

Analisi del transito di HD17156b

di **Daniele Gasparri**

Dalla scoperta di un nuovo pianeta extrasolare in transito la notte tra il 9 e il 10 Settembre 2007, con strumentazione amatoriale, si è potuto ricavare informazioni preziosissime su questo corpo celeste distante circa 150 anni luce: massa, raggio e inclinazione dell'orbita.

La notte tra il 9 e il 10 settembre 2007, l'astronomo Mauro Barbieri, specializzato nello studio dei pianeti extrasolari, avverte un gruppo di astrofili, già specializzati nelle riprese fotometriche ad altissima precisione, che il pianeta HD17156b, scoperto con la tecnica delle velocità radiali, aveva una probabilità di circa il 12% di effettuare un transito durante quella notte. L'opportunità era ghiotta: si sarebbe potuto scoprire, per la prima volta con strumentazione amatoriale, il transito di un pianeta, per di più estremamente peculiare, poiché con un periodo di 21 giorni e con un'orbita fortemente eccentrica, molto simile a quella delle comete del nostro sistema solare.

Tutti i pianeti in transito scoperti fino a quel momento avevano orbite pressoché circolari e periodi di rotazione al massimo di 5 giorni.

Data la bassa probabilità di transito, quasi nessun telescopio professionale si sarebbe concentrato sul pianeta quella sera, per problemi di tempo e risorse, per questo l'occasione offerta agli astrofili era davvero ghiotta.

Non sto qui a farvi il resoconto di quella notte fantastica, fatta di speranze e problemi, di illusioni svanite e di adrenalina crescente quando sembrava esserci una piccola speranza di aver ripreso il transito.

Quella notte il pianeta passò davanti alla stella e i nostri telescopi riuscirono a mettere in evidenza il debolissimo calo di luce: avevamo scoperto un pianeta, un pianeta tutto nostro, visto da noi per la prima volta!

Dopo le prime concitate ed emozionanti fasi, piene di scambi di mail e controlli incrociati dei dati, giunse il momento di fare le cose sul serio e di cominciare ad estrapolare le informazioni quantitative raccolte.

Il metodo seguito, almeno da me, fu quello appena descritto nelle pagine precedenti; quando i dati fotometrici sono stati puliti ed estrapolati, si è passato all'interpretazione e a ricavare le informazioni quantitative sul pianeta.

La costruzione della curva di luce ha seguito le seguenti fasi:

- 1) Calibrazione e selezione delle immagini: quelle vistosamente rovinate dalle nubi sono state eliminate.
- 2) Media delle immagini a gruppi di 13, per ottenere la massima precisione. Questo metodo è ora sconsigliato dai professionisti, che preferiscono avere singole immagini piuttosto che la media a posteriori (binning). Nel caso di HD17156 le singole esposizioni, di 30 secondi, non possedevano la necessaria precisione e la tecnica della sfocatura non poteva essere applicata in quanto presentava problemi con l'autoguida. In questo caso, e solo in questo caso, si è preferito, quindi, fare esposizioni a fuoco (o quasi) e mediarle in fase di elaborazione per aumentare la

precisione. E' stato creato un altro set, composto da immagini mediate a gruppi di 6, per un controllo e per evidenziare meglio gli istanti di inizio e fine transito.

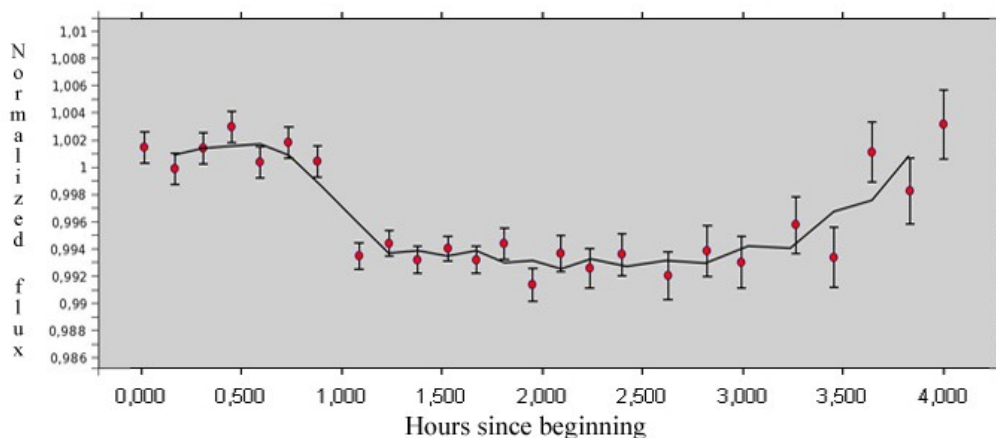
- 3) Con le 25 osservazioni ad alta precisione, si è effettuata l'analisi in fotometria d'apertura con IRIS, che ha fornito in uscita il file testuale con riportate le intensità della stella da studiare e delle 3 stelle di paragone utilizzate.
- 4) Si sono importati i dati in un foglio di calcolo, nel caso specifico in Gnumeric, gratuito e funzionante sia con Windows che con Linux. In Gnumeric si è costruita una curva di luce di controllo delle stelle di paragone, per vedere se esse possedevano la giusta precisione e scongiurare eventuali variabilità fisiche. In pratica, si sceglie una delle stelle di paragone e si costruisce la curva di luce dividendo la sua intensità per la somma delle altre due stelle di paragone, trascurando, in questa fase, la stella da studiare. Il grafico risultante ha mostrato un andamento lineare, con poca dispersione dei dati: le stelle scelte sono tutte adatte. Dopo questo controllo si è costruita la curva di luce di HD17156, sempre a partire dalle intensità e secondo la relazione già vista:

$$LC = \frac{ADU_{HD17156}}{ADU_2 + ADU_3 + ADU_4}.$$

- 5) Si è costruito un grafico preliminare per un controllo sulla bontà dei dati. Dal grafico è emerso un dato fotometrico con un errore oltre 3 volte quello medio, che si è quindi scartato
- 6) Stima degli errori dovuti alla scintillazione e al rapporto S/N; somma quadratica per le incertezze totali.
- 7) Controllo della stima delle incertezze, utilizzando la funzione deviazione standard di Gnumeric (Excel ne ha una identica). La deviazione standard, calcolata su dati che non presentano variazioni dovute al transito, mostra un valore molto simile all'errore medio calcolato: la stima è stata corretta!
- 8) Normalizzazione: per ricavare dati quantitativi e mostrare le incertezze, si deve normalizzare la curva. Dobbiamo ricavare il valore più probabile per il flusso stellare fuori dal transito e dividere ogni dato per il valore trovato. Il valore si ricava osservando i punti fuori transito (OOT) e facendo la media. Per la teoria di propagazione degli errori, se la distribuzione delle misure, quindi delle incertezze, è gaussiana, la media di N valori ha un errore minore del singolo dato;

in particolare si ha che: $\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$. Nel nostro caso, quindi, la deviazione

standard della media, con 7 misurazioni fuori transito, si riduce di 2,64 volte. Considerato che la deviazione standard calcolata dei punti è inferiore ad 1 millesimo di magnitudine, l'errore commesso nell'identificazione del "pianerottolo" o punto di zero, è trascurabile rispetto alle incertezze stimate. La curva di luce è pronta per essere visualizzata e analizzata.



La curva di luce in forma grafica è utile solamente per avere un'idea e per dare informazioni qualitative immediate agli altri astrofili e astronomi. I dati si ricavano sui valori numerici che compongono la curva di luce, non certo sul grafico.

Ai dati, che originariamente, erano la data giuliana e le intensità delle stelle usate per la fotometria, ora si sono aggiunte almeno altre 5 colonne, ovvero: la curva di luce, la curva di luce normalizzata, gli errori causati dalla scintillazione, quelli dal rapporto S/N, la stima totale. In questo modo la curva di luce può dirsi completa e possiamo cominciare a ricavare i dati che ci servono, ovvero la deviazione standard fuori dal transito, quella dei punti in transito, la profondità e la durata del transito. Questo ultimo dato non è facile da determinare, soprattutto per profondità piccole, che richiedono elevate precisioni, a scapito, generalmente, del campionamento temporale.

La deviazione standard, che coincide, se la stima è fatta bene, con l'incertezza calcolata, serve per la propagazione delle incertezze. Minore è questo valore, minore sarà l'incertezza dei dati ricavati. L'unico modo per ridurre la deviazione standard in fase di analisi è solamente mediare i dati.

E' utile costruire una tabella con i dati che possiamo ricavare:

Numero dati utili = 25	Sigma dei 7 punti fuori transito = 0,001
Sigma dei 13 punti in transito = 0,0009	Sigma della media dei 7 punti fuori transito = 0,0004
Sigma della media dei 13 punti in transito = 0,0003	Flusso medio dei 13 punti in transito: $F_{transit} = 0,9933 \pm 0,0003$
Profondità del transito: $\Delta F = 1 - F_{transit} = 0,0065 \pm 0,0005$	Durata stimata: $D = (9000 \pm 600)s$

Per estrapolare le informazioni in merito al pianeta e all'orbita, ci servono altri dati, che non possiamo ricavare direttamente, disponibili negli articoli di scoperta del pianeta con

il metodo delle velocità radiali. Dall'articolo degli autori della scoperta, ricaviamo i seguenti dati stella-pianeta.

$M_* = (1.2 \pm 0.1)M_{Sun}$	$e = 0.67 \pm 0.08$
$R_* = (1.47 + 0.13 - 0.17)R_{Sun}$	$\phi = (329 \pm 11)^\circ$
$a = 0.15AU$	

Il dato che si potrebbe migliorare è la conoscenza del raggio stellare, attraverso l'analisi in fotometria assoluta tramite gli indici di colore, preferibilmente U-B. Con i dati che abbiamo appena ricavato, e con quelli di cui disponiamo dalle analisi eseguite da altri osservatori attraverso la fotometria (raggio stella) e la misura delle velocità radiali (parametri orbitali), siamo in grado di stimare le grandezze relative al pianeta, ricavabili solamente analizzando un transito.

Nel nostro caso possiamo ricavare:

1) Raggio.

Il raggio planetario è collegato al raggio stellare e alla profondità del transito, attraverso la relazione: $R_p = R_* \sqrt{\Delta F}$ dove $\Delta F = 1 - F_{transit}$ = profondità, in termini di flusso relativo normalizzato. Nel nostro caso si ha: $R_p = R_* \sqrt{\Delta F} = (1.226 + 0.130 - 0.155)R_j$. L'errore totale deriva dalla propagazione degli errori della relazione, ma, come si può ben vedere, è molto simile all'incertezza nella stima del raggio stellare, molto maggiore dell'incertezza con cui è conosciuto il flusso.

2) Durata massima del transito ($i=90^\circ$). Questo dato è fondamentale per ricavare l'inclinazione.

Se supponiamo che il disco stellare abbia forma sferica e che sia trascurabile l'oscuramento del bordo (limb darkening), la formula per la durata massima del transito, ovvero la durata che avrebbe il transito se l'orbita del pianeta fosse vista con un'inclinazione di 90° , è data da:

$$D_{max} = \frac{2R_{Tot}}{\sqrt{GM_{Tot} \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)}}, \quad \text{dove } r = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos \phi}$$

$$D_{Max} = (9.905 + 1.693 - 1.822)h$$

3) Inclinazione. L'inclinazione orbitale si può calcolare dalla durata del transito e dalla durata massima appena ricavata. Essa è estremamente importante per determinare in modo univoco la massa, altrimenti conosciuta come il prodotto $M \sin i$. La relazione per il calcolo dell'inclinazione, che tiene conto dell'eccentricità orbitale (in questo caso 0,67, molto elevata) è:

$$i = \arccos \sqrt{\frac{R_{Tot}^2}{r^2} - \frac{D^2 R_{Tot}^2}{D_{Max}^2 r^2}} = (87.881 + 0.685 - 0.702)^\circ$$

4) **Massa.** La massa esatta si può ricavare semplicemente dalla relazione:

$$M_p = \frac{M \sin i}{\sin i} = (3.12213 + 0.00138 - 0.00141) M_j$$

5) **Densità media.** A questo punto, supponendo il pianeta sferico, possiamo calcolare la densità media:

$$\langle \rho \rangle = \frac{M_p}{\frac{4}{3} \pi R_p^3} = (2.144 + 0.68 - 0.83) g/cm^3$$

In questo caso, il valore trovato indica un corpo sostanzialmente gassoso, senza escludere, però, la presenza di elementi pesanti, che tende a rialzare la densità media ad un valore maggiore di quello dei pianeti gassosi come Giove o Saturno.

L'analisi è finalmente completata: le immagini sono state calibrate e da esse è stata estratta una curva di luce, la quale mostra agli altri osservatori tutti i dati che possiamo ricavare. L'analisi attenta dei dati fotometrici ci ha permesso di caratterizzare il pianeta appena scoperto.

Naturalmente si tratta di una prima analisi; per affinare i dati occorre seguire il pianeta per diversi transiti, magari con strumenti e tecniche più potenti, ma i dati ricavati ed il metodo sono corretti e vengono pienamente accettati dalla comunità scientifica.

I professionisti hanno un approccio per l'estrapolazione dei dati leggermente diverso.

Invece di calcolare le grandezze quali raggio, inclinazione e massa e i relativi errori manualmente, le utilizzano come parametri di fit.

In parole semplici, invece di applicare le relazioni, gli astronomi costruiscono dei programmi in grado di analizzare la curva di luce e di sovrapporvi una curva matematica teorica che meglio descrive l'andamento sperimentale trovato. La curva trovata è unica per una determinata scelta dei parametri fondamentali, quali la durata, il raggio, l'inclinazione orbitale, e quindi, quando si sovrappone, sono univocamente determinati, con le relative incertezze, i dati che caratterizzano il pianeta e la sua orbita.

Per gli astrofili, costruire un programma che consente di fittare i dati sperimentali è molto difficile. Sfortunatamente, al contrario delle stelle variabili, non esistono in commercio programmi già pronti che possono svolgere questa funzione e l'analisi attraverso il fit dei dati è generalmente oltre le possibilità dell'astrofilo medio. Questo non è troppo limitativo, poiché i dati che si possono ricavare manualmente sono assolutamente confrontabili con quelli che si ottengono, sebbene in modo molto più veloce, dalla curva di fit.