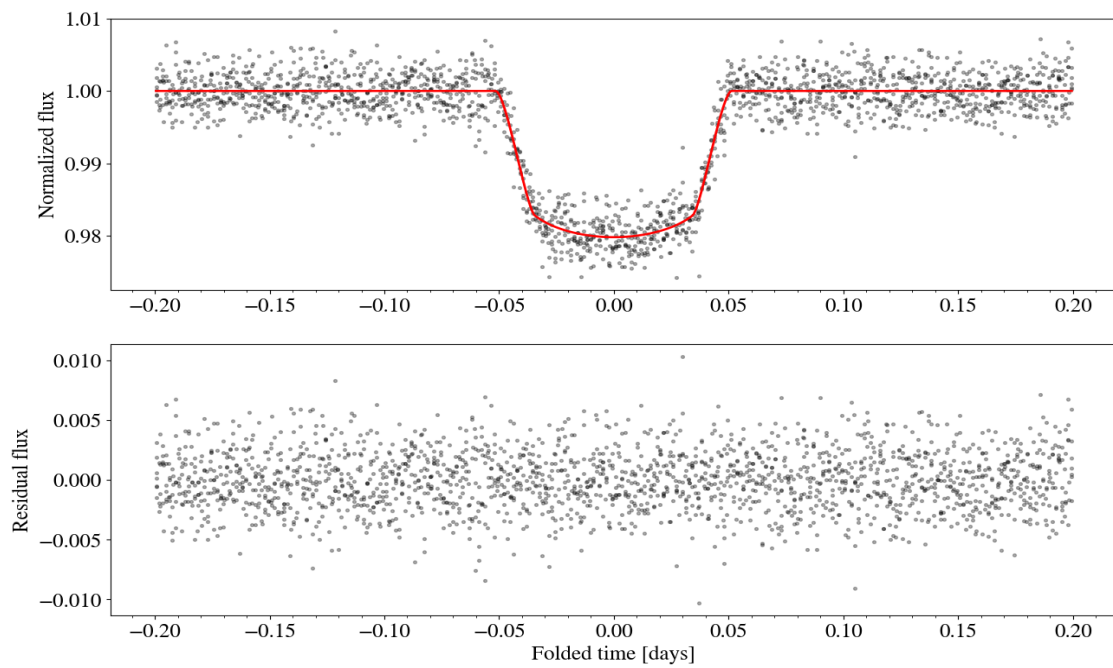


Figura 2.4: Curva di luce in funzione della fase orbitale di WASP-23.

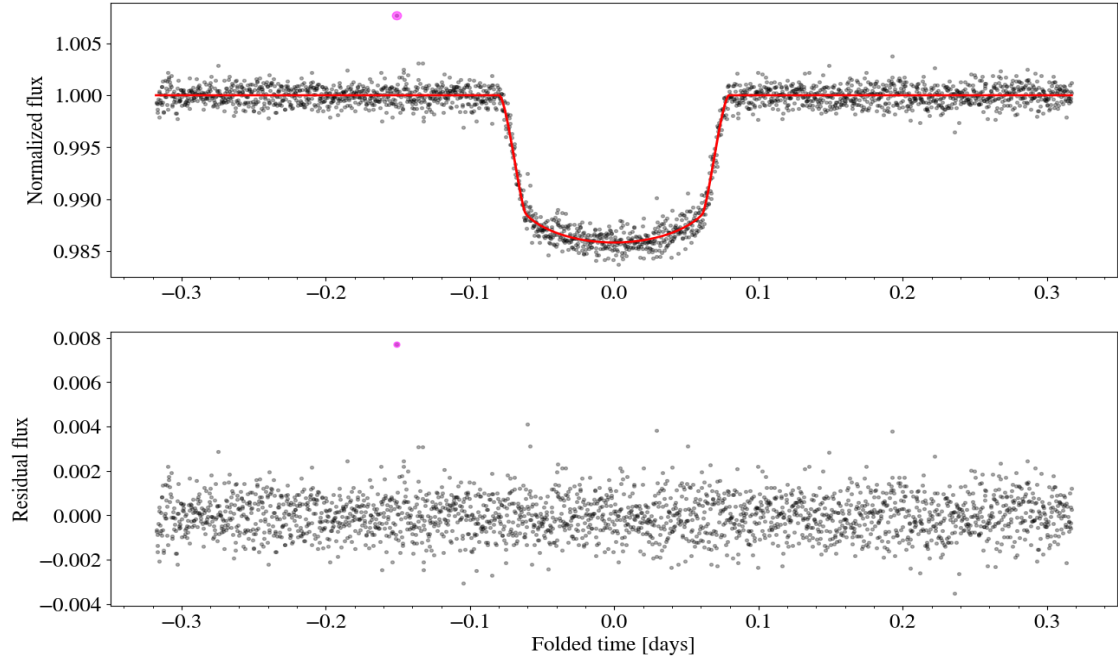


Figura 2.5: Curva di luce in funzione della fase orbitale di WASP-62.

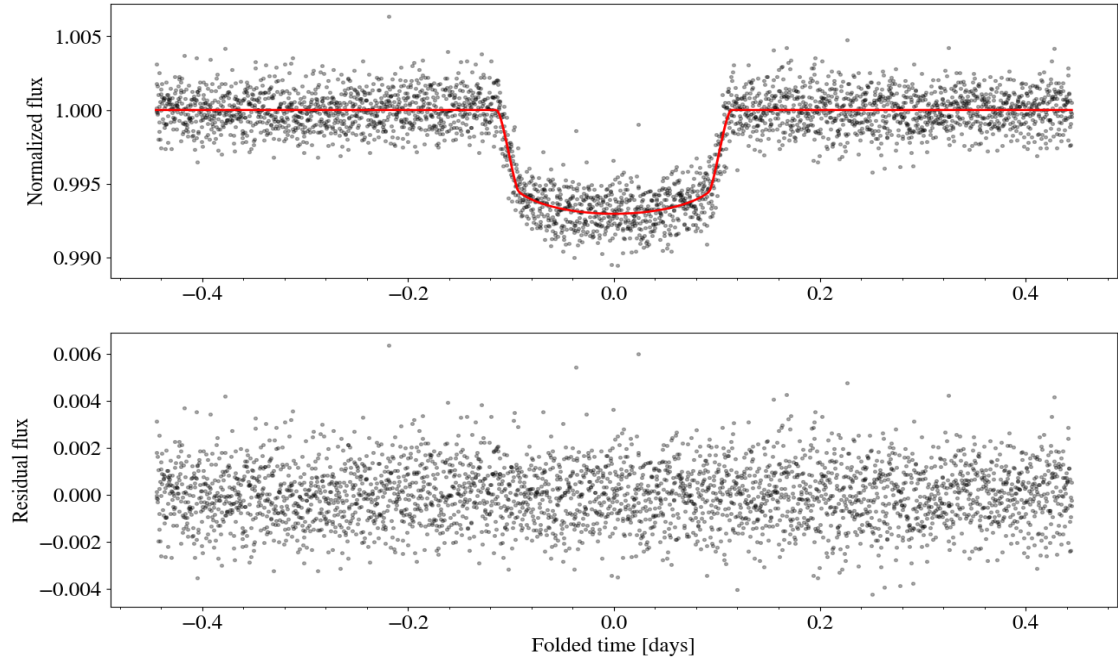


Figura 2.6: Curva di luce in funzione della fase orbitale di WASP-63.

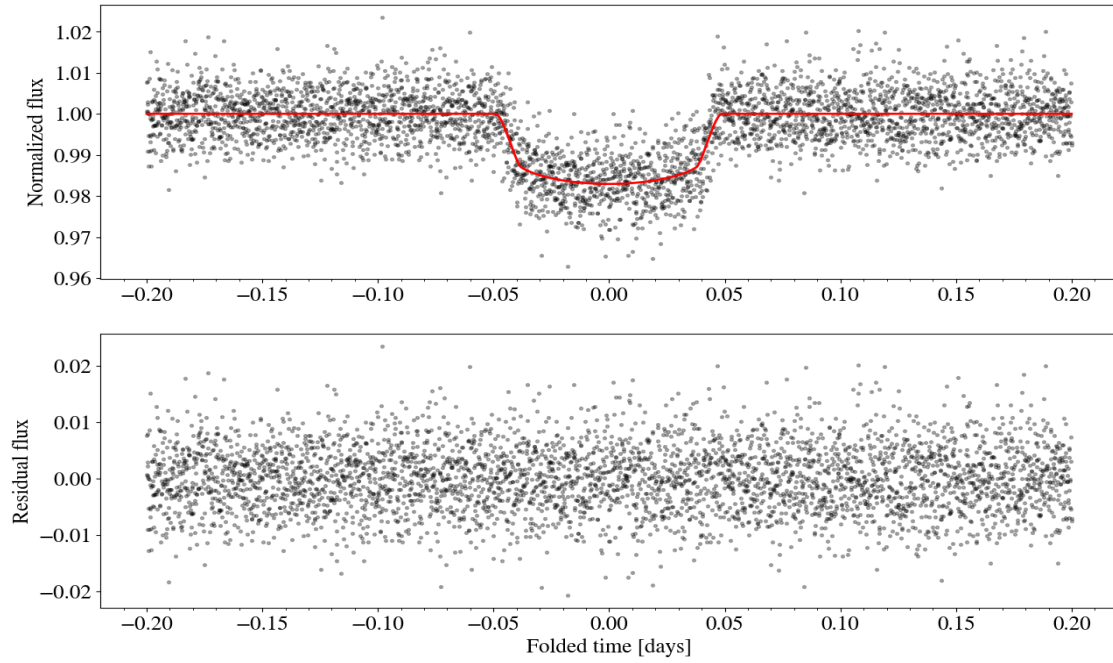


Figura 2.7: Curva di luce in funzione della fase orbitale di WASP-64.

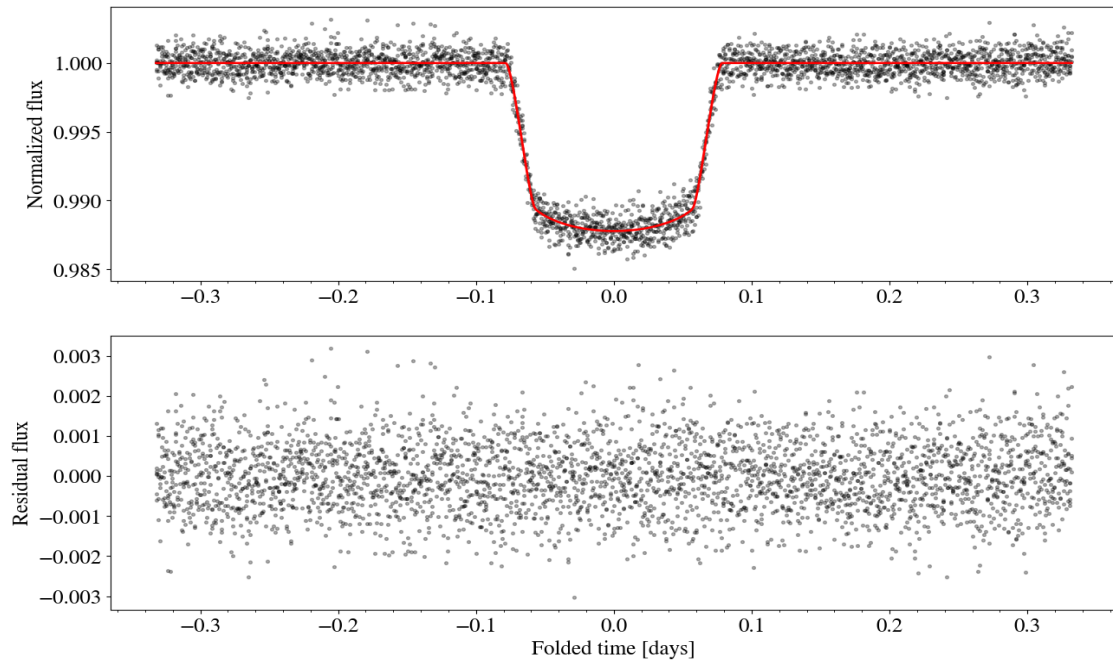


Figura 2.8: Curva di luce in funzione della fase orbitale di WASP-79.

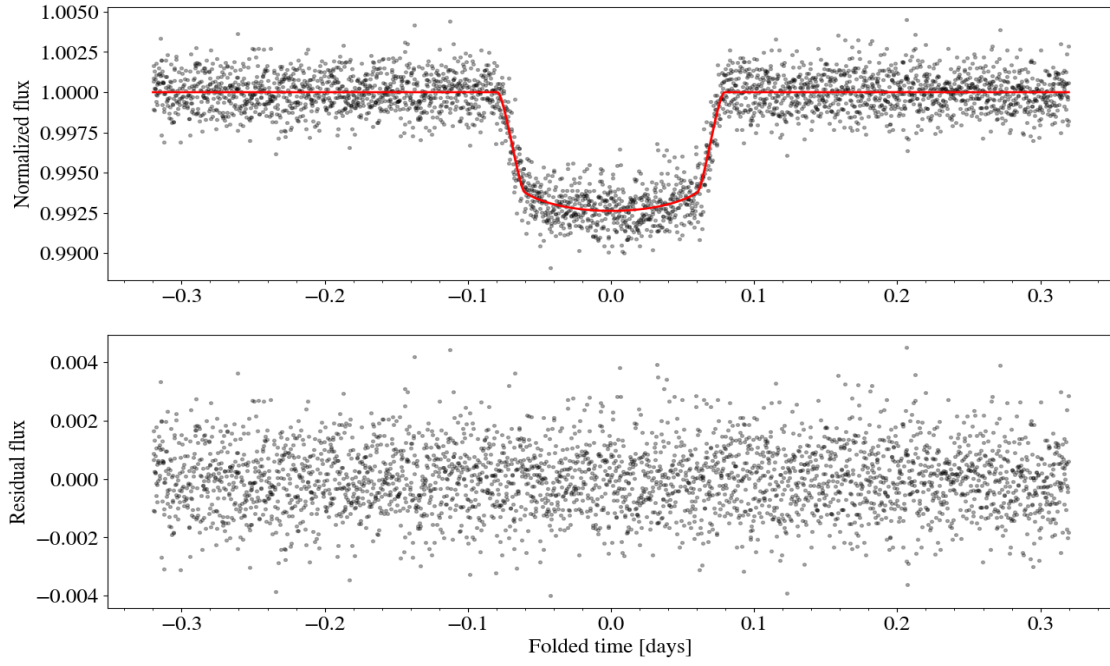


Figura 2.9: Curva di luce in funzione della fase orbitale di WASP-100.

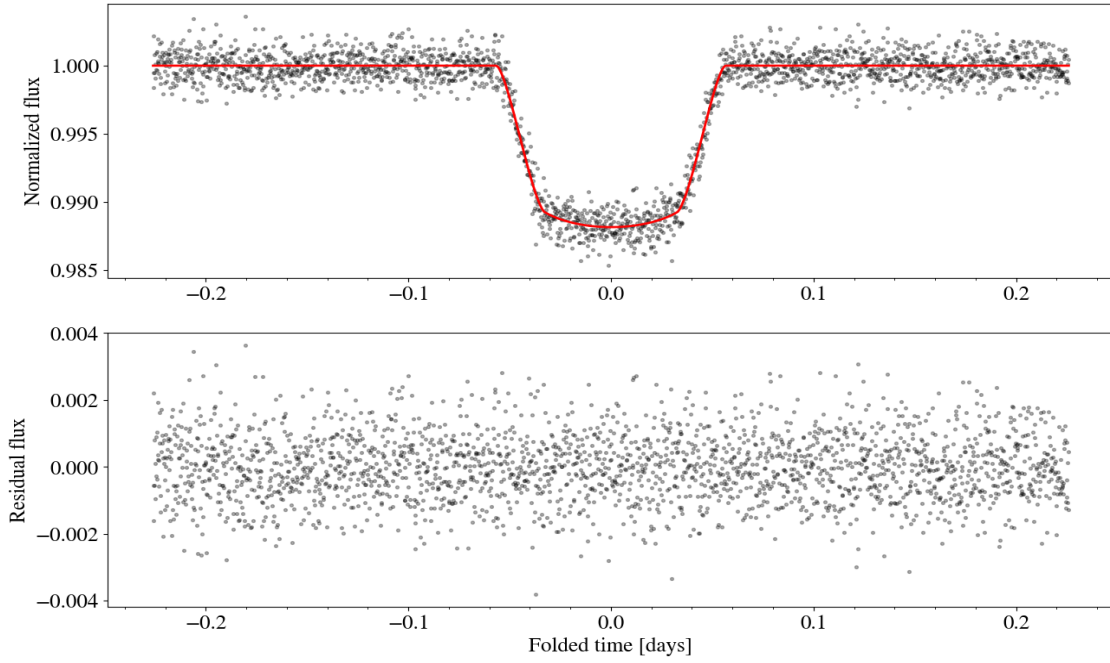


Figura 2.10: Curva di luce in funzione della fase orbitale di WASP-101.

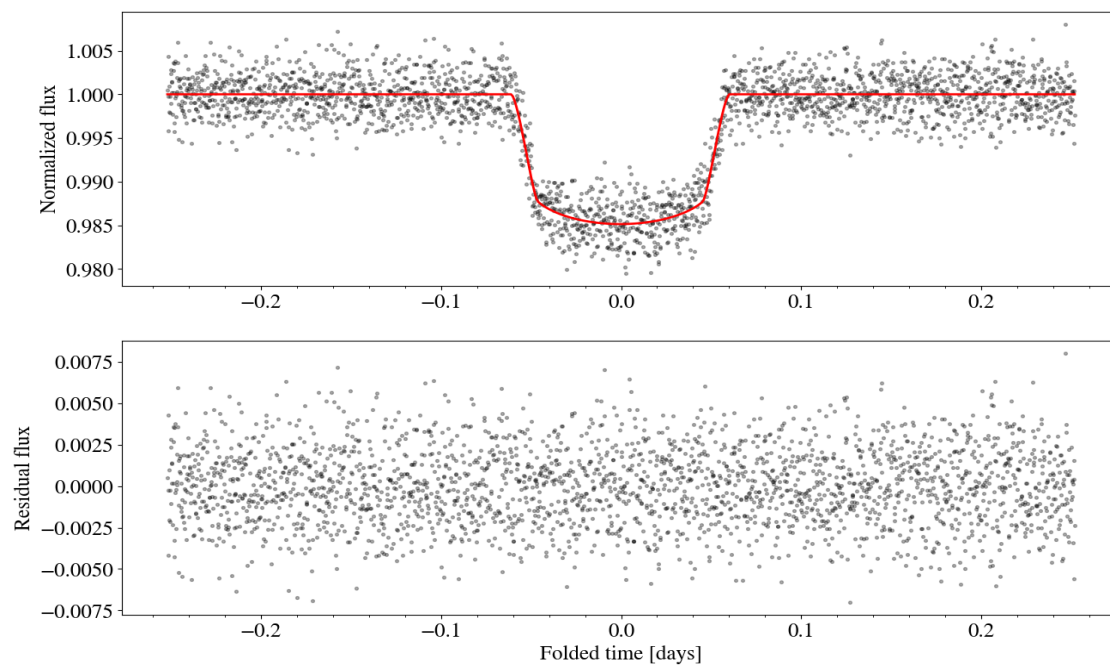


Figura 2.11: Curva di luce in funzione della fase orbitale di WASP-119.

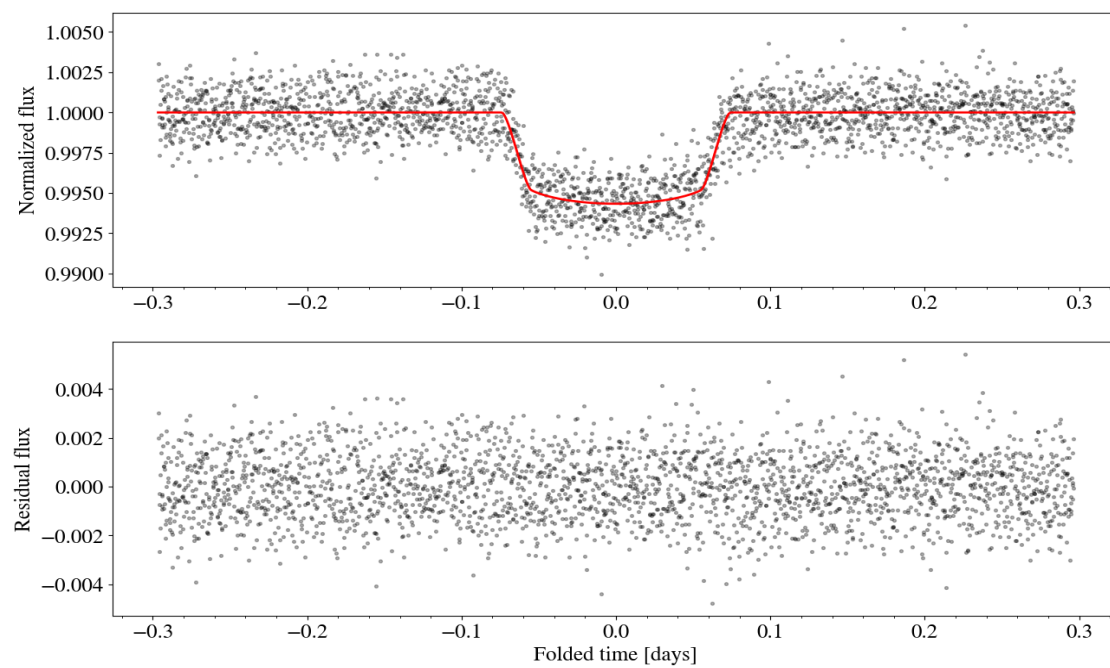


Figura 2.12: Curva di luce in funzione della fase orbitale di WASP-120.

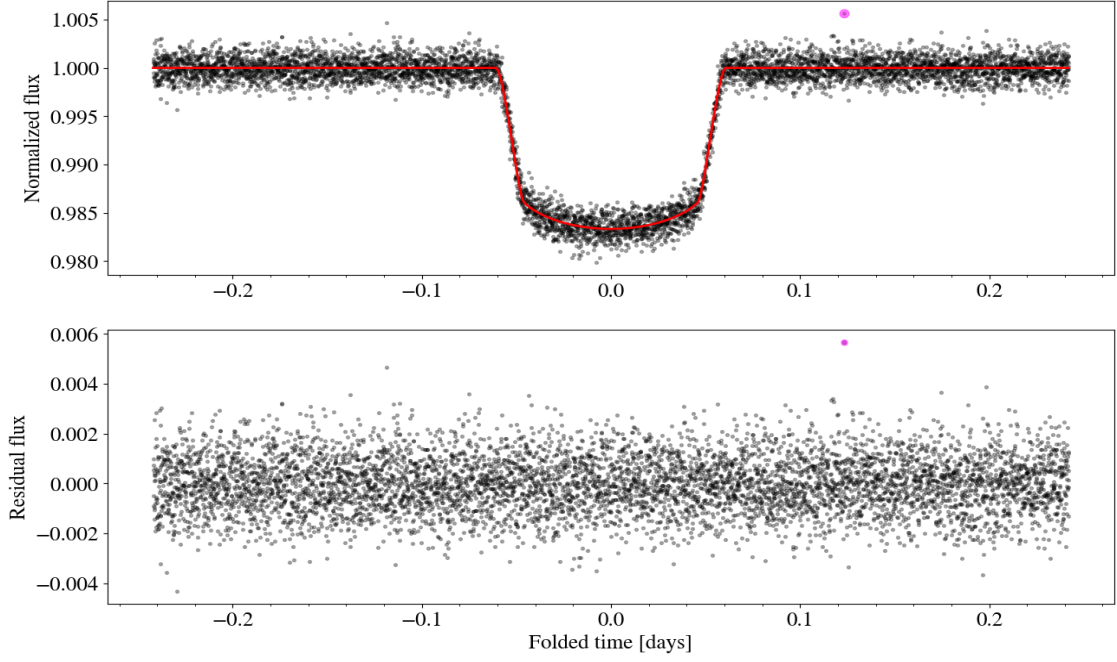


Figura 2.13: Curva di luce in funzione della fase orbitale di WASP-121.

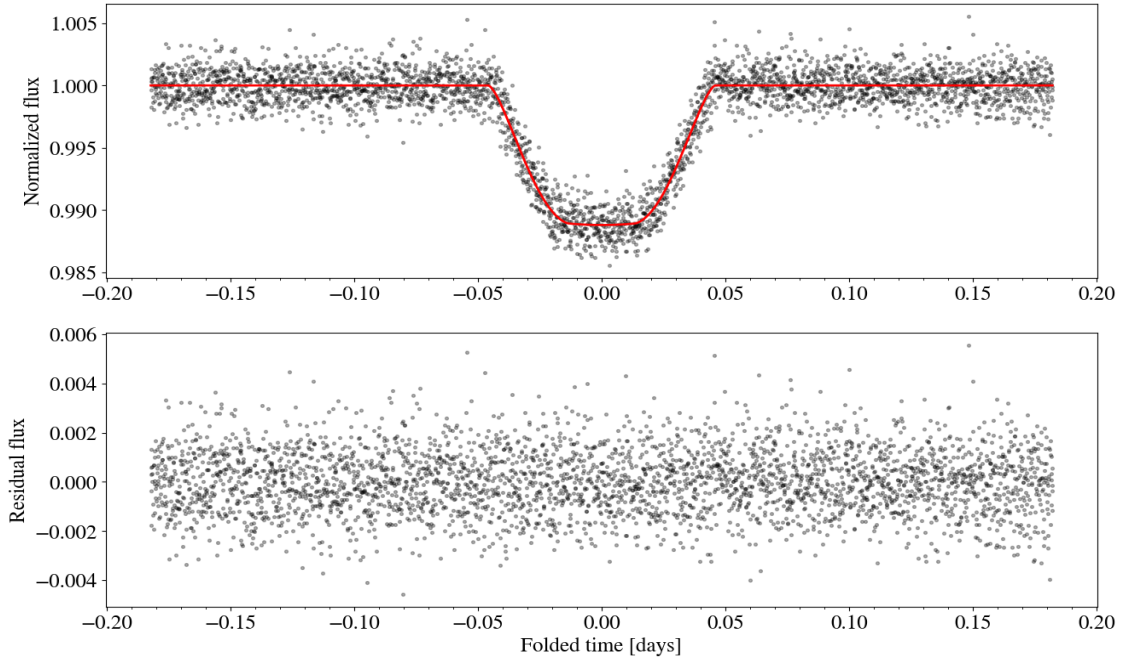


Figura 2.14: Curva di luce in funzione della fase orbitale di WASP-122.

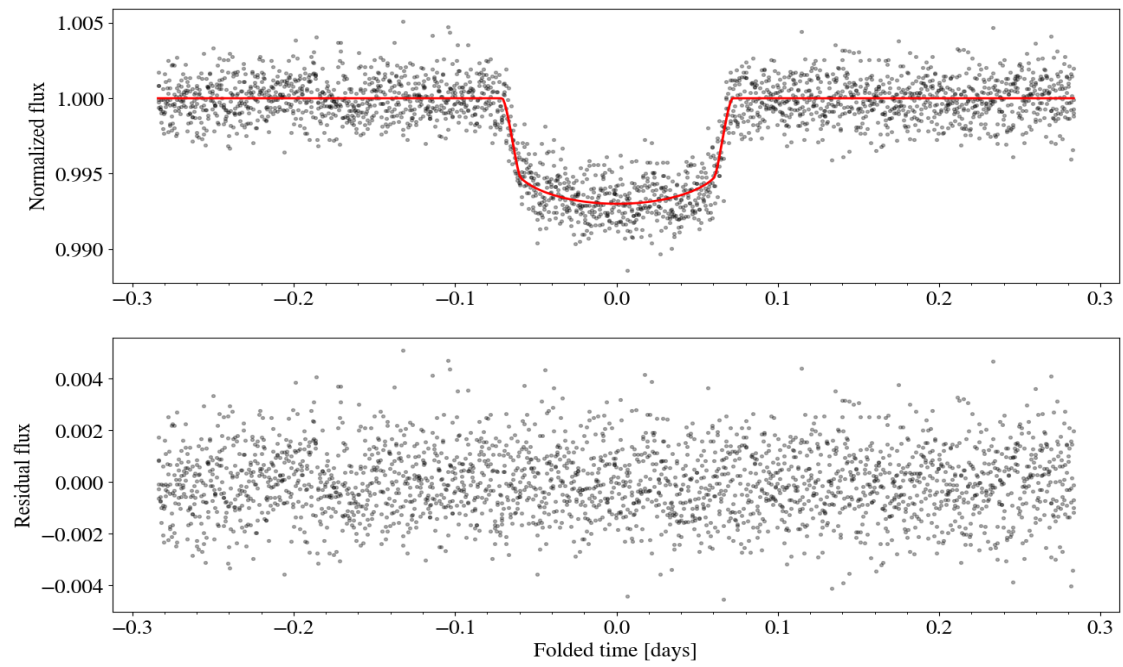


Figura 2.15: Curva di luce in funzione della fase orbitale di WASP-126.

Capitolo 3

Analisi del campione

L'obiettivo di questo lavoro è individuare quali tra i pianeti del campione siano i migliori candidati da osservare per avere una buona possibilità di trovare effetti di rallentamento mareale.

Nella tabella 3.1 sono raccolti i dati per ciascun oggetto che entrano in gioco nella formula (1.3), dati dal NASA Exoplanet Archive.

Si utilizzano questi parametri per calcolare la quantità dP/dt per ogni esopianeta del campione secondo la formula (1.3). I risultati sono riportati in tabella 3.2.

Nome	$M_*/M_\odot$	$R_*/R_\odot$	M_p/M_J	a/R_*
KELT-15	2.06 ± 0.75	1.78 ± 0.21	1.31 ± 0.43	6.70 ± 0.25
WASP-23	$0.78^{+0.13}_{-0.12}$	$0.765^{+0.033}_{-0.049}$	$0.879^{+0.095}_{-0.100}$	10.40 ± 0.78
WASP-62	1.11 ± 0.25	1.23 ± 0.08	0.52 ± 0.08	9.55 ± 0.41
WASP-63	1.28 ± 0.42	1.86 ± 0.19	0.37 ± 0.09	6.59 ± 0.30
WASP-64	1.004 ± 0.028	1.058 ± 0.025	1.271 ± 0.068	$5.39^{+0.11}_{-0.09}$
WASP-79	1.43 ± 0.43	1.60 ± 0.14	0.850 ± 0.180	7.03 ± 0.36
WASP-100	0.770 ± 0.420	1.57 ± 0.16	1.26 ± 0.45	4.93 ± 0.75
WASP-101	1.41 ± 0.30	1.31 ± 0.08	0.51 ± 0.08	8.45 ± 0.30
WASP-119	1.02 ± 0.06	1.2 ± 0.1	1.23 ± 0.08	6.329 ± 0.600
WASP-120	1.393 ± 0.057	1.87 ± 0.11	4.85 ± 0.21	5.90 ± 0.33
WASP-121	$1.353^{+0.080}_{-0.0079}$	1.458 ± 0.030	1.157 ± 0.070	$3.8131^{+0.0075}_{-0.0060}$
WASP-122	1.239 ± 0.039	1.52 ± 0.03	1.284 ± 0.032	4.284 ± 0.072
WASP-126	1.12 ± 0.06	$1.27^{+0.10}_{-0.05}$	0.28 ± 0.04	$7.634^{+0.240}_{-0.591}$

Tabella 3.1: Dati di ogni oggetto per il calcolo di dP/dt . Dati da [Rodriguez et al. \(2016\)](#) [Triaud et al. \(2011\)](#) [Bonomo et al. \(2017\)](#) [Hellier et al. \(2012\)](#) [Stassun et al. \(2017\)](#) [Gillon et al. \(2013\)](#) [Smalley et al. \(2012\)](#) [Hellier et al. \(2014\)](#) [Maxted et al. \(2016\)](#) [Turner et al. \(2016\)](#) [Delrez et al. \(2016\)](#) [Bourrier et al. \(2020\)](#)

Nome	dP/dt
WASP-121	$\approx Q'_\star{}^{-1}(1.2 \times 10^{-6} \pm 1.1 \times 10^{-7})$
WASP-23	$\approx Q'_\star{}^{-1}(9.3 \pm 3.9) \times 10^{-6}$
WASP-120	$\approx Q'_\star{}^{-1}(4.6 \pm 1.3) \times 10^{-7}$
WASP-122	$\approx Q'_\star{}^{-1}(7.2 \times 10^{-7} \pm 6.7 \times 10^{-8})$
WASP-63	$\approx Q'_\star{}^{-1}(2.2 \pm 1.0) \times 10^{-8}$
WASP-64	$\approx Q'_\star{}^{-1}(2.7 \pm 2.9) \times 10^{-8}$
WASP-79	$\approx Q'_\star{}^{-1}(3.3 \pm 1.5) \times 10^{-8}$
KELT-15	$\approx Q'_\star{}^{-1}(5.0 \pm 2.4) \times 10^{-8}$
WASP-100	$\approx Q'_\star{}^{-1}(5.4 \pm 5.4) \times 10^{-8}$
WASP-119	$\approx Q'_\star{}^{-1}(9.4 \pm 4.5) \times 10^{-8}$
WASP-62	$\approx Q'_\star{}^{-1}(5.6 \pm 2.0) \times 10^{-9}$
WASP-101	$\approx Q'_\star{}^{-1}(8.0 \pm 5.2) \times 10^{-9}$
WASP-126	$\approx Q'_\star{}^{-1}(9.2 \pm 2.7) \times 10^{-9}$

Tabella 3.2: calcolo di dP/dt per ogni oggetto del campione

Le incertezze riportate in tabella 3.2 si sono calcolate con le normali regole di propagazione degli errori sulle quantità $\frac{R_\star}{a}$, M_p e $M_\star$. Nella tabella i risultati sono ordinati per valori decrescenti di dP/dt , il che corrisponde per il nostro caso scientifico anche ad un ordine di priorità. Ovvero, gli oggetti nelle prime posizioni sono gli oggetti che risultano più promettenti in termini di ampiezza del segnale per individuare significativi effetti di rallentamento mareale.

In questo calcolo si è lasciato inesperto il tidal quality factor ridotto $Q'_\star$, che è un parametro che dipende fortemente dai parametri fisici della stella, e la cui conoscenza richiede però un'approfondita trattazione che non si sosterrà in questo lavoro.

Per una stima quantitativa, seppure approssimata, dell'ampiezza del segnale dovuto al tidal decay espresso in unità di tempo, possiamo procedere assumendo che il tidal quality factor e tutti gli altri parametri specifici di ogni stella siano uguali a quelli del nostro Sole. Questa è una assunzione decisamente forte, ma ci permette se non altro di isolare i candidati più promettenti in termini di parametri planetari.

A tal fine, la formula (1.3) può essere riscritta in funzione del *time shift*, ovvero di quanto devino i transiti rispetto alla predizione ottenuta assumendo un'effemeride lineare, ovvero assumendo che il periodo orbitale del pianeta sia costante:

$$T_{shift} = \left(\frac{27n}{8Q'_\star} \right) \left(\frac{M_p}{M_\star} \right) \left(\frac{R_\star}{a} \right)^5 T_{dur}^2 \quad (3.1)$$

con $n = 2\pi/P_{orb}$ (P_{orb} periodo orbitale) e con T_{dur} che è la baseline delle osservazioni in anni giuliani (Barker, 2020).

Sulla base dell'assunzione precedentemente espressa, tale relazione si può scrivere

$$T_{shift} \approx 98.4s \left(\frac{P_{orb}}{1d} \right)^{-21/3} \left(\frac{M_p}{M_J} \right) \left(\frac{T_{dur}}{10yr} \right)^2 \quad (3.2)$$

Si è calcolato il time shift tramite questa approssimazione per ogni oggetto del campione. I risultati sono riportati in tabella 3.3.

Nome	T_{shift}
WASP-121	$\approx 17 \pm 1.1 \text{ s}$
WASP-64	$\approx 5.2 \pm 0.28 \text{ s}$
WASP-122	$\approx 2.5 \pm 0.062 \text{ s}$
WASP-119	$\approx 0.17 \pm 1.1 \times 10^{-3} \text{ s}$
KELT-15	$\approx 1.9 \times 10^{-2} \pm 6.1 \times 10^{-3} \text{ s}$
WASP-120	$\approx 2.9 \times 10^{-2} \pm 1.3 \times 10^{-3} \text{ s}$
WASP-100	$\approx 8.6 \times 10^{-2} \pm 3.1 \times 10^{-2} \text{ s}$
WASP-23	$\approx 9.004 \times 10^{-2} \pm 1.229 \times 10^{-2} \text{ s}$
WASP-62	$\approx 2.0 \times 10^{-3} \pm 3.1 \times 10^{-4} \text{ s}$
WASP-101	$\approx 5.3 \times 10^{-3} \pm 8.4 \times 10^{-4} \text{ s}$
WASP-126	$\approx 5.5 \times 10^{-3} \pm 7.8 \times 10^{-3} \text{ s}$
WASP-79	$\approx 8.0 \times 10^{-3} \pm 1.7 \times 10^{-3} \text{ s}$
WASP-63	$\approx 9.8 \times 10^{-4} \pm 2.4 \times 10^{-4} \text{ s}$

Tabella 3.3: Time shift di ogni oggetto del campione

Le incertezze riportate in tabella 3.3 sono state calcolate con le normali regole di propagazione degli errori sulle quantità P_{orb} , M_p , T_{dur} . Nella tabella i risultati sono posizionati in ordine decrescente, che corrisponde anche ad un ordine di priorità, ovvero gli oggetti nelle prime posizioni sono gli oggetti che risultano più promettenti per individuare significativi effetti di rallentamento mareale.

Dunque, i target più promettenti da osservare sono i primi tre della tabella 3.3: WASP-121, WASP-64 e WASP-122.

Si evidenzia che questi primi tre oggetti corrispondono agli oggetti con periodo orbitale più breve, e anche a quelli con rapporto a/R_* più piccolo.

Per WASP-121 si era già segnalato il fatto che il semiasse maggiore della sua orbita risultasse solo ~ 1.15 volte più grande del suo limite di Roche, indice di possibili forti effetti di interazione mareale, che potrebbe indicare che il pianeta si trovi in uno stato vicino alla distruzione mareale, risultava quindi già un buon candidato per la possibilità di osservare effetti di rallentamento mareale, e il suo time shift è in accordo con queste ipotesi.

Per WASP-64 non c'erano già evidenze di importanti effetti mareali dalla letteratura, ma ci si poteva aspettare un time shift importante per periodo orbitale breve e rapporto a/R_* piccolo.

Per WASP-122, era già stato evidenziato nel capitolo 2 che in [Rodriguez et al. \(2016\)](#) si suggerisce la possibilità che il pianeta stia spiraleggiando verso la stella rapidamente per forti interazioni mareali, e il time shift calcolato è in accordo con questa ipotesi.

PLATO sarà in grado di misurare agevolmente gli oggetti con $T_{shift} \geq 1$ s, che è un criterio rispettato da questi tre esopianeti. Ciò non significa che anche gli altri target a priorità più bassa siano da escludere a priori dalle osservazioni: si deve tenere a mente che questi risultati si sono ottenuti alla base di assunzioni semplificative sul valore del quality factor, e dunque potrebbero aver sottostimato l'entità dell'effetto in alcuni casi specifici. Ad esempio, se la stella ospite in realtà si discostasse dai parametri solari, presentando uno stato evolutivo più avanzato o una densità più bassa rispetto a quelle del Sole, l'effetto potrebbe tornare ad essere misurabile. Al di là delle caratteristiche dei casi individuali, però, la lista presentata è funzionale al suo scopo iniziale, ovvero ottenere una lista di priorità dei nostri oggetti in base all'ordine di grandezza atteso del segnale da rivelare.

Conclusioni e prospettive future

Si sono dunque individuati i tre sistemi planetari del campione che risultano più promettenti per misurare l'effetto di rallentamento mareale: WASP-121, WASP-64 e WASP-122. Si invita a continuare il monitoraggio e lo studio di questi oggetti, approfondendo ad esempio l'aspetto del tidal quality factor, che richiede un modeling molto dettagliato della struttura stellare e che in questa trattazione non è stato esaminato in dettaglio.

Sicuramente i prossimi anni forniranno ottime opportunità per esaminare al meglio gli effetti di tidal decay nei pianeti extrasolari: tramite gli importanti set di dati che fornisce ancora la missione TESS e soprattutto grazie a quelli che arriveranno con il lancio di PLATO, che potrà effettuare osservazioni più accurate, ci aspettiamo nuove evidenze di variazioni dei periodi orbitali, oltre a misure estremamente precise delle effemeridi medie dei transiti. Si potranno così raggiungere importanti traguardi nel tentativo di conoscere meglio i meccanismi interni di dissipazione delle oscillazioni mareali in calore da parte delle stelle, comprendere maggiormente le interazioni mareali tra stelle e hot Jupiters e l'evoluzione di questi sistemi planetari.

Bibliografia

- A. J. Barker. Tidal dissipation in evolving low-mass and solar-type stars with predictions for planetary orbital decay. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 498(2): 2270–2294, sep 2020. doi: [10.1093/mnras/staa2405](https://doi.org/10.1093/mnras/staa2405). URL <https://doi.org/10.1093/2Fmnras%2Fstaa2405>.
- A. S. Bonomo, S. Desidera, S. Benatti, F. Borsa, S. Crespi, M. Damasso, A. F. Lanza, A. Sozzetti, G. Lodato, F. Marzari, C. Boccato, R. U. Claudi, R. Cosentino, E. Covino, R. Gratton, A. Maggio, G. Micela, E. Molinari, I. Pagano, G. Piotto, E. Poretti, R. Smareglia, L. Affer, K. Biazzo, A. Bignamini, M. Esposito, P. Giacobbe, G. Hébrard, L. Malavolta, J. Maldonado, L. Mancini, A. Martinez Fiorenzano, S. Masiero, V. Nascimbeni, M. Pedani, M. Rainer, and G. Scandariato. The GAPS Programme with HARPS-N at TNG . XIV. Investigating giant planet migration history via improved eccentricity and mass determination for 231 transiting planets. *@@styleA&A*, 602:A107, June 2017. doi: [10.1051/0004-6361/201629882](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201629882).
- V. Bourrier, D. Ehrenreich, M. Lendl, M. Cretignier, R. Allart, X. Dumusque, H. M. Cegla, A. Suárez-Mascareño, A. Wyttenbach, H. J. Hoeijmakers, C. Melo, T. Kuntzer, N. Astudillo-Defru, H. Giles, K. Heng, D. Kitzmann, B. Lavie, C. Lovis, F. Murgas, V. Nascimbeni, F. Pepe, L. Pino, D. Segransan, and S. Udry. Hot Exoplanet Atmospheres Resolved with Transit Spectroscopy (HEARTS). III. Atmospheric structure of the misaligned ultra-hot Jupiter WASP-121b. *@@styleA&A*, 635:A205, Mar. 2020. doi: [10.1051/0004-6361/201936640](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201936640).
- H. J. Deeg and J. A. Belmonte. *Handbook of Exoplanets*. 2018. doi: [10.1007/978-3-319-55333-7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-55333-7).
- L. Delrez, A. Santerne, J.-M. Almenara, D. R. Anderson, A. Collier-Cameron, R. F. Díaz, M. Gillon, C. Hellier, E. Jehin, M. Lendl, P. F. L. Maxted, M. Neveu-VanMalle, F. Pepe, D. Pollacco, D. Queloz, D. Ségransan, B. Smalley, A. M. S. Smith, A. H. M. J. Triaud, S. Udry, V. V. Grootel, and R. G. West. WASP-121 b: a hot jupiter close to tidal disruption transiting an active f star. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 458(4):4025–4043, mar 2016. doi: [10.1093/mnras/stw522](https://doi.org/10.1093/mnras/stw522). URL <https://doi.org/10.1093/2Fmnras%2Fstw522>.
- M. Gillon, D. R. Anderson, A. Collier-Cameron, A. P. Doyle, A. Fumel, C. Hellier, E. Jehin, M. Lendl, P. F. L. Maxted, J. Montalbán, F. Pepe, D. Pollacco, D. Queloz, D. Ségransan,

- A. M. S. Smith, B. Smalley, J. Southworth, A. H. M. J. Triaud, S. Udry, and R. G. West. WASP-64 b and WASP-72 b: two new transiting highly irradiated giant planets. *@@styleA&A*, 552:A82, Apr. 2013. doi: [10.1051/0004-6361/201220561](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201220561).
- L. Hebb, A. Collier-Cameron, B. Loeillet, D. Pollacco, G. Hébrard, R. A. Street, F. Bouchy, H. C. Stempels, C. Moutou, E. Simpson, S. Udry, Y. C. Joshi, R. G. West, I. Skillen, D. M. Wilson, I. McDonald, N. P. Gibson, S. Aigrain, D. R. Anderson, C. R. Benn, D. J. Christian, B. Enoch, C. A. Haswell, C. Hellier, K. Horne, J. Irwin, T. A. Lister, P. Maxted, M. Mayor, A. J. Norton, N. Parley, F. Pont, D. Queloz, B. Smalley, and P. J. Wheatley. WASP-12b: The Hottest Transiting Extrasolar Planet Yet Discovered. *@@styleApJ*, 693(2):1920–1928, Mar. 2009. doi: [10.1088/0004-637X/693/2/1920](https://doi.org/10.1088/0004-637X/693/2/1920).
- C. Hellier, D. R. Anderson, A. Collier Cameron, A. P. Doyle, A. Fumel, M. Gillon, E. Jehin, M. Lendl, P. F. L. Maxted, F. Pepe, D. Pollacco, D. Queloz, D. Ségransan, B. Smalley, A. M. S. Smith, J. Southworth, A. H. M. J. Triaud, S. Udry, and R. G. West. Seven transiting hot Jupiters from WASP-South, Euler and TRAPPIST: WASP-47b, WASP-55b, WASP-61b, WASP-62b, WASP-63b, WASP-66b and WASP-67b. *@@styleMNRAS*, 426(1):739–750, Oct. 2012. doi: [10.1111/j.1365-2966.2012.21780.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.21780.x).
- C. Hellier, D. R. Anderson, A. C. Cameron, L. Delrez, M. Gillon, E. Jehin, M. Lendl, P. F. L. Maxted, F. Pepe, D. Pollacco, D. Queloz, D. Ségransan, B. Smalley, A. M. S. Smith, J. Southworth, A. H. M. J. Triaud, S. Udry, and R. G. West. Transiting hot jupiters from WASP-south, euler and TRAPPIST: WASP-95b to WASP-101b. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 440(3):1982–1992, apr 2014. doi: [10.1093/mnras/stu410](https://doi.org/10.1093/mnras/stu410). URL <https://doi.org/10.1093/mnras/stu410>.
- P. F. L. Maxted, D. R. Anderson, A. Collier Cameron, L. Delrez, M. Gillon, C. Hellier, E. Jehin, M. Lendl, M. Neveu-VanMalle, F. Pepe, D. Pollacco, D. Queloz, D. Ségransan, B. Smalley, A. M. S. Smith, J. Southworth, A. H. M. J. Triaud, S. Udry, T. Wagg, and R. G. West. Five transiting hot Jupiters discovered using WASP-South, Euler, and TRAPPIST: WASP-119 b, WASP-124 b, WASP-126 b, WASP-129 b, and WASP-133 b. *@@styleA&A*, 591:A55, June 2016. doi: [10.1051/0004-6361/201628250](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201628250).
- M. Mayor and D. Queloz. A Jupiter-mass companion to a solar-type star. 378(6555): 355–359, Nov. 1995. doi: [10.1038/378355a0](https://doi.org/10.1038/378355a0).
- V. Nascimbeni, G. Piotto, A. Börner, M. Montalto, P. M. Marrese, J. Cabrera, S. Marinoni, C. Aerts, G. Altavilla, S. Benatti, R. Claudi, M. Deleuil, S. Desidera, M. Fabrizio, L. Gizon, M. J. Goupil, V. Granata, A. M. Heras, D. Magrin, L. Malavolta, J. M. Mas-Hesse, S. Ortolani, I. Pagano, D. Pollacco, L. Prisinzano, R. Ragazzoni, G. Ramsay, H. Rauer, and S. Udry. The PLATO field selection process. *Astronomy & Astrophysics*, 658:A31, jan 2022. doi: [10.1051/0004-6361/202142256](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202142256). URL <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202142256>.

- G. I. Ogilvie. Tidal Dissipation in Stars and Giant Planets. *@@styleARA&A*, 52:171–210, Aug. 2014. doi: [10.1146/annurev-astro-081913-035941](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081913-035941).
- K. C. Patra, J. N. Winn, M. J. Holman, M. Gillon, A. Burdanov, E. Jehin, L. Delrez, F. J. Pozuelos, K. Barkaoui, Z. Benkhaldoun, N. Narita, A. Fukui, N. Kusakabe, K. Kawachi, Y. Terada, L. G. Bouma, N. N. Weinberg, and M. Broome. The Continuing Search for Evidence of Tidal Orbital Decay of Hot Jupiters. *@@styleAJ*, 159(4):150, Apr. 2020. doi: [10.3847/1538-3881/ab7374](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab7374).
- K. A. Pearson. A Search for Multiplanet Systems with TESS Using a Bayesian N-body Retrieval and Machine Learning. *@@styleAJ*, 158(6):243, Dec. 2019. doi: [10.3847/1538-3881/ab4e1c](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab4e1c).
- G. R. Ricker, J. N. Winn, R. Vanderspek, D. W. Latham, G. Á. Bakos, J. L. Bean, Z. K. Berta-Thompson, T. M. Brown, L. Buchhave, N. R. Butler, R. P. Butler, W. J. Chaplin, D. Charbonneau, J. Christensen-Dalsgaard, M. Clampin, D. Deming, J. Doty, N. D. Lee, C. Dressing, E. W. Dunham, M. Endl, F. Fressin, J. Ge, T. Henning, M. J. Holman, A. W. Howard, S. Ida, J. M. Jenkins, G. Jernigan, J. A. Johnson, L. Kaltenegger, N. Kawai, H. Kjeldsen, G. Laughlin, A. M. Levine, D. Lin, J. J. Lissauer, P. MacQueen, G. Marcy, P. R. McCullough, T. D. Morton, N. Narita, M. Paegert, E. Palte, F. Pepe, J. Pepper, A. Quirrenbach, S. A. Rinehart, D. Sasselo, B. Sato, S. Seager, A. Sozzetti, K. G. Stassun, P. Sullivan, A. Szentgyorgyi, G. Torres, S. Udry, and J. Villaseñor. Transiting exoplanet survey satellite. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 1(1):014003, oct 2014. doi: [10.1117/1.jatis.1.1.014003](https://doi.org/10.1117/1.jatis.1.1.014003). URL <https://doi.org/10.1117/1.jatis.1.1.014003>.
- J. E. Rodriguez, K. D. Colón, K. G. Stassun, D. Wright, P. A. Cargile, D. Bayliss, J. Pepper, K. A. Collins, R. B. Kuhn, M. B. Lund, R. J. Siverd, G. Zhou, B. S. Gaudi, C. G. Tinney, K. Penev, T. G. Tan, C. Stockdale, I. A. Curtis, D. James, S. Udry, D. Ségransan, A. Bieryla, D. W. Latham, T. G. Beatty, J. D. Eastman, G. Myers, J. Bartz, J. Bento, E. L. N. Jensen, T. E. Oberst, and D. J. Stevens. KELT-14b and KELT-15b: An Independent Discovery of WASP-122b and a New Hot Jupiter. *@@styleAJ*, 151(6):138, June 2016. doi: [10.3847/0004-6256/151/6/138](https://doi.org/10.3847/0004-6256/151/6/138).
- B. Smalley, D. R. Anderson, A. Collier-Cameron, A. P. Doyle, A. Fumel, M. Gillon, C. Hellier, E. Jehin, M. Lendl, P. F. L. Maxted, F. Pepe, D. Pollacco, D. Queloz, D. Ségransan, A. M. S. Smith, J. Southworth, A. H. M. J. Triaud, S. Udry, and R. G. West. WASP-78b and WASP-79b: two highly-bloated hot Jupiter-mass exoplanets orbiting F-type stars in Eridanus. *@@styleA&A*, 547:A61, Nov. 2012. doi: [10.1051/0004-6361/201219731](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201219731).
- K. G. Stassun, K. A. Collins, and B. S. Gaudi. Accurate Empirical Radii and Masses of Planets and Their Host Stars with Gaia Parallaxes. *@@styleAJ*, 153(3):136, Mar. 2017. doi: [10.3847/1538-3881/aa5df3](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aa5df3).

- A. H. M. J. Triaud, D. Queloz, C. Hellier, M. Gillon, B. Smalley, L. Hebb, A. Collier Cameron, D. Anderson, I. Boisse, G. Hébrard, E. Jehin, T. Lister, C. Lovis, P. F. L. Maxted, F. Pepe, D. Pollacco, D. Ségransan, E. Simpson, S. Udry, and R. West. WASP-23b: a transiting hot Jupiter around a K dwarf and its Rossiter-McLaughlin effect. *@@styleA&A*, 531:A24, July 2011. doi: [10.1051/0004-6361/201016367](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201016367).
- O. D. Turner, D. R. Anderson, A. C. Cameron, L. Delrez, D. F. Evans, M. Gillon, C. Hellier, E. Jehin, M. Lendl, P. F. L. Maxted, F. Pepe, D. Pollacco, D. Queloz, D. Ségransan, B. Smalley, A. M. S. Smith, A. H. M. J. Triaud, S. Udry, and R. G. West. WASP-120 b, WASP-122 b, and WASP-123 b: Three newly discovered planets from the WASP-south survey. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 128(964):064401, may 2016. doi: [10.1088/1538-3873/128/964/064401](https://doi.org/10.1088/1538-3873/128/964/064401). URL <https://doi.org/10.1088/1538-3873/128/964/064401>.
- O. D. Turner, D. R. Anderson, A. Collier Cameron, L. Delrez, D. F. Evans, M. Gillon, C. Hellier, E. Jehin, M. Lendl, P. F. L. Maxted, F. Pepe, D. Pollacco, D. Queloz, D. Ségransan, B. Smalley, A. M. S. Smith, A. H. M. J. Triaud, S. Udry, and R. G. West. WASP-120 b, WASP-122 b, AND WASP-123 b: Three Newly Discovered Planets from the WASP-South Survey. *@@stylePASP*, 128(964):064401, June 2016. doi: [10.1088/1538-3873/128/964/064401](https://doi.org/10.1088/1538-3873/128/964/064401).
- S. Vissapragada, A. Chontos, M. Greklek-McKeon, H. A. Knutson, F. Dai, J. Pérez González, S. Grunblatt, D. Huber, and N. Saunders. The Possible Tidal Demise of Kepler’s First Planetary System. *@@styleApJ*, 941(2):L31, Dec. 2022. doi: [10.3847/2041-8213/aca47e](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aca47e).
- J. N. Winn. Transits and Occultations. *arXiv e-prints*, art. arXiv:1001.2010, Jan. 2010. doi: [10.48550/arXiv.1001.2010](https://doi.org/10.48550/arXiv.1001.2010).
- S. W. Yee, J. N. Winn, H. A. Knutson, K. C. Patra, S. Vissapragada, M. M. Zhang, M. J. Holman, A. Shporer, and J. T. Wright. The orbit of WASP-12b is decaying. 888 (1):L5, dec 2019. doi: [10.3847/2041-8213/ab5c16](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab5c16). URL <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab5c16>.