

HD 17156b : un nuovo pianeta transitante di periodo 21.2 giorni in orbita eccentrica

M. Barbieri¹

LAM, Traverse du Siphon, BP 8, Les Trois Lucs, 13376 Marseille Cedex 12, France
e-mail: mauro.barbieri@oamp.fr

13 novembre 2007

Abstract

We report the discovery of transits by the $3.1M_{\text{Jup}}$ companion to the $V=8.17$ G0V star HD 17156. The transit was observed by three independent observers on Sept. 9/10, 2007 (two in Italy and one in the Canary Islands), who obtained detections at confidence levels of 3.0σ , 5.3σ , and 7.9σ , respectively. Analyses of the 7.9σ data set indicates a transit depth $d = 0.0062 \pm 0.0004$ and a transit duration $t = 186 \pm 5$ min. These values are consistent with the transit of a Jupiter-sized planet. This planet occupies a unique regime among known transiting extrasolar planets, both as a result of its large orbital eccentricity ($e = 0.67$) and long orbital period ($P = 21.2$ d). The planet receives a 26-fold variation in insolation during the course of its orbit, which will make it a useful object for characterizing exoplanetary atmospheric dynamics.

1. Introduzione

Negli ultimi anni la scoperta pianeti extrasolari transitanti è cresciuta rapidamente, contando un totale ad oggi (novembre 2007) di 26 pianeti transitanti noti (si veda la lista ufficiale in Tab 1), su un totale di circa 250 pianeti extrasolari.

L'insieme di questi pianeti consiste sostanzialmente di pianeti di massa gioviana di breve periodo, denominati in gergo astronomico *Giovi caldi*, i cui prototipi sono HD 209458b (Charbonneau et al., 2000; Henry et al., 2000) e HD 189733b (Bouchy et al., 2005). Questi pianeti tendono ad avere $M \sim 1M_{\text{Jup}}$, $2 < P < 5$ giorni, ed ad essere su orbite circolarizzate marealmente.

Negli ultimi anni, due importanti scoperte hanno significativamente allargato lo spazio dei parametri occupato dai pianeti transitanti. Il primo è HD 147506b (Bakos et al., 2007) con $M = 8.04 M_{\text{Jup}}$ che è il pianeta extrasolare più massivo finora noto, inoltre era anche il pianeta di periodo orbitale più lungo (5.63 giorni) e dotato di una notevole eccentricità $e \sim 0.5$. Il secondo dall'altro lato dell'intervallo delle masse è Gl 436b (Butler et al., 2004; Gillon et al., 2007) con massa $M = 0.07M_{\text{Jup}}$, un periodo orbitale di 2.64 giorni ed una eccentricità $e = 0.15 \pm 0.01$ (Deming et al., 2007). Questi due pianeti differiscono in massa di oltre due ordini di grandezza e la loro grande eccentricità orbitale è in grado di fornire importanti informazioni.

Al momento le osservazioni infrarosse dei pianeti extrasolari effettuate con il telescopio spaziale Spitzer forniscono un quadro incompleto ed in alcuni casi forniscono dei dati contraddittori. Quello non è ancora chiaro è come la direzione dei venti e la distribuzione della temperatura si comportino in funzione dell'altezza atmosferica e delle longitudini e latitudini planetarie. Inoltre il parametro più importante, la costante di tempo di rilassamento termico del trasporto radiativo, non è ancora stata misurata nei pianeti di corto periodo orbitale, di conseguenza le simulazioni volte a determinare l'aspetto atmosferico di questi pianeti (Cho et al., 2003; Cooper & Showman, 2005; Burkert et al., 2005; Langton & Laughlin, 2007; Dobbs-Dixon & Lin,

2007) hanno mostrato un notevole disaccordo nell'aspetto risultante. Questa mancanza di uniformità nei risultati proviene in gran parte dalla mancanza di una misura univoca della costante di tempo radiativo atmosferico.

Per ottenere una misura univoca di questo parametro è necessario avere un pianeta di lungo periodo e grande eccentricità. Le osservazioni fotometriche di un simile pianeta effettuate con Spitzer durante il tempo del passaggio al periastro permetterebbero di ottenere l'incremento di flusso ricevuto dalla propria stella e calcolare quindi la costante di tempo radiativa dell'atmosfera planetaria.

I periodi orbitali dei pianeti transitanti noti, sono tutti minori di 6 giorni, questo limite è dovuto all'intrinseca bassa probabilità di osservare transiti all'aumentare del periodo orbitale, e al fatto che le campagne di ricerca fotometriche da Terra diventano fortemente incomplete quando si cercano periodi orbitali maggiori di 5 giorni. Per cercare pianeti transitanti di periodo orbitale maggiore di 5 giorni la strategia migliore è di osservare stelle già note per ospitare dei pianeti (noti a partire dalle misure di velocità radiale) e osservarle fotometricamente nel momento che la soluzione orbitale dalle velocità radiali suggerisce che vi possa essere un transito. Questa strategia inoltre ha il vantaggio che le stelle tendono ad essere brillanti e facilmente osservabili per ulteriori osservazioni di caratterizzazione. I pianeti transitanti che hanno fornito maggiori informazioni (HD 209458b, HD 149026b, HD 189733b, e Gl 436b) sono tutti stati scoperti tramite misurazioni di velocità radiali prima della scoperta fotometrica del loro transito.

I pianeti transitanti di lungo periodo sono un'opportunità ideale per osservatori dotati di piccoli telescopi, Seagroves et al. (2003) ha recentemente suggerito che una rete di telescopi tutti in grado di ottenere fotometria a livello di $\sim 1\%$, può facilmente superare in termini di efficienza di recupero dei transiti, un singolo telescopio di grande diametro. Negli ultimi 5 anni la collaborazione Transitsearch.org ha condotto numerose campagne di osservazione di pianeti transitanti e ha escluso (o reso altamente improbabile) i transiti di HD 80606b, Gl 876b, e Gl 876c

nome	$\frac{M_p}{M_{Jup}}$	$\frac{R_p R_{pdown} R_{pup}}{R_{Jup}}$	P giorni	a AU	e	$\frac{M_\star}{M_\odot}$	$\frac{R_\star}{R_\odot}$	T_{eff} K	[Fe/H]
HD17156	3.12 ± 0.5	1.15 1.04 1.26	21.22	0.15	0.67 ± 0.08	1.2 ± 0.1	1.47 ± 0.15	6079 ± 56	0.24 ± 0.03
HD147506	8.04 ± 0.04	0.98 0.94 1.02	5.63341	0.0685	0.517 ± 0.002	1.32 ± 0.08	1.48 ± 0.05	6290 ± 110	0.12 ± 0.08
HD149026	0.330 ± 0.02	0.726 0.662 0.790	2.87598	0.042	0	1.3 ± 0.1	1.45 ± 0.1	6147 ± 50	0.36 ± 0.05
HD189733	1.15 ± 0.04	1.154 1.137 1.171	2.218581	0.031	0	0.82 ± 0.03	0.755 ± 0.011	5050 ± 50	-0.03 ± 0.04
HD209458	0.657 ± 0.006	1.320 1.295 1.345	3.52474859	0.047	0.07 ± 0.02	1.101 ± 0.064	1.125 ± 0.022	6117 ± 26	0.02 ± 0.03
GJ436	0.071 ± 0.006	0.374 0.358 0.390	2.64385	0.028	0.15 ± 0.01	0.44 ± 0.04	0.463 ± 0.02	3200 ± 200	-0.03 ± 0.2
TrES-1	0.76 ± 0.05	1.081 1.052 1.110	3.0300737	0.0393	0.135 ± 0.10	0.89 ± 0.035	0.811 ± 0.020	5250 ± 75	-0.02 ± 0.06
TrES-2	1.198 ± 0.053	1.220 1.178 1.265	2.47063	0.0367	0	0.98 ± 0.062	1.00 ± 0.035	5850 ± 50	-0.15 ± 0.10
TrES-3	1.92 ± 0.23	1.295 1.214 1.376	1.30619	0.0226	-	0.90 ± 0.15	0.802 ± 0.046	5720 ± 150	0.00 ± 0.2
TrES-4	0.84 ± 0.10	1.674 1.580 1.768	3.553945	0.0488	-	1.22 ± 0.17	1.738 ± 0.092	6100 ± 150	0.00 ± 0.2
XO-1	0.90 ± 0.07	1.184 1.166 1.212	3.941534	0.0488	-	1.0 ± 0.03	0.928 ± 0.033	5750 ± 13	0.015 ± 0.03
XO-2	0.57 ± 0.06	0.973 0.965 1.003	2.615838	0.037	-	0.98 ± 0.02	0.964 ± 0.02	5340 ± 32	0.45 ± 0.02
HAT-P-1	0.53 ± 0.04	1.203 1.152 1.254	4.46529	0.0551	0.09 ± 0.02	1.12 ± 0.09	1.115 ± 0.043	5975 ± 45	0.13 ± 0.02
HAT-P-3	0.599 ± 0.026	0.890 0.844 0.936	2.899703	0.03894	0	0.936 ± 0.05	0.824 ± 0.04	5185 ± 46	0.27 ± 0.04
HAT-P-4	0.68 ± 0.04	1.27 1.22 1.32	3.056536	0.0446	0	1.26 ± 0.10	1.59 ± 0.07	5860 ± 80	0.24 ± 0.08
HAT-P-5	1.06 ± 0.11	1.26 1.21 1.31	2.788491	0.04075	0	1.16 ± 0.06	1.17 ± 0.05	5960 ± 100	0.24 ± 0.15
HAT-P-6	1.057 ± 0.119	1.330 1.269 1.391	3.852985	0.05235	0	1.29 ± 0.06	1.46 ± 0.06	6570 ± 80	-0.13 ± 0.08
WASP-1	0.867 ± 0.073	1.443 1.404 1.482	2.519961	0.0382	-	1.15 ± 0.09	1.453 ± 0.032	6110 ± 245	0.23 ± 0.08
WASP-2	0.88 ± 0.07	1.038 0.988 1.088	2.152226	0.0307	-	0.79 ± 0.09	0.813 ± 0.032	5200 ± 200	0.00 ± 0.2
WASP-3	1.76 ± 0.11	1.31 1.17 1.38	1.846834	0.0317	-	1.24 ± 0.09	1.31 ± 0.09	6400 ± 100	0.00 ± 0.2
OGLE-TR-10	0.61 ± 0.13	1.22 1.15 1.34	3.101278	0.04162	0	1.10 ± 0.05	1.14 ± 0.08	6075 ± 86	0.28 ± 0.10
OGLE-TR-56	1.29 ± 0.12	1.30 1.25 1.35	1.211909	0.0225	0	1.17 ± 0.04	1.32 ± 0.06	6119 ± 62	0.19 ± 0.07
OGLE-TR-111	0.52 ± 0.13	1.01 0.97 1.05	4.0144479	0.0467	0	0.81 ± 0.02	0.831 ± 0.031	5044 ± 83	0.19 ± 0.07
OGLE-TR-113	1.35 ± 0.19	1.09 1.06 1.12	1.4324757	0.0229	0	0.78 ± 0.02	0.77 ± 0.02	4804 ± 106	0.15 ± 0.10
OGLE-TR-132	1.14 ± 0.12	1.18 1.11 1.25	1.689868	0.0299	0	1.26 ± 0.03	1.34 ± 0.08	6210 ± 59	0.37 ± 0.07
OGLE-TR-182	1.01 ± 0.115	1.13 1.05 1.37	3.97910	0.051	0	1.14 ± 0.05	1.14 ± 0.15	5924 ± 64	0.37 ± 0.08

Tabella 1. Elenco dei pianeti extrasolari noti per il loro transito. Dall'elenco sono esclusi i pianeti solo annunciati e non confermati per i quali non esiste una pubblicazione professionale di riferimento al momento attuale (novembre 2007).

(Shankland et al., 2006).

In questo articolo riportiamo un successo, la storica scoperta del primo transito di un pianeta extrasolare effettuata da astrofili.

La scoperta di HD 17156b è stata recentemente pubblicata dal consorzio N2K sulla base delle misure di velocità radiali ottenute con i telescopi Keck e Subaru (Fischer et al., 2007). La soluzione orbitale indica che la massa è $M_{sin i} = 3.12 M_{Jup}$, il periodo è 21.22 giorni, e l'eccentricità orbitale $e \sim 0.67$. Fischer et al. (2007) riportano inoltre che la stella è una G0V di magnitudine $V=8.17$, massa $1.2 M_\odot$ e raggio $1.47 R_\odot$. Il semiasse maggiore orbitale del pianeta è $a = 0.15 AU$ che combinato con l'eccentricità fornisce una distanza di periastro $a_{per} = a \times (1 - e) = 0.0495 AU = 7.2 R_\star$. La longitudine del periastro risulta essere $\omega = 121 \pm 11^\circ$. In questo modo la geometria orbitale si presenta molto favorevole per l'osservazione di un transito con una probabilità a priori pari a:

$$Prob = 0.0045 \left(\frac{1 AU}{a} \right) \left(\frac{R_\star + R_p}{R_\odot} \right) \left[\frac{1 + e \cos(\frac{\pi}{2} - \omega)}{1 - e^2} \right] = 11.9\%$$

Nell'articolo di scoperta, Fischer et al. (2007) indicano di avere ottenuto 241 misurazioni fotometriche della stella con il telescopio robotico T12 APT a Patagonia (Arizona), su di un periodo di 179 giorni e con una dispersione delle misure pari a 0.0024 mag. Non è stata osservata nessuna periodicità legata al periodo di rotazione stellare e le osservazioni hanno campionato circa il 25% della finestra osservativa del transito non evidenziando nessuna variazione.

Dopo che l'articolo è stato reso pubblico, la stella è stata aggiunta alla lista dei candidati di Transitsearch.org¹ e gli osservatori dell'emisfero nord sono stati ripetutamente incoraggiati ad ottenere la fotometria della stella². La prima finestra utile si è presentata il 9/10 settembre 2007, con la centralità del transito predetta per HJD= 2454353.65 ± 0.30 (Fig.1). La determi-

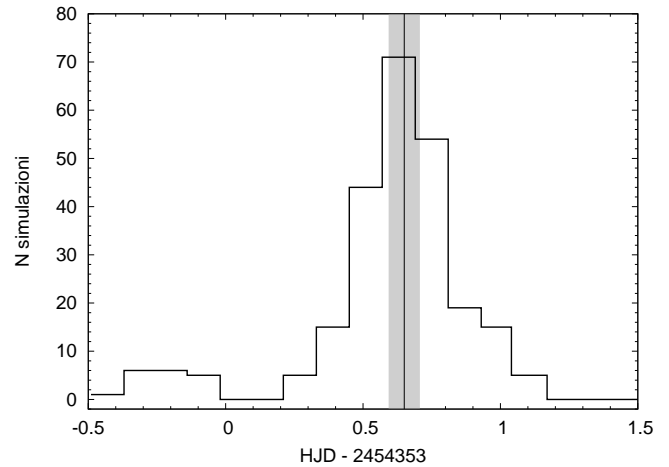


Figura 1. Distribuzione del tempo della centralità del transito di HD 17156b per l'evento del 9/10 settembre 2007. La fascia grigia rappresenta la durata del transito attorno alla centralità prevista per HJD = 2454353.65.

nazione dell'errore sul del momento della centralità è avvenuto utilizzando un ricampionamento bootstrap.

2. Osservazioni

L'evento del 9/10 settembre è stato osservato in maniera indipendente da differenti astrofili in Europa e negli Stati Uniti. Alcuni giorni precedenti al transito ho contattato alcuni astrofili: Daniele Gasparri, Claudio Lopresti, Federico Manzini e Giovanni Sostero, chiedendo la loro disponibilità ad effettuare le osservazioni di questa stella durante tutta la notte. La risposta è stata favorevole da parte di tutti e dopo qualche giorno di febbrili contatti per la pianificazione delle osservazioni e del setup strumentale, la notte del 9/10 settembre sono state condotte le osservazioni. Sfortunatamente le condizioni meteorologiche non

¹ <http://207.111.201.70/transitsearch/dynamiccontent/candidates.html>

² see www.oklo.org

hanno permesso di ottenere una copertura dell'evento da parte di tutti gli osservatori coinvolti. Una piccola perturbazione proveniente da Est ha nel corso della notte impedito le osservazioni a tutti gli osservatori, permettendo solo ad uno (Lopresti) di ottenere dati fotometrici per tutta la notte.

La strumentazione utilizzata dagli osservatori durante la notte del 9/10 settembre 2007 è elencata in tabella 2.

3. Analisi dei dati

L'analisi preliminare dei dati di Gasparri e Lopresti mostrava chiaramente la presenza di una variazione della curva di luce della stella, molto simile alla forma di un transito. La successiva acquisizione delle immagini ottenute da Almenara ha permesso di studiare approfonditamente la natura di questa variazione e di inferire in modo univoco la natura planetaria della variazione nella curva di luce.

Le immagini grezze sono state ridotte utilizzando le immagini di calibrations (flat field, dark e bias) riprese da ogni osservatore. Dei 6 set di dati solo tre (come già accennato) coprivano la finestra centrale del transito ed erano quelli di Almenara, Gasparri e Lopresti, sfortunatamente i 3 set non erano uniformi in copertura temporale e accuratezza fotometrica.

I 3 set di dati sono stati analizzati con delle routine in linguaggio IDL per ottenere fotometria d'apertura. Il centro dell'apertura è stato calcolato tramite un fit gaussiano e il raggio dell'apertura è stato fissato a 15-20 px in funzione del set di dati usato, il fondo cielo è stato rimosso stimando il suo valore in un anello attorno all'apertura. HD 17156 e le altre stelle brillanti nel campo di vista sono state analizzate nello stesso modo ed è stata costruita una curva di luce di riferimento sommando i flussi delle stelle di riferimento. Per ottenere la curva di luce normalizzata, il flusso di HD 17156 è stato diviso per quello della curva di riferimento. Brevemente vengono descritti i dati utilizzati:

- Almenara (A): Da 6 ore prima della fase di centralità del transito a 3.4 ore dopo. La dispersione delle misure è grande all'inizio e migliora verso la fine passando da 0.5% a 0.4%, i dati sono stati ottenuti filtrando la curva di luce originale con un filtro k-sigma (Savitzky & Golay, 1964). Per costruire la curva di luce di riferimento sono state utilizzate due stelle. La notte estremamente ventosa ha condizionato la qualità delle immagini rendendo sovente le immagini delle stelle doppie o anche triple, la mancanza di dati durante la fase centrale è dovuto alla perdita della guida del telescopio a causa del forte vento.
- Gasparri (G): Da 2 ore prima della fase di centralità del transito a 1.1 ore dopo. Per la costruzione della curva di luce di riferimento sono state usate 3 stelle, la dispersione dei residui è ~0.4%. Poco dopo la fase di centralità del transito vi è stato un aumento della curva di luce che non è stato possibile correggere e dovuto sostanzialmente alla presenza di veli e nuvole che coprivano in maniera differente HD 17156 e ciascuna delle stelle di riferimento.
- Lopresti (L): Da 4 ore prima della fase di centralità del transito a 1.5 ore dopo, gli ultimi 45 minuti sono stati ripresi ruotando di 180° il CCD (a causa della montatura utilizzata). Non è stato possibile correggere l'effetto della rotazione a causa di effetti di flat field. Per evitare l'introduzione di spostamenti arbitrari nelle curve di luce abbiamo ignorato questi ultimi dati. Per la costruzione della curva di luce di riferimento sono state usate 3 stelle, la dispersione dei residui è ~0.9%.

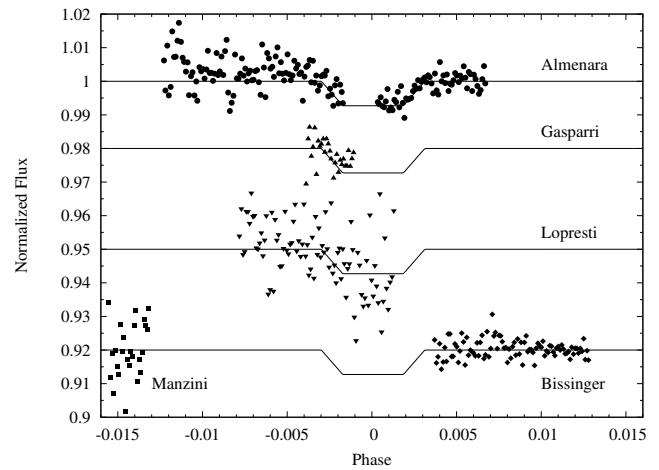


Figura 2. Curva di luce normalizzata di HD 17156 al momento del transito e la curva di luce del trapezoide di best fit con i dati di Almenara (linea continua). Per una migliore visualizzazione, i set di dati dei differenti osservatori sono stati spostati di una quantità arbitraria. La centralità del transito è a HJD 2454353.61

I set di dati finali sono rappresentati in Fig. 2. I tre set di dati sono stati analizzati cercando la curva di luce trapezoidale che meglio li riproducesse (best fit), questa analisi è stata effettuata lasciando quattro parametri liberi: la fase³ della centralità, la durata del transito, la profondità del transito e durata delle fasi ingresso e uscita (ovvero la durata dei tempi tra primo e secondo contatto e tra terzo e quarto contatto). La significatività del rivelamento del transito è espresso come il valore della profondità del trapezoide divisa per la dispersione del fit. Per il set (A) è stato ottenuto un valore di significatività di 5.6σ che sale a 7.9σ una volta che i dati in transito vengono corretti con un fit parabolico ottenuto dalle parti fuori transito per tenere conto degli effetti di estinzione differenziale all'interno del campo di vista. Per i set di dati (G) ed (L) i parametri liberi del trapezoide sono stati solo due: la fase della centralità e la profondità del transito, mentre gli altri due parametri sono stati imposti dal fit del set (A). La significatività ottenuta rispettivamente per i due set è stata 2.97σ (G) and 5.3σ (L).

Data la non ottima qualità dei tre set di dati, non è stata tentata un'analisi combinata, in particolare i punti zero (valore della curva luce al di fuori del transito) delle curve di luce dei set (G) ed (L) non erano sufficientemente chiari e la loro inclusione nel fit avrebbe dominato il risultato finale. Quindi è stato analizzato solo il set (A) per determinare le caratteristiche del transito, la scelta di questo set di dati è dovuta al fatto che era il più omogeneo e specificatamente è stata utilizzata la parte meno rumorosa dei dati ovvero l'uscita del transito. Per l'analisi sono state utilizzate due strategie: la prima ottenere il fit con un trapezoide per stimare la profondità del transito, la seconda quella di utilizzare per il fit il formalismo per le i transiti di orbite eccentriche esposto da Giménez (2006).

Per ottenere il valore della curva di luce al di fuori del transito, il fit con il trapezoide è stato effettuato in due passi. 1) Il trapezoide ottenuto dal fit è stato sottratto alla curva di luce. Sui residui (curva di luce - trapezoide) è stato ulteriormente cercato il fit con una linea e questa linea è stata sottratta alla curva di luce originale. 2) Su questa curva di luce è stato effettuato un altro fit con un trapezoide il quale ha fornito il valore della profondità del transito e la fase (tempo) dell'uscita del transito.

³ con fase si intende $\phi = \frac{HJD - T_0}{P}$

nome osservatore	luogo	diametro cm	rapp.foc.	CCD	F.o.V.	scala "/px	filtro	tempo esp s	data
Almenara	Canarie	30	f/10	SBIG STL-1001E	29' × 29'	1.7	Rc	7	9/10 settembre
Bissinger	California	40	f/6	SBIG ST10XME	21' × 14'	0.9	I	3	9/10 settembre
Gasparri	Perugia	25	f/4.8	SBIG ST7-XME	20' × 13'	1.6	I	20	9/10 settembre
Lopresti	La Spezia	18	f/4	SBIG ST10XME	20' × 47'	1.7	R	5	9/10 settembre
Manzini	Sozzago(VA)	40	f/6.7	HiSIS43ME	18' × 11'	0.7	R	3	9/10 settembre
Guido e Sostero	New Mexico	25	f/3.4	SBIG ST8XE	37' × 56'	2.2	V	25	30 sett / 1 ott

Tabella 2. Strumentazione utilizzata dagli osservatori

Parametro	Valore
T_{centr} (HJD)	$454\,353.61 \pm 0.02$
ϕ_{uscita}	0.003050 ± 0.000075
durata transito (giorni)	0.1294 ± 0.0367
$k = R_p/R_\star$	0.08007 ± 0.0028
i (gradi)	87.89 ± 0.10
R_p (R_{Jup})	1.15 ± 0.11
ρ_p (g/cm^3)	2.58 ± 0.84

Tabella 3. Parametri planetari e del transito ottenuti dal best fit.

Gli errori su queste quantità sono stati determinati con un'analisi bootstrap, simulando 20 000 curve di luce artificiali ottenute ri-ordinando casualmente il 50% dei residui della curva di luce originale e aggiungendoli al trapezoide di best fit. La procedura in due passi sopraesposta è stata usata per ogni curva di luce artificiale. La profondità del trapezoide ottenuta è 0.0062 ± 0.0004 .

La seconda strategia adottata consisteva nell'ottenere il fit utilizzando il formalismo di Giménez (2006). I parametri ottenuti in questo caso sono stati: fase di uscita del transito (quarto contatto), il rapporto $k = R_p/R_\star$ tra i raggi del pianeta e della stella, l'inclinazione orbitale i , e tre parametri per definire il fit parabolico alla curva di luce al di fuori del transito. I coefficienti di oscuramento al bordo sono stati fissati ad $u_+ = 0.65$ e $u_- = -0.05$ determinati dai valori corrispondenti ai parametri fisici di HD 17156 dalle tabelle di Claret (2000) (i coefficienti di oscuramento al bordo sono definiti come $u_+ = u_a + u_b$ e $u_- = u_a - u_b$). L'eccentricità e la longitudine del periastro sono state fissate ai valori ottenuti da Fischer et al. (2007).

La miglior soluzione è stata ottenuta minimizzando il valore di χ^2 tra il modello e la curva di luce osservativa utilizzando l'algoritmo Amoeba (Press et al., 1992). Gli errori sono stati stimati con un'analisi bootstrap simile a quella descritta sopra, generando 1 500 curve di luce artificiali. I risultati ottenuti dal best fit sono riassunti in Tab.3.

Utilizzando il valore dell'inclinazione ottenuto dal fit e il valore $M \sin i$ noto, la massa del pianeta è $M_p = M \sin i / \sin i = 3.12 \pm 0.5 M_{Jup}$, utilizzando il raggio della stella e il valore di k il raggio del pianeta risulta $R_p = k \times R_\star = 1.15 \pm 0.11 R_{Jup}$, la densità media risultante per il pianeta è $\rho_p = 3 \times M_p / (4\pi R_p^3) = 2.58 \pm 0.84 g/cm^3$. I dati sono raccolti in Tab.3, mentre la curva di luce del best fit e i relativi residui sono rappresentati in Fig.3.

Come verifica aggiuntiva è stata analizzata la fotometria ottenuta dal satellite Hipparcos (Perryman & ESA, 1997). Hipparcos ha osservato HD 17156 (HIP 13192) 142 volte con una deviazione standard delle misure pari a 0.0013 mag. L'analisi della curva di luce rifasata sul periodo orbitale del pianeta ha mostrato solo due punti vicini alla finestra del transito.

Per ottenere una conferma indipendente del transito, è stata organizzata una ulteriore campagna osservativa per il tempo esatto del transito successivo nella notte tra il 30 settembre e il 1

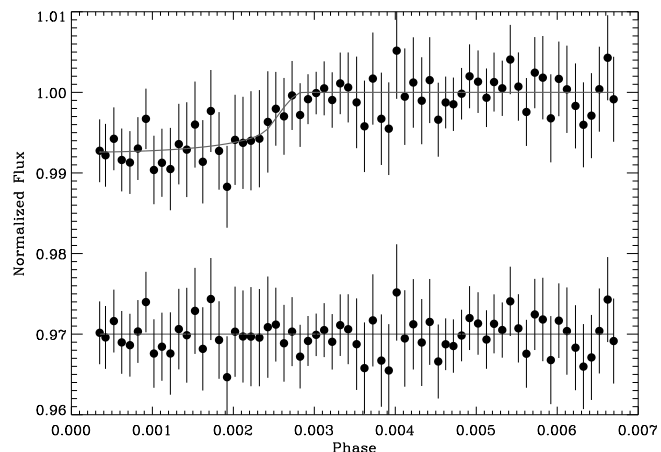


Figura 3. *Alto* : Curva di luce normalizzata della parte di dati del set (A) utilizzata per caratterizzare il parametri planetari e del transito. Le barre d'errore in ogni punto sono calcolate come la deviazione standard dei 20 punti più vicini al punto i -esimo, nel grafico le barre d'errore sono due volte i valori così ottenuti. La linea continua è il modello di best fit ottenuto utilizzando il formalismo di Gimenez, come descritto nel testo. *Basso* : I residui dei dati rispetto al fit.

ottobre. Questo transito non era osservabile dall'Europa ma solo dalla regione continentale del Nord America. Le osservazioni sono state condotte sia da astronomi professionisti sia ancora una volta da astrofili. Le cattive condizioni metereologiche su buona parte degli Stati Uniti e in modo specifico in Arizona hanno impedito l'osservazione del transito da parte del team di David Charbonneau. Guido e Sostero utilizzando un telescopio remoto in New Mexico sono riusciti ad osservare la quasi totalità del transito, ma sfortunatamente le fasi critiche di ingresso ed uscita del transito sono andate perse a causa del passaggio di un banco di nubi per l'ingresso, e dell'inizio della pioggia per l'uscita, il che ha reso inutilizzabile il set di dati.

Le condizioni metereologiche sono state più clementi nel sud della California specificatamente dall'Osservatorio di Mount Laguna da dove il gruppo composto da Irwin, Welsh, Rajan, Nutzman e Charbonneau è riuscito ad ottenere la chiara segnatura nella curva di luce dovuta all'ingresso del transito a circa 06:30 UT del 1 Ottobre (Charbonneau, comunicazione privata), ancora una volta il maltempo ha fatto perdere anche a questi osservatori l'uscita del transito.

Inoltre Davies un astrofilo americano dai sobborghi di San Diego in California ha ottenuto circa 10 000 immagini che coprivano tutto il transito e l'analisi preliminare dei dati ha confermato la presenza sia della fase di ingresso del transito che di quella di uscita.

Con queste conferme alla nostra iniziale scoperta, si è scritta una importante pagina nella storia dell'astronomia: per la prima

volta in assoluto degli agguerriti astrofili hanno scoperto con la loro strumentazione un transito di un pianeta extrasolare.

4. Discussione

La scoperta di un transito in un pianeta con periodo orbitale di 3 settimane dimostra l'utilità di una rete di piccoli telescopi in grado di ottenere osservazioni fotometriche dei pianeti per i quali siano stati determinati i parametri orbitali dalla misura delle velocità radiali. Inoltre il transito di HD 17156b offre un gran numero di possibilità di osservazioni addizionali.

Con la sua grande eccentricità orbitale e piccola distanza di periastro HD 17156b è in una curiosa parentela con HD 80606b, HD 147506b, e HD 108147b. Tutti questi 3 pianeti occupano una regione del piano $a-e$ dove essi possono essere soggetti ad effetti di dissipazione mareale, quindi possono generare una significativa quantità di calore in eccesso al proprio calore interno.

Le nostre misurazioni indicano chiaramente che il riscaldamento mareale non è in grado di gonfiare il raggio di questo pianeta, infatti il raggio nominale predetto dai modelli di (Bodenheimer et al., 2003) per questo pianeta è pari a $R = 1.1R_{Jup}$, in pieno accordo con il valore da noi misurato $R_p = 1.15 \pm 0.11R_{Jup}$.

Ulteriori osservazioni fotometriche dei transiti futuri permetteranno di determinare con maggiore accuratezza l'inclinazione orbitale di HD 17156b, il che potrà fornire una previsione accurata sulla possibilità di osservare o meno il transito secondario (cioè quando il pianeta viene eclissato dalla stella) e di fornire una migliore stima del raggio planetario. Nel caso in cui il transito secondario sia visibile vi è la non trascurabile possibilità di ottenere una misura diretta della luminosità prodotta in eccesso dalle interazioni mareali tra stella e pianeta (Deming et al., 2007).

Come conseguenza della sua orbita estremamente eccentrica, nei 10.6 giorni che separano periastro e apoastro, HD 17156b riceve al periastro 26 volte più flusso stellare di quando si trova all'apoastro. Queste condizioni estreme di irraggiamento forzato possono indurre dei flussi dinamici nell'atmosfera del pianeta (Langton & Laughlin, 2007) che potrebbero essere potenzialmente osservabili.

Le grandi forze mareali esercitate dalla stella sul pianeta durante il momento del passaggio al periastro hanno sicuramente forzato il pianeta in uno stato di rotazione pseudo-sincronizzata con il periodo orbitale (si veda ad esempio Goldreich & Peale 1968; Hut 1981; Papaloizou & Ivanov 2005). La modulazione della curva di luce infrarossa indotta dalla rotazione del pianeta subito dopo il passaggio al periastro è potenzialmente osservabile e potrebbe essere molto utile nello scegliere la corretta teoria che rappresenta gli stati di rotazione pseudo-sincrona.

HD 17156b con le sue 3 masse gioviane è un pianeta di massa intermedia, tipicamente questo tipo di pianeti di massa intermedia/elevata si ritrovano frequentemente attorno ad una delle componenti di una stella binaria o multipla (Desidera & Barbieri, 2007), inoltre è dotato di una grande eccentricità. L'insieme di queste caratteristiche favorisce come scenario di formazione per il pianeta o quello delle migrazioni orbitali in presenza di un disco protoplanetario o quello di una evoluzione dinamica in presenza di un compagno massivo che ne abbia perturbato l'orbita. Questo compagno potrebbe essere sia una stella compagna sia un ulteriore pianeta nel sistema.

Per alcuni dei pianeti con periodi orbitali brevi e di massa $m \sin i > 1.5 M_{Jup}$ orbitanti attorno a stelle singole vi sono indicazioni di una sostanziale perturbazione dinamica dovuta alla

presenza di altri corpi nel sistema. Ad esempio HD 118203b, HD 68988b e HIP 14810b che hanno tutti eccentricità anomalmente grandi che possono indicare la presenza di ulteriori compagni, anche con masse al di sotto (o periodi orbitali più lunghi) della attuale soglia di rivelazione dalle misure di velocità radiali. Questo è il caso di HD 68988b e HIP 14810b, i quali hanno compagni planetari di lungo periodo (Butler et al., 2006).

In un sistema planetario formato da più pianeti, a causa delle mutue interazioni le eccentricità orbitali possono crescere fino al punto che le orbite relative tendono ad incrociarsi. I successivi e ripetuti incontri ravvicinati generano un successivo periodo di evoluzione caotica del sistema, il quale termina tipicamente quando uno di questi pianeti viene espulso dal sistema su di un'orbita iperbolica, e il pianeta rimanente viene immesso su un'orbita di breve periodo molto eccentrica (Marzari & Weidenschilling, 2002). Questo meccanismo di interazioni orbitali viene chiamato il meccanismo dei Jumping Jupiters (Giovi Saltellanti).

In alternativa in un sistema planetario precursore di quello attuale un compagno stellare può indurre instabilità dinamica ed eventualmente produrre una configurazione simile a quella attuale attraverso meccanismi di interazioni dinamica tra i vari pianeti allo stesso modo del caso precedentemente descritto. L'origine di queste perturbazioni può essere dovuta a interazione dinamica diretta tra la stella compagna e i pianeti (Marzari & Barbieri, 2007a,b) o di risonanze di tipo Kozai (Wu & Murray, 2003).

Riguardo alla presenza di compagni stellari l'analisi delle immagini di archivio POSSI, POSSII, e 2MASS non ha mostrato nessuna chiara associazione tra le deboli stelle di campo e HD 17156. L'unica sorgente realmente interessante è 2MASS 02494068+7144583 che possiede un rimarcabile moto proprio dal catalogo USNO-B1, ma in direzione opposta a quello di HD 17156. La stella è a 22.2" da HD 17156, se essa è alla stessa distanza la separazione apparente è ~ 1740 AU.

5. Conclusioni

La combinazione di successive misurazione delle velocità radiali e delle misure fotometriche di HD 17156, può fornire la speranza di scoprire e caratterizzare ulteriori pianeti nel sistema.

Il prossimo transito di HD 17156b visibile dall'Europa avverrà nella notte tra del 3/4 dicembre 2007. Per l'occasione vi saranno molti telescopi professionali che saranno puntati sulla stella: 1.8m Cima Ekar e 1.2m di Alta Provenza per ottenere la curva di luce fotometrica con un maggiore grado di accuratezza, e il Telescopio Nazionale Galileo alle Canarie per determinare l'entità dell'effetto Rossiter-McLaughlin, ossia dell'anomalia delle velocità radiali durante il transito. Nonostante questo dispiegamento di grandi telescopi sarà lo stesso utile osservare il transito anche con strumenti amatoriali per fornire ulteriori dati utili per migliorare le effemeridi della centralità del transito.

La prosecuzione delle osservazioni fotometriche nei prossimi mesi può mettere in luce variazioni dei tempi della fase centrale che possono essere ricondotte alla presenza di ulteriori corpi. La lista dei prossimi transiti osservabili dall'Europa è riportata in Tab.A, un prontuario sulla pianificazione delle osservazioni e della riduzione dei dati è riportato in Appendice.

Acknowledgements. Voglio ringraziare tutte le persone che in un modo o nell'altro sono state coinvolte in questa grande avventura che è stata la scoperta di questo transito. In primo luogo voglio ringraziare il mio collega Roi Alonso per tutte le discussioni costruttive e per aver dedicato molto del suo tempo libero a questo arduo lavoro. Secondariamente Gregory Laughlin per l'acutezza di visione e per aver creato quel magnifico progetto che è diventato Transitssearch.org. Poi voglio ringraziare i vari osservatori e soprattutto quelli italiani che hanno condiviso con

HD 17156 = HIP 13192 = TYC 4321-1320-1 = SAO 4737		
Coordinate e magnitudini		Parametri fisici
RA	02 49 44.4875	M_V 3.7
DE	+71 45 11.636	$[Fe/H]$ 0.24
d (pc)	78.24	T_{eff} (K) 6080
B	8.76	$\log g$ 4.29
V	8.17	M_* (M_\odot) 1.2
R	7.78	R_* (R_\odot) 1.47
I	7.57	L_* (L_\odot) 2.6
J	7.08	età (Gyr) 5.7
H	6.86	
K	6.76	
B-V	0.59	

Tabella A.1. Caratteristiche di HD 17156.

ingresso hh mm ss dd mm yyyy	centralità hh mm ss dd mm yyyy	uscita hh mm ss dd mm yyyy	errore sec.	fase lunare %
01 05 13 10 09 2007	02 38 23 10 09 2007	04 11 34 10 09 2007	-	2
22 12 25 03 12 2007	23 45 35 03 12 2007	01 18 46 04 12 2007	15.0	28
03 29 13 25 12 2007	05 02 23 25 12 2007	06 35 34 25 12 2007	17.9	95
00 36 25 19 03 2008	02 09 35 19 03 2008	03 42 46 19 03 2008	29.5	97
05 53 13 09 04 2008	07 26 24 09 04 2008	08 59 34 09 04 2008	32.5	20
21 43 37 11 06 2008	23 16 47 11 06 2008	00 49 58 12 06 2008	41.3	64
03 00 25 03 07 2008	04 33 35 03 07 2008	06 06 46 03 07 2008	44.2	1
18 50 49 04 09 2008	20 24 00 04 09 2008	21 57 10 04 09 2008	53.0	26
00 07 37 26 09 2008	01 40 47 26 09 2008	03 13 58 26 09 2008	55.9	6
05 24 25 17 10 2008	06 57 36 17 10 2008	08 30 46 17 10 2008	58.9	87
21 14 49 19 12 2008	22 47 59 19 12 2008	00 21 10 20 12 2008	67.7	45

Tabella A.2. Effemeridi dei prossimi transiti di HD 17156b visibili dall'Europa. Sono elencati in UT i momenti della fase di ingresso (primo contatto), della centralità, dell'uscita(ultimo contatto), l'indeterminazione sui tempi e la fase lunare. La fase lunare è poco importante solo in alcune date, tra cui la data della scoperta del transito in cui la fase era solo il 2%.

me sia i momenti belli del successo sia quelli meno piacevoli delle polemiche create da alcune persone estranee al gruppo. Ci tengo a nominarli uno per uno: Daniele Gasparri, Ernesto Guido, Claudio Lopresti, Federico Manzini, Giovanni Sostero, ognuno di essi ha lavorato duramente nei giorni precedenti alla notte del transito per mettere a punto la tecnica osservativa, ha acquisito i dati (qualche centinaio di immagini) e poi li ha anche preliminarmente ridotti. È stato uno sforzo immane sotto tutti i punti di vista e di questo li ringrazio enormemente.

Appendix A: HD 17156

HD 17156 è una stella G0V leggermente evoluta situata a 78 pc di distanza dal Sole nella costellazione di Cassiopea, le cui coordinate, magnitudini e caratteristiche fisiche sono raccolte nella Tab. A.1 e una cartina di identificazione è rappresentata in Fig. A.1. Le coordinate di HD 17156 la rendono bene osservabile durante tutto l'anno ad eccezione di un periodo di bassa altezza sull'orizzonte (Fig. A.2) tra marzo e luglio, ma pur sempre maggiore di 20°. Nella Tab. A sono raccolte le date dei prossimi transiti fino a dicembre 2008. È importante notare che il rapporto del periodo orbitale del pianeta e quello lunare è circa tre quarti, questo fa sì che l'occasione che un transito del pianeta avvenga in meridiano nel medesimo luogo della Terra con luna nuova avviene solo 1 volta l'anno. Questo è stato il caso fortunato del 9/10 settembre 2007 quando abbiamo scoperto il transito.

L'osservazione del prossimo transito del 3/4 dicembre è quindi di fondamentale importanza perchè i successivi transiti saranno fortemente disturbati dal contributo lunare fino a settembre 2008.

Il transito ha una profondità pari a $\Delta L/L = 0.0062$ e una durata di $3^h 6.4^m$ (186.4 m = 11184 s).

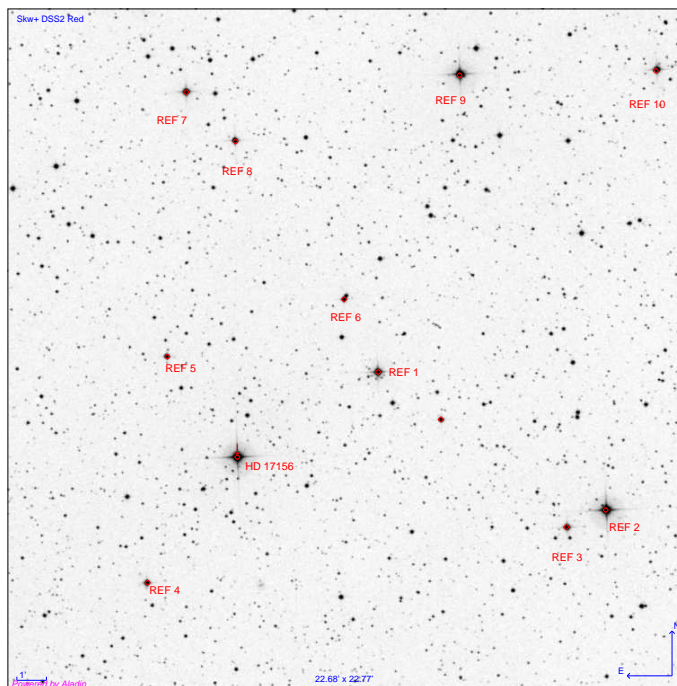


Figura A.1. Cartina di identificazione di HD 17156 e delle stelle di riferimento.

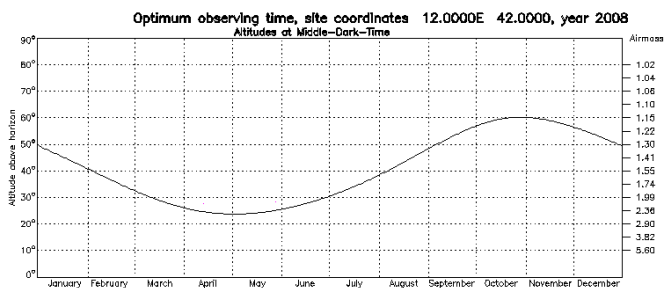


Figura A.2. Altezza sull'orizzonte di HD 17156 in funzione del periodo dell'anno per un osservatore a longitudine 12°E e latitudine +42°.

Appendix B: Setup strumentale e riduzione immagini/dati

Alcune regole generali per le osservazioni:

- non usare anti-blooming perchè introduce non linearità del sensore
- non usare il binning, cioè usare configurazione binning 1x1
- mantenere l'autoguida sempre accesa
- regolare bene l'orologio del PC sul tempo UT

per le immagini di calibrazione:

- i dark devono avere lo stesso tempo di posa delle immagini
- i flat field vanno ripresi o ad inizio o a fine sessione osservativa
- devono essere ripresi anche i bias

Le pose vanno fatte il più lunghe possibile per abbattere la scintillazione, cercando di non superare l'80-90% del valore di saturazione per le stelle più brillanti usate come riferimento e allo stesso tempo di non scendere mai al di sotto del 70%. Se si usa un sensore dotato di anti-blooming è necessario verificare con qualche stella di analogia magnitudine a quella in esame, la linearità del sensore, nel caso si riscontrino problemi di linearità conviene sfocare la stella.

z	massa d'aria	t=10 s			t=20 s			t=30 s		
		20 cm	30 cm	40 cm	20 cm	30 cm	40 cm	20 cm	30 cm	40 cm
60	1.15	3.4	2.6	2.1	2.4	1.8	1.5	2.0	1.5	1.2
45	1.41	4.8	3.7	3.1	3.4	2.6	2.2	2.8	2.1	1.8
30	2.00	8.9	6.8	5.6	6.3	4.8	3.9	5.1	3.9	3.2

Tabella B.1. Valori della scintillazione in mmag per alcuni tempi di posa tipici e diametri tipici. I valori per tempi di posa intermedi e/o diametri medi posso essere calcolati per interpolazione.

Per alcuni telescopi (specialmente quelli di maggior diametro) le stelle osservate sono molto brillanti e saturano in poco tempo, in questo caso è opportuno sfocare la stella in modo da avere gli stessi fotoni ma su più pixel. L'operazione di sfocamento non pregiudica in nessun modo la fotometria d'apertura. La diaframmatura del telescopio è controproducente e assolutamente sconsigliata in quanto fa solo aumentare la scintillazione e quindi il rumore sul segnale.

Le pose vanno fatte nel filtro più rosso che si ha a disposizione. Per abbattere i problemi di estinzione all'interno del campo, la scelta migliore sarebbe un filtro I (o z), ma a queste lunghezze d'onda i sensori CCD tipicamente risentono del fringing e non è mai facile trattare con questo disturbo. Il consiglio è quindi di utilizzare un filtro R. Non è necessario che il filtro R sia un filtro fotometrico, ma l'importante è che tagli le lunghezze d'onda blu che sono quelle che comportano maggiori problemi per la scintillazione. In assenza di un filtro R si può usare un filtro V.

In Tab. B.1 è riportata la scintillazione aspettata in banda R per alcuni diametri tipici e tempi di posa tipici. Per ottenere le migliori prestazioni fotometriche possibili è necessario ridurre al minimo il contributo della scintillazione. Poichè la scintillazione è dominante quando i telescopi hanno un diametro inferiore a 40 cm circa, utilizzando questi telescopi è necessario sfocare sino a raggiungere un tempo di posa che permetta di abbattere la scintillazione, questo avviene quando la scintillazione ha un valore massimo di 3 mmag.

Per ottenere il valore del diametro della stella sfocata in arcosecondi è sufficiente moltiplicare il diametro misurato in pixel per la scala del telescopio⁴.

Esistono molti software per fare la riduzione delle immagini e vi sono consigli particolari su quale utilizzare, tuttavia per quanto riguarda la fotometria, ho verificato il funzionamento di IRIS⁵ il quale risponde quasi appieno alle esigenze di fotometria differenziale. Nel costruire le curve di luce è molto veloce, per l'allineamento e la fotometria di circa 300 immagini da 700x700 pixel impiega 20 minuti su di un portatile con processore AMD Duron a 800 MHz.

Alla pagina web http://astrosurf.com/buil/iris/tutorial15/doc38_us.htm nel paragrafo *Automatic photometry of a sequence* si trovano tutte le istruzioni per effettuare la fotometria differenziale, ma alla procedura vanno fatte alcune modifiche: 1) l'output deve essere in ADU e non in magnitudini 2) non selezionare *No matching* e lasciare fare l'allineamento delle immagini al programma 3) selezionare fotometria d'apertura 4) i raggi da selezionare sono tipicamente 10,20,25 ma questo deve essere calibrato sulla base delle immagini acquisite

Il programma fornisce le curve di luce di solo 5 stelle alla volta, quindi è necessario ripetere la procedura per tutte le stelle di cui si vuole ottenere le curve di luce, alla fine è necessario creare un unico file di testo delle curve di luce cosifatto: JD,

ADU stella, ADU ref1, ADU ref2, ADU ref3, ADU ref4, ADU ref5, ...

Per ottenere una curva di luce è sufficiente fare il grafico di JD contro ADU stella/(somma ADU ref) ed eventualmente rifa-sarlo (cioè ottenere la fase fotometrica dal JD), in definitiva le formule da utilizzare sono:

$$\phi = \text{modulo}\left(\frac{JD - T_0}{\text{periodo}}, 1\right) \quad (\text{B.1})$$

$$\text{Flusso} = \frac{\text{ADU}_{\text{stella}}}{\sum \text{ADU}_{\text{rif}}} \quad (\text{B.2})$$

Riferimenti bibliografici

- Bakos, G. A., et al. 2007, ArXiv e-prints, 705, arXiv:0705.0126
 Bodenheimer, P., Laughlin, G., & Lin, D. N. C. 2003, ApJ, 592, 555
 Bouchy, F., et al. 2005, A&A, 444, L15
 Burkert, A., Lin, D. N. C., Bodenheimer, P. H., Jones, C. A., & Yorke, H. W. 2005, ApJ, 618, 512
 Butler, R. P., Vogt, S. S., Marcy, G. W., Fischer, D. A., Wright, J. T., Henry, G. W., Laughlin, G., & Lissauer, J. J. 2004, ApJ, 617, 580
 Butler, R. P., et al. 2006, ApJ, 646, 505
 Charbonneau, D., Brown, T. M., Latham, D. W., & Mayor, M. 2000, ApJ, 529, L45
 Cho, J. Y.-K., Menou, K., Hansen, B. M. S., & Seager, S. 2003, ApJ, 587, L117
 Claret, A. 2000, A&A, 363, 1081
 Cooper, C. S., & Showman, A. P. 2005, ApJ, 629, L45
 Deming, D., Harrington, J., Laughlin, G., Seager, S., Navarro, S. B., Bowman, W. C., & Horning, K. 2007, ArXiv e-prints, 707, arXiv:0707.2778
 Desidera, S., & Barbieri, M. 2007, A&A, 462, 345
 Dobbs-Dixon, I., & Lin, D. N. C. 2007, ArXiv e-prints, 704, arXiv:0704.3269
 Fischer, D. A., et al. 2007, ApJ, 669, 1336
 Gillon, M., et al. 2007, A&A, 472, L13
 Giménez, A. 2006, A&A, 450, 1231
 Goldreich, P., & Peale, S. J. 1968, ARA&A, 6, 287
 Henry, G. W., Marcy, G. W., Butler, R. P., & Vogt, S. S. 2000, ApJ, 529, L41
 Hut, P. 1981, A&A, 99, 126
 Langton, J., & Laughlin, G. 2007, ApJ, 657, L113
 Marzari, F., & Weidenschilling, S. J. 2002, Icarus, 156, 570
 Marzari, F., & Barbieri, M. 2007a, A&A, 467, 347
 Marzari, F., & Barbieri, M. 2007b, A&A, 472, 643
 Papaloizou, J. C. B., & Ivanov, P. B. 2005, MNRAS, 364, L66
 Perryman, M. A. C., & ESA 1997, ESA Special Publication, 1200
 Press, W. H., et al. 1992, Cambridge: University Press, —c1992, 2nd ed.
 Savitzky, A., & Golay, M. J. E. 1964, Analytical Chemistry, 36, 1627
 Seagrove, S., et al. 2003, PASP, 115, 1355
 Shankland, P. D., et al. 2006, ApJ, 653, 700
 Wu, Y., & Murray, N. 2003, ApJ, 589, 605

⁴ La scala del telescopio in "/px è data dalla formula seguente:

$$sc = \frac{206.265 \cdot px}{f} \text{ ["/px]} \text{ con px espresso in } \mu m \text{ ed } f \text{ in } mm$$

⁵ <http://astrosurf.com/buil/iris>