

COELUM Astronomia

PROCEDURE PER LE RIPRESE DIGITALI DEL TRANSITO DI UN PIANETA EXTRASOLARE (nota del 6 gennaio 2008)

Angelo Angeletti^[1], Fabiano Barabucci^[2], Rodolfo Calanca^[3]

1 – Introduzione: la ripresa di pianeti extrasolari

Nel seguito daremo alcune indicazioni maturate durante le osservazioni svolte nell'estate 2007 dagli astrofili italiani che hanno aderito al progetto Search the Sky proposto dal Planetary Research Team e coordinato da Rodolfo Calanca (in italiano, si vedano le Circolari del Planetary Team: www.crabnebula.it e www.coelum.com).

La ricerca di pianeti extrasolari con il metodo dei transiti è un'attività alla portata di moltissimi amatori. Basta infatti armarsi di una buona dose di pazienza e impiegare un telescopio di 15 – 20 cm (es.: il classico newtoniano), una camera CCD e un sistema di inseguimento molto preciso (è consigliata un'autoguida).

Un pianeta in transito davanti alla propria stella produce un leggero affievolimento della luminosità della stella per un periodo relativamente breve (generalmente alcune ore).

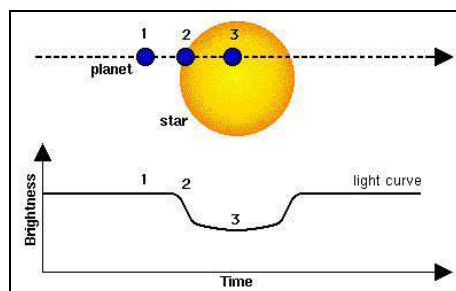


Figura 1.1 – Tipica curva di luce di un transito

Questo fenomeno è l'equivalente, in ambito stellare, del passaggio di Venere davanti al Sole. Vi è però una differenza essenziale tra i due tipi di transiti; nel caso di Venere il disco del pianeta si proietta, in modo ben visibile per l'osservatore terrestre, davanti al disco solare, nel caso invece del pianeta extrasolare la stella appare come un semplice punto luminoso e tutto ciò che si può osservare durante il fenomeno è una lievissima diminuzione della luminosità stellare.

^[1] Presidente Associazione Astrofili Crab Nebula di Tolentino, direttore dell'Osservatorio "Padre Francesco De Vico" di Monte d'Aria di Serrapetrona (MC) Italy e coordinatore, insieme a R. Calanca, delle attività scientifiche del Planetary Research Team.

^[2] Responsabile di tutti i sistemi informatizzati dell'Associazione Crab Nebula e del software, attualmente in fase di sviluppo, per il Planetary Research Team. È l'autore materiale del software TRel.

^[3] Vicedirettore di COELUM ASTRONOMIA e coordinatore del Planetary Research Team.

Ovviamente, la diminuzione di luminosità è proporzionale alla superficie del pianeta ed è dell'ordine dell'1% per un pianeta gigante simile a Giove e dello 0.01% per un pianeta della taglia

della Terra; per essere precisi la relazione è: $\frac{\Delta L}{L_*} \cong \left(\frac{R_p}{R_*}\right)^2$ dove ΔL è la variazione di luminosità

della stella, L_* è la luminosità della stella, R_p e R_* sono rispettivamente il raggio del pianeta e della stella.

Una limitazione del metodo dei transiti è costituita dalla bassa probabilità geometrica che ha l'orbita del pianeta di essere correttamente orientata nello spazio al fine di produrre un transito visibile dalla Terra. La probabilità p è data da $p = \frac{R_*}{a}$, dove a è il semiasse maggiore dell'orbita

del pianeta. La probabilità è circa dello 0.5% per un pianeta situato ad 1 UA dalla sua stella; se un abitante di un pianeta posto ad una distanza di soli pochi parsec dal nostro sistema solare utilizzasse le nostre stesse tecniche d'indagine astronomica, intorno al nostro Sole non troverebbe traccia di alcun pianeta!

Per definire le corrette modalità di ripresa, in alta precisione fotometrica, di un transito di un pianeta extrasolare, è necessario spendere qualche parola sui diversi tipi di "rumore" che possono far degenerare, anche in modo sostanziale, la qualità delle nostre misure. Per raggiungere una precisione fotometrica dell'ordine di 0.002 magnitudine (che è un buon target; il 10% di quanto si deve misurare), occorre rendere minime tutte le sorgenti d'errore. Per conseguire questo obiettivo dobbiamo tener conto degli effetti alcuni errori, almeno bisogna considerare: 1) il **Poisson noise** σ_p , 2) il **rumore prodotto dalla scintillazione atmosferica** σ_s e 3) l'**errore stocastico standard** σ_{ST} .

1) **Poisson Noise.** L'incertezza introdotta nelle misure della magnitudine del Poisson Noise è $\sigma_p = \frac{1}{\sqrt{N}}$, dove N è il numero totale di fotoelettroni raccolti nell'area di misura. Affinché

l'accuratezza sia sull'ordine di 0.002 magnitudini dovremo conteggiare $N = \frac{1}{\sigma_p^2} = 250000$

fotoelettroni. Si ricordi che il numero complessivo di fotoelettroni provenienti dalla stella è dato da $N = G \cdot I$ dove G è il guadagno del ccd e I è l'intensità della stella espresso in ADU (per l'ST7, essendo $G = 2.57$ deve essere $I \approx 97000$).

2) **Rumore prodotto dalla scintillazione atmosferica.** Quello dell'influenza della scintillazione atmosferica sull'accuratezza delle misure fotometriche è spesso trascurato dai non professionisti; è invece assolutamente opportuno prestargli un'attenzione particolare se si vogliono ottenere dei risultati validi dal punto di vista scientifico, specialmente quando si lavora sui transiti extrasolari. La scintillazione atmosferica introduce un errore (esprimibile sotto forma di errore nelle magnitudini) determinabile con la seguente formula approssimata (ma sufficiente per i nostri scopi), dovuta a Radu Corlan (è la stessa impiegata dall'AAVSO):

$$\sigma_s = 0.09 \frac{A^{1.75}}{D^{0.66} \sqrt{2t}} \quad [1]$$

dove A è la massa d'aria^[4], D è il diametro in cm del telescopio e t il tempo di ripresa espresso in secondi. Nelle tabelle 1 e 2 riportiamo alcuni valori di σ_S per alcuni diametri di telescopio e tempi di esposizione variabili tra 10 e 60 secondi (l'esperienza ha messo in evidenza che in genere non bisogna mai scendere al di sotto dei 60 secondi).

Tabella 1

σ_S dovuto dalla scintillazione atmosferica in funzione del diametro del telescopio e del tempo d'esposizione per $A = 1$ (altezza della stella tra 45° e lo zenit)

| T (secondi) | 20 cm | 25 cm | 30 cm | 40 cm | 50 cm |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 10 | 0,0028 | 0,0024 | 0,0021 | 0,0018 | 0,0015 |
| 20 | 0,0020 | 0,0017 | 0,0015 | 0,0012 | 0,0011 |
| 30 | 0,0016 | 0,0014 | 0,0012 | 0,0010 | 0,0009 |
| 40 | 0,0014 | 0,0012 | 0,0011 | 0,0009 | 0,0008 |
| 50 | 0,0012 | 0,0011 | 0,0010 | 0,0008 | 0,0007 |
| 60 | 0,0011 | 0,0010 | 0,0009 | 0,0007 | 0,0006 |

Tabella 2

σ_S dovuto dalla scintillazione atmosferica in funzione del diametro del telescopio e del tempo d'esposizione per $A = 2$ (altezza della stella tra 25° e 45°)

| T (secondi) | 20 cm | 25 cm | 30 cm | 40 cm | 50 cm |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 10 | 0,0083 | 0,0071 | 0,0063 | 0,0052 | 0,0045 |
| 20 | 0,0058 | 0,0050 | 0,0045 | 0,0037 | 0,0032 |
| 30 | 0,0048 | 0,0041 | 0,0037 | 0,0030 | 0,0026 |
| 40 | 0,0041 | 0,0036 | 0,0032 | 0,0026 | 0,0023 |
| 50 | 0,0037 | 0,0032 | 0,0028 | 0,0023 | 0,0020 |
| 60 | 0,0034 | 0,0029 | 0,0026 | 0,0021 | 0,0018 |

Il contenuto delle due tabelle è interessante perché ci dice che se un astro è prossimo allo zenit ($A = 1$), l'influenza della scintillazione è pressoché dell'ordine di grandezza voluto se il tempo di integrazione è superiore ai 20 secondi. Le cose però peggiorano drasticamente man mano che ci avviciniamo all'orizzonte, a 25° di altezza ($A \approx 2$) le cose si fanno drammatiche e solo con telescopi di 40 cm o superiori e tempi di integrazione superiori a 60 secondi è possibile rispettare l'errore massimo prefissato. È evidente che le ampie variazioni della scintillazione interessano chi deve seguire per diverse ore un transito, in questa situazione la massa d'aria è variabile con continuità e l'effetto della scintillazione è sempre maggiore (vedi figura 1.2).

3) Per migliorare l'accuratezza delle misure è necessario valutare anche **l'errore stocastico**

standard $\sigma_{ST} = \frac{1.09}{(S/N)}$ (per i dettagli si veda l'articolo di Rodolfo Calanca pubblicato su

COELUM n. 105, pp. 60-65). Dalle rilevazioni fatte si ricava che i software commerciali utilizzati per l'analisi fotometrica (Maxim DL e Iris) danno in genere un valore (S/N) che è circa la metà di quello che viene calcolato con la formula indicata.

Alla luce di quanto detto l'errore complessivo viene valutato con la relazione:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_P^2 + \sigma_S^2 + \sigma_{ST}^2} .$$

L'esperienza maturata durante le osservazioni dell'estate 2007 ha evidenziato che l'errore maggiore proviene dalla scintillazione. Tenendo conto della relazione [1] si osserva che l'unico

[4] Per il calcolo della massa d'aria possiamo utilizzare la formula: $A = \frac{1}{\sin h}$, h è l'altezza della stella sull'orizzonte.

parametro su cui si può giocare è il tempo di ripresa. Aumentando però troppo questo valore si rischia di uscire dal range di linearità del ccd. Sempre dall'esperienza della scorsa estate possiamo dire che bisogna mantenere il valore massimo di ADU della stella in esame (e possibilmente della stella che verrà utilizzata come confronto – preferibilmente quindi magnitudine simile) intorno a 25000 ADU per un ccd a 16 bit. Alcuni trucchi utilizzati: sfocare leggermente la stella, utilizzare un filtro rosso (in italiano, alla pagina www.crabnebula.it/transiti.htm è possibile reperire le relazioni delle riprese fatte a Monte d'Aria la scorsa estate)

Le riprese vanno fatte ogni 2 – 3 minuti e devono iniziare almeno mezz'ora prima dell'inizio del transito e terminare mezz'ora dopo la fine.

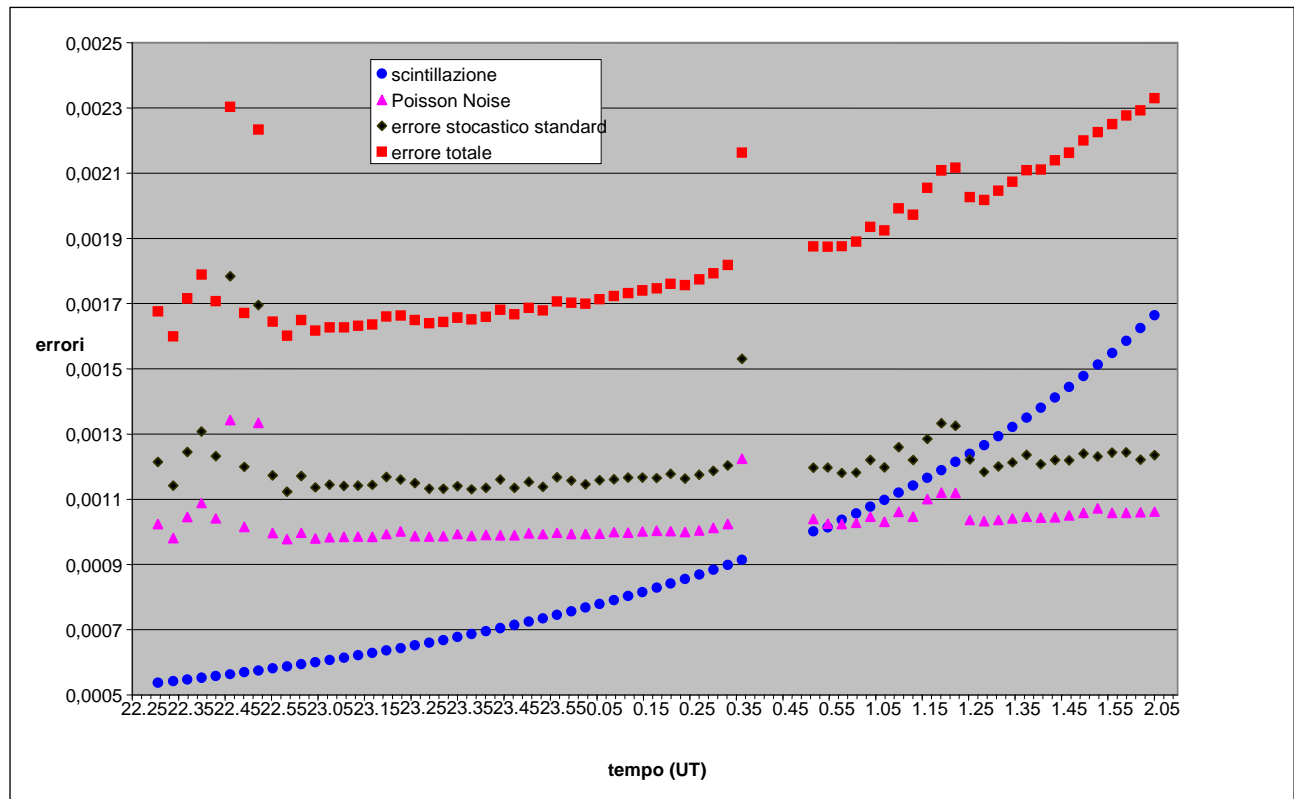


Figura 1.2 – Andamento degli errori misurati durante il transito del pianeta TrES-2 del 1 settembre 2007 rilevato all'Osservatorio Padre Francesco De Vico a Monte d'Aria di Serrapetrona (MC) – Associazione Astrofili Crab Nebula

Le immagini ottenute non vanno né sommate né mediate: anche se in letteratura si trova chi lo fa, con la strumentazione amatoriale è una procedura sconsigliata.

Vanno eseguiti numerosi dark, bias e flat field prima e dopo la ripresa dei transiti (nelle ultime riprese fatte abbiamo utilizzato 30 bias, 30 dark e 60 flat filed). Questi vanno mediate e applicati alle immagini per la calibrazione; i principali programmi di analisi permettono di automatizzare questa procedura.

È importante che i flat siano ben fatti. All'Osservatorio di Monte d'Aria (Serrapetrona Macerata) utilizziamo un foglio di plexiglas bianco traslucido fissato alla cupola che illuminiamo con due lampade a basso consumo da 15 W (temperatura dichiarata dalla casa produttrice 6000 K) poste simmetricamente ai lati. Quando il tempo di integrazione del flat è di alcuni secondi applichiamo dark e bias anche ai flat.

2 - La strumentazione minima per rilevare i transiti di pianeti extrasolari

La magnitudine delle stelle con pianeti in transito è compresa tra la 8 e la 12 circa. Non è pertanto necessario disporre di grandi strumenti per poter rilevare e studiare, in alta precisione, la curva di luce del pianeta in transito; essi però devono essere di buona qualità ottica, meccanica ed elettronica. Ecco alcune utili indicazioni nella scelta e nell'uso del proprio equipaggiamento strumentale:

- Si possono impiegare telescopi, riflettori, rifrattori o S-C a partire da 15 cm di diametro, possibilmente con focali non troppo lunghe, per avere la certezza di trovare nel campo di vista del sensore le stelle di confronto utili per la fotometria differenziale. Quando necessario, inserire un riduttore di focale di buona qualità e bassa vignettatura. Nel caso di XO-2b abbiamo la fortuna di avere ad appena 30" di distanza una stella di confronto adatta.
- La focale "ideale" dovrebbe essere compresa tra 1 e 2 metri. Ad esempio, con una camera CCD SBIG ST-8 (sensore di 9.2 x 13.8 mm) e 1 metro di focale il campo utile è 31'x47', mentre si riduce a 15'x24' con 2 metri. Con un CCD simile e 1 metro di focale, troveremo sempre almeno una stella di confronto nel campo di ripresa.
- E' opportuno che il telescopio sia in montatura equatoriale e in postazione fissa.
- Lo stazionamento polare deve essere accuratissimo, per evitare che le immagini siano affette dalla rotazione del campo, fenomeno che può risultare assai rilevante quando si segue per ore un oggetto celeste.
- Il moto orario deve essere perfetto; i dischi stellari non devono essere "mossi", pena una consistente perdita di precisione nelle misure fotometriche.
- E' altamente consigliato l'uso dei dispositivi di autoguida. Se non si dispone di questo utilissimo accessorio, è fondamentale limitare il tempo di esposizione all'intervallo entro il quale il moto orario garantisce un accurato inseguimento stellare (che non deve essere comunque inferiore ai 60 secondi).
- Ricordare che un CCD con buone prestazioni fotometriche deve avere un ridotto "readout noise" (l'errore che si introduce durante la lettura di un fotoelemento della matrice).

3 – Riassunto della procedura di ripresa delle immagini digitali

Ed ora alcune note sulla procedura di acquisizione delle immagini.

- Attendere la stabilizzazione termica della strumentazione prima di iniziare le riprese.
- Fissare il tempo **MINIMO** di integrazione in funzione del diametro del telescopio e della massa d'aria del campo stellare con la formula per la **scintillazione atmosferica** (si veda il paragrafo 1). Ovviamente, si potrà allungare il tempo d'esposizione, sempre che il telescopio disponga di un adeguato moto orario o, meglio, di autoguida. Nel pieno rispetto, però, della condizioni che seguono.
- **E' FONDAMENTALE CHE LA STELLA CON IL PIANETA IN TRANSITO NON PRESENTI PIXEL SATURI!** Aggiungo il fatto che una delle condizioni inderogabili affinché la precisione fotometrica sia elevata è **che il livello ADU del pixel più luminoso della stella con pianeta in transito sia intorno a 25000** (per una camera CCD a 16 bit) **o di circa 1800 ADU** per una a 12 bit (CCD o digicam). Se il tempo imposto dalla scintillazione atmosferica è però troppo elevato e quindi la stella satura, terremo invariato il tempo di esposizione in due modi: 1) interponendo un filtro (R, V, I oppure neutro), per attenuare il flusso luminoso e raggiungere almeno il tempo MINIMO di integrazione; 2) in alternativa, sfocheremo l'immagine stellare di 2 o 3 volte la FWHM. **Ricordarsi di non scendere mai sotto il tempo minimo che risulta dai calcoli della scintillazione (BOX).**

- Una volta determinata l'esposizione, eseguire alcune riprese di test del campo in esame, e con Astroart o MaxIm verificare il rapporto S/N (segnale su rumore) della stella con pianeta in transito e delle stelle di confronto. Affinché l'accuratezza delle misure sia di 2/1000 di magnitudine, S/N dovrà essere almeno pari a 500. Purtroppo, il modo di calcolare S/N di Astroart e di MAXIM non è dei più accurati; per essere significativo il valore fornito da questi software deve essere moltiplicato per due: $S/N > 1000$. La formula corretta è quella contenuta nel mio articolo apparso sul n. 105 della Rivista, p. 64. Nel caso che S/N non raggiunga il valore richiesto, non possiamo aspettarci una precisione fotometrica molto elevata.
- Eseguire le immagini ad intervalli di 1 o 2 minuti.
- La qualità dei flat field incide in modo determinante sull'accuratezza delle misure fotometriche. L'accorgimento è di realizzarne molti, anche diverse decine (Daniele Gasparri ne realizza fino a 60, per poi mediarli). In tal modo il master mediano del flat, su molte immagini, è affetto da un errore ridotto di Poisson noise. Per lo stesso motivo occorre realizzare molti dark frame e bias frame.

L'elaborazione delle immagini per la realizzazione della curva di luce

Una volta ottenuta la serie di immagini a copertura dell'intero transito, si presenta il problema di ricavare la curva di luce, che risolveremo abbastanza agevolmente attraverso una classica procedura di fotometria differenziale. **Angelo Angeletti** e **Fabiano Barabucci** hanno messo a punto una procedura di elaborazione che si avvale del programma **MaxIm DL** e che presto sarà resa disponibile, con un tutorial, anche per gli amatori francesi.