



Laurea triennale in Fisica
a.a. 2016 - 2017

CORSO DI ASTRONOMIA

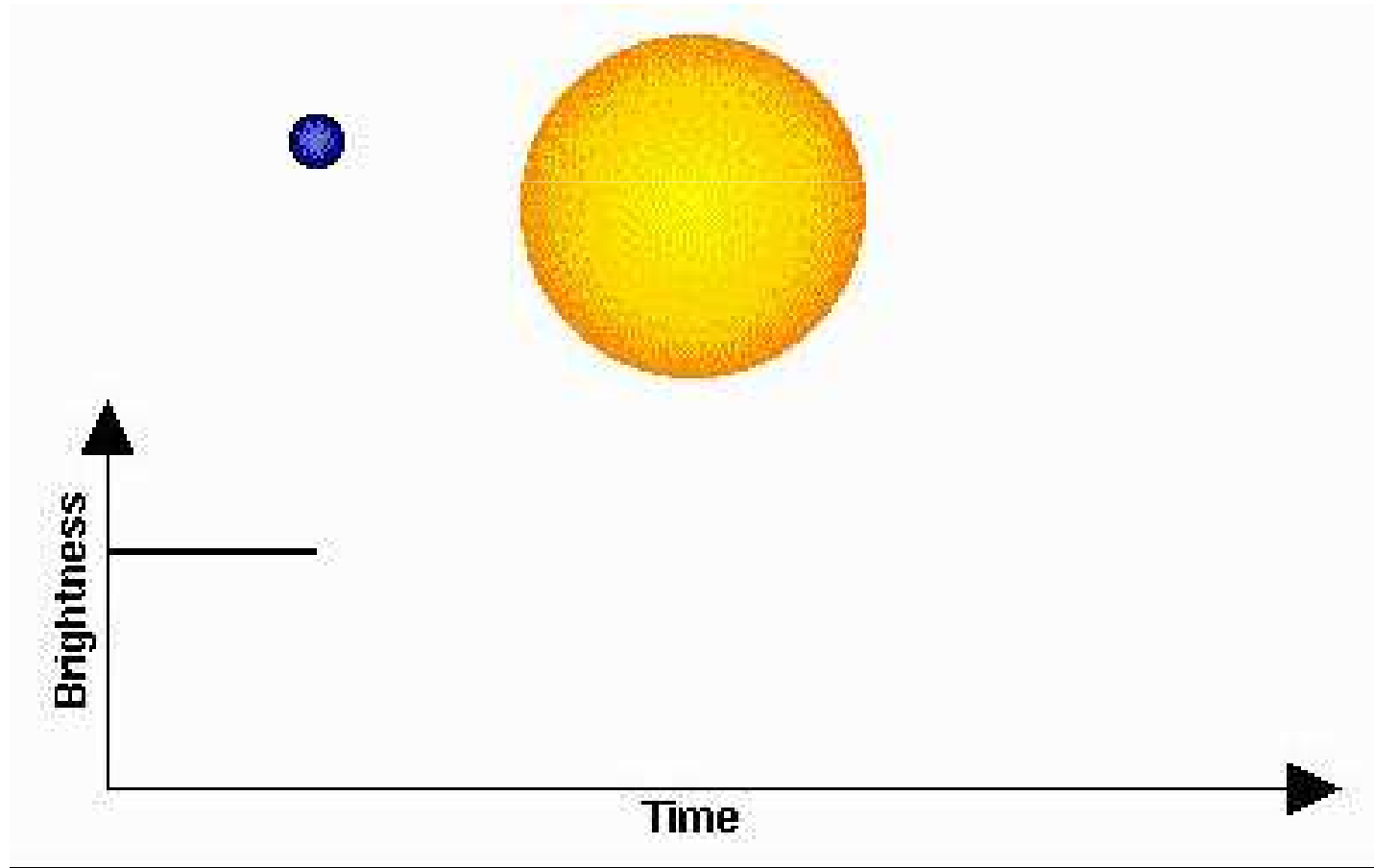
LEZIONE 13

Tecnica per la rilevazione del transito di un pianeta extrasolare



Rilevazione del transito di un pianeta extrasolare

Il transito di un pianeta extrasolare davanti alla propria stella altro non è che un'eclisse.



Rilevazione del transito di un pianeta extrasolare

Rilevare un transito significa acquisire una serie di immagini della stella davanti alla quale passa il pianeta al fine di misurarne il calo di luminosità in funzione del tempo.

Costruire cioè la cosiddetta *curva di luce del transito*.

È quindi necessario effettuare una serie di riprese del campo della stella in esame e confrontarne la luminosità con stelle di riferimento, notoriamente non variabili.

In altri termini è necessario fare una *fotometria* della stella.

Poiché il calo di luminosità della stella è dell'ordine del *centesimo di magnitudine* è necessario lavorare con una precisione di almeno *2 millesimi di magnitudine*.

Il che significa estrema precisione.

Rilevazione del transito di un pianeta extrasolare

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 sono presenti in un'immagine astronomica acquisita con un CCD e che possono far degenerare, anche in modo sostanziale, la qualità delle misure.

Per queste misure ci si può accontentare di raggiungere una precisione fotometrica dell'ordine di 0.002 magnitudini (che è un buon target, in genere il 10% di quanto si deve misurare), ma per ottenere ciò occorre rendere minime tutte le sorgenti d'errore.

Gli errori che bisogna tenere sotto controllo sono:

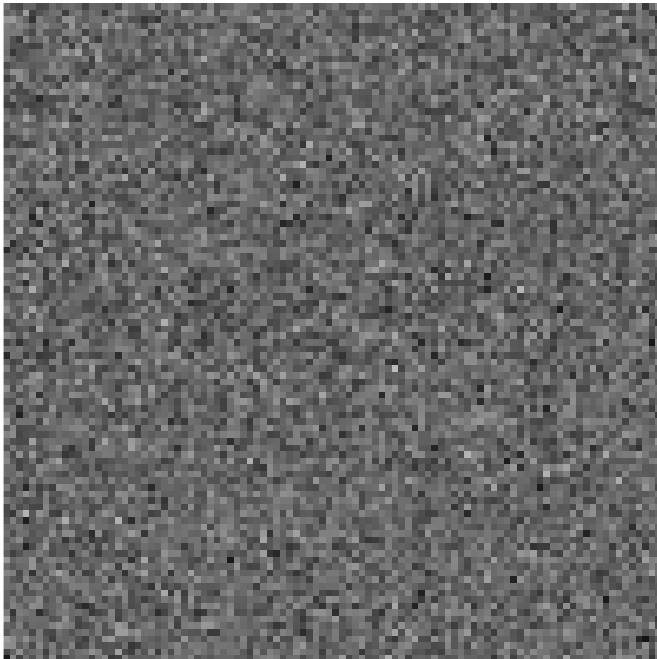
- 1) il *Poisson noise* σ_P ,
- 2) l'errore prodotto dalla *scintillazione atmosferica* σ_S
- 3) l'*errore stocastico standard* σ_{ST} .

Il Poisson Noise

Chiamato anche *photonic noise*, o *noise from photon statistics*, o *Photon noise* è provocato dall'arrivo casuale dei fotoni sul rivelatore.

Ogni fotone è un evento indipendente e il suo arrivo può essere previsto solo in termini di probabilità. Su una data area del sensore arriva in media un certo numero di fotoni al secondo (flusso di fotoni), ma ci sono fluttuazioni attorno a questa media.

La legge statistica che governa queste fluttuazioni è una distribuzione di Poisson da cui il nome.



Le fluttuazioni nel numero di fotoni da pixel a pixel è completamente scorrelata.

Questo rumore appare maggiormente quando i fotoni in arrivo sono pochi; si può ridurre aumentando il numero di fotoni con una esposizione più lunga.

Poisson noise di un cielo azzurro sul canale del verde (tratto da Emil Martinec)

Il 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

$$N = \frac{1}{\sigma_P^2} \geq 250000$$

fotoelettroni.

Il numero 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 un CCD SBIG – ST9XE si ha $G = 2.2$ e quindi

$$I \geq 114000$$

Scintillazione atmosferica

La scintillazione atmosferica induce un errore che in genere è quello più consistente.

È opportuno prestargli particolare attenzione.

Tale errore può essere espresso sotto forma di errore nelle magnitudini, determinabile con la formula approssimata dovuta a Radu Corlan (è la stessa impiegata dall'AAVSO):

$$\sigma_P = 0.09 \frac{A^{1.75} e^{-H/8000}}{D^{2/3} \sqrt{2t}}$$

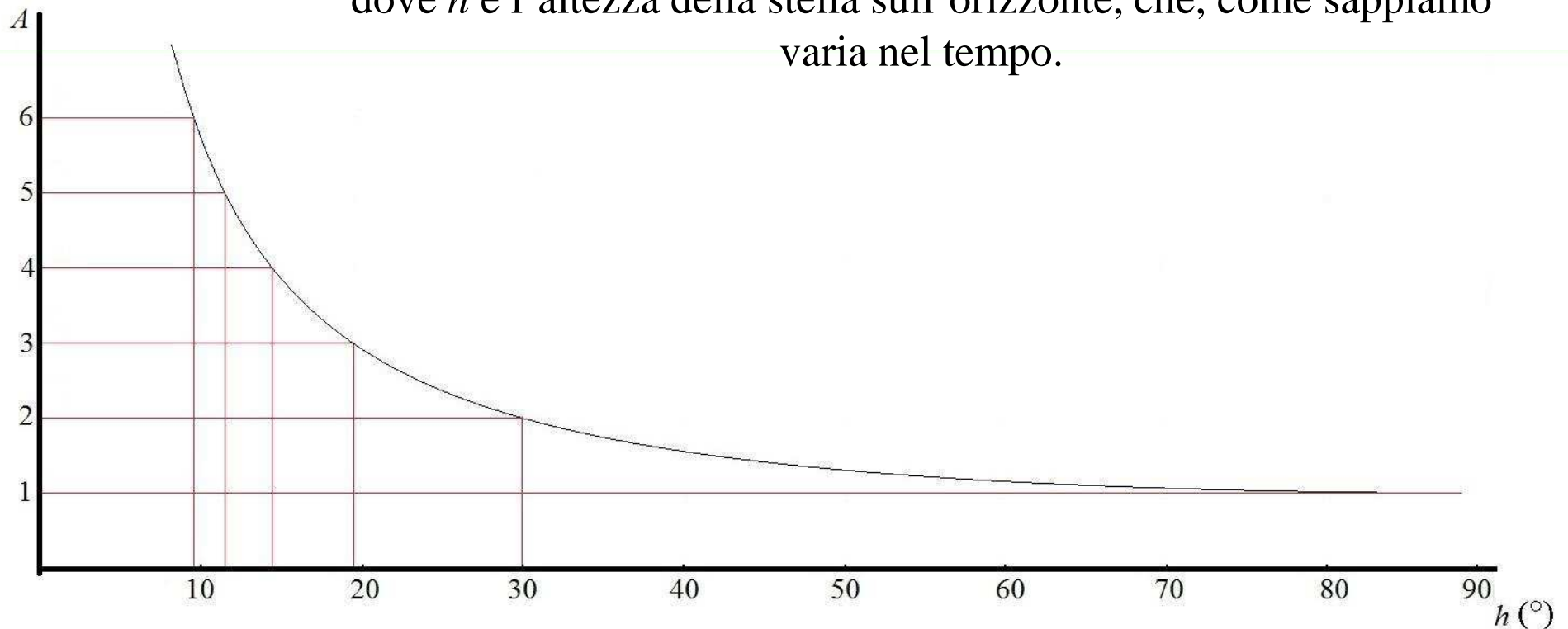
dove A è la *massa d'aria*, D è il diametro in cm del telescopio, H l'altezza sul livello del mare (in metri) del sito osservativo e t il tempo di esposizione in secondi.

Scintillazione atmosferica

La massa d'aria è una funzione della distanza zenitale z ; dipende quindi dalla posizione della stella e può essere determinata, con buona approssimazione, dalla relazione

$$A \approx \frac{1}{\cos z} = \frac{1}{\operatorname{sen} h}$$

dove h è l'altezza della stella sull'orizzonte, che, come sappiamo varia nel tempo.



Scintillazione atmosferica

Nelle tabelle vengono riportati alcuni valori di σ_S per alcuni diametri di telescopio e tempi di esposizione variabili tra 10 e 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

Errore stocastico standard

Per migliorare l'accuratezza delle misure è necessario valutare anche l'*errore stocastico standard* che è legato al *rapporto segnale/rumore* (S/N) dalla relazione:

$$\sigma_{ST} = \frac{k}{(S/N)}$$

Dove k è una opportuna costante.

Rapporto segnale/rumore

In elettronica il rapporto segnale/rumore, spesso abbreviato con la sigla inglese *SNR* (Signal to Noise Ratio) o *S/N*, è una grandezza numerica definita da:

$$(S/N) = \frac{\text{potenza del segnale}}{\text{potenza del rumore}}$$

Per determinare (S/N) in una immagine CCD al fine di effettuare misure fotometriche si può adottare la formula:

$$(S/N) = \frac{N_{OBJ}}{\sqrt{\frac{N_{OBJ}}{G} + n \cdot \sigma_{CIELO}^2 + \frac{n}{p} \sigma_{CIELO}^2}}$$

$$N_{OBJ} = N_{TOT} - n \cdot \overline{N}_{CIELO}$$

Rapporto segnale/rumore

Quando si effettuano misure fotometriche di una stella è necessario valutare il numero effettivo di conteggi dovuti ai fotoni che arrivano dalla stella.

Dal conteggio complessivo va quindi tolto il fondo-cielo.

Nei software che si utilizzano per fare queste misure viene quindi definito un cerchio che contiene l'oggetto che vuol misurare e un anello in cui misurare il fondo-cielo

N_{TOT} è il numero totale dei conteggi nel cerchio

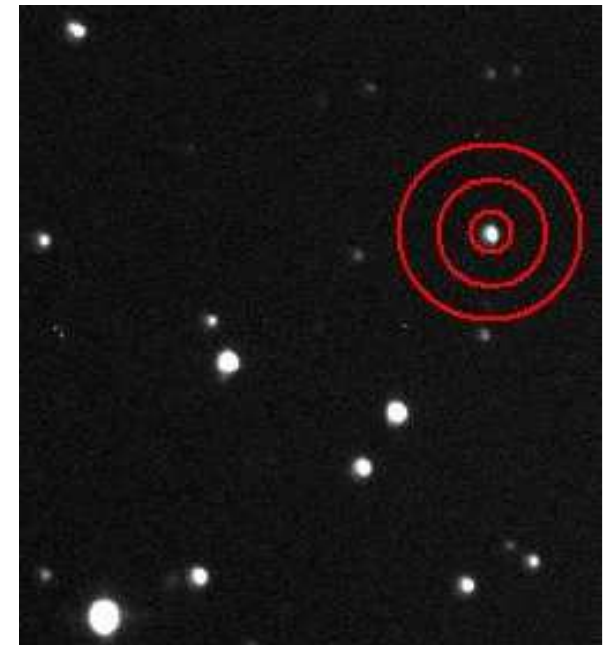
\overline{N}_{CIELO} è la media dei conteggi nell'anello

n è il numero di pixel nel cerchio

p è il numero di pixel nell'anello

σ_{CIELO} è la deviazione standard dei pixel nell'anello

G è il guadagno del sensore



Rapporto segnale/rumore

I software commerciali che in genere si utilizzano per fare fotometria danno un (S/N) doppio rispetto a quello calcolato con la formula data sopra.

Si ha pertanto che:

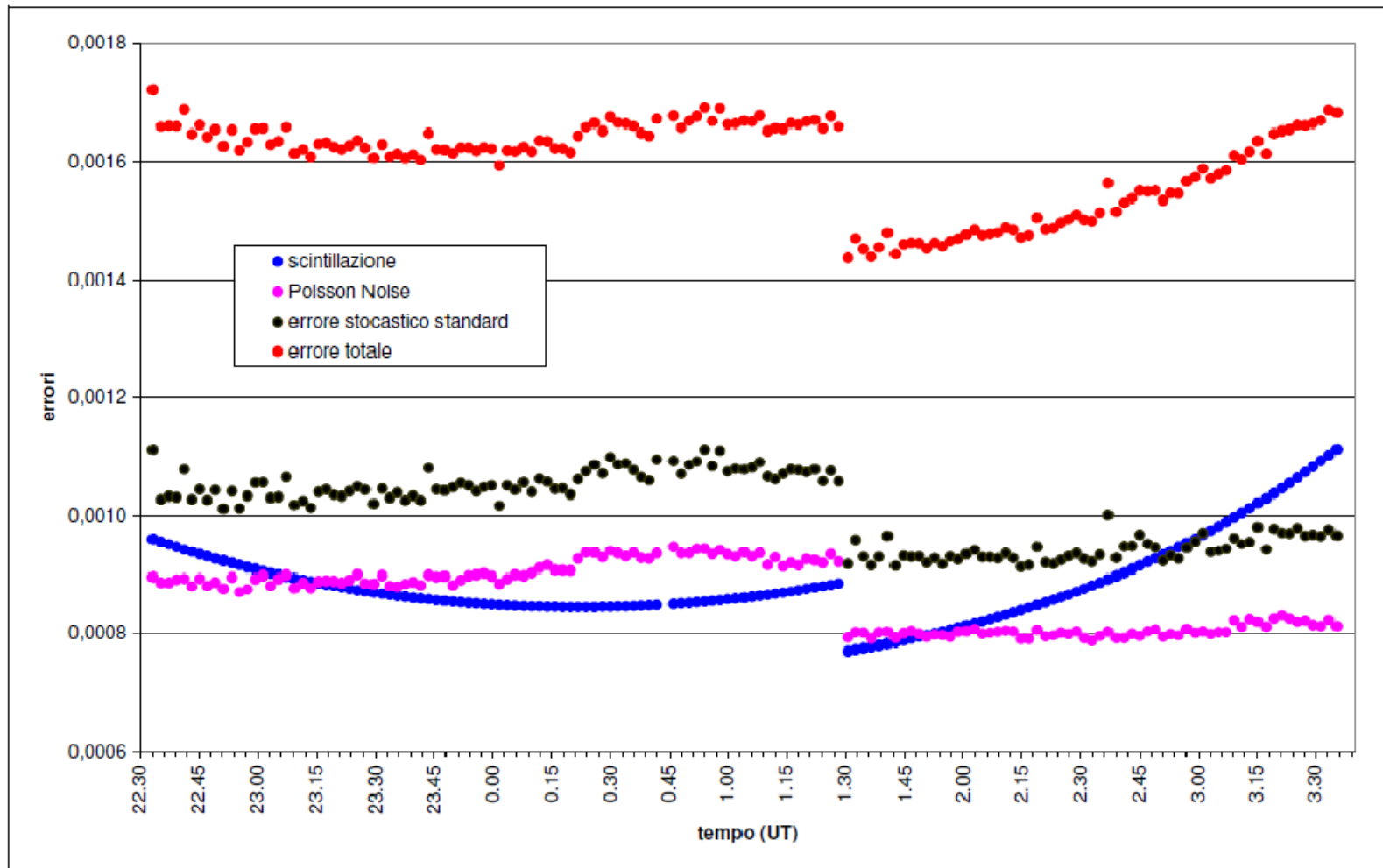
$k = 1.09$ se (S/N) viene calcolato con la formula

$k = 2.18$ se per (S/N) si prende il valore fornito dal software.

Errore totale

L'errore totale è dato da:

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



Andamento degli errori misurati durante il transito del pianeta WASP-1 del 14.09.07.

Il salto è dovuto alla modifica della durata dell'esposizione, resasi necessaria per mantenere basso l'errore di scintillazione che stava aumentando per l'abbassamento della stella sull'orizzonte.

Software da utilizzare

Uno dei software maggiormente utilizzato in questo tipo di analisi è
MaxIm DL.

È possibile richiedere una demo di MaximDL (durata 30 giorni)
dalla pagina

[*http://www.cyanogen.com/maximdl_dl.php*](http://www.cyanogen.com/maximdl_dl.php)

SBIG – ST9XE

Specifiche CCD	
CCD	Kodak Enhanced KAF-0261E (Class 1) + Texas Instruments TC-237
Pixel Array	512 x 512 pixels, 10.2 x 10.2 mm
Total Pixels	262,144
Pixel Size	20 x 20 mm
Full Well Capacity	150,000 e⁻
Dark Current	4e⁻ /pixel/s at 0° C
Antiblooming	Non-ABG only



Specifiche di lettura	
Shutter	Electromechanical
Exposure	0.11 to 3600 seconds, 10ms resolution
A/D Converter	16 bits
A/D Gain	2.2e⁻ /ADU
Read Noise	15e⁻ RMS
Binning Modes	1 x 1, 2 x 2, 3 x 3
Full Frame Acquisition (including digitization and download) with high speed USB interface	< 1 s

Tecniche di ripresa

PER LA DETERMINAZIONE DELLA CORRETTA ESPOSIZIONE SI CONSIGLIA DI EFFETTUATE TUTTE LE PROCEDURE IN UNA NOTTE PRECEDENTE IL TRANSITO.

- A. Stabilizzare termicamente la strumentazione.
- B. Puntare il telescopio sul campo della stella.
- C. Inserire l'autoguida: è fondamentale perché riduce l'errore fotometrico introdotto dal "mosso" stellare.
- D. Individuata la stella, impostare il tempo di integrazione (secondo le tabelle indicate); è comunque sconsigliato scendere al di sotto di 60 s, qualunque sia il telescopio od il CCD impiegato.
- E. Eseguire alcune riprese di test e verificare che con il tempo di integrazione scelto (S/N) della stella con pianeta in transito e delle stelle di confronto si adeguato (>1000).

Tecniche di ripresa

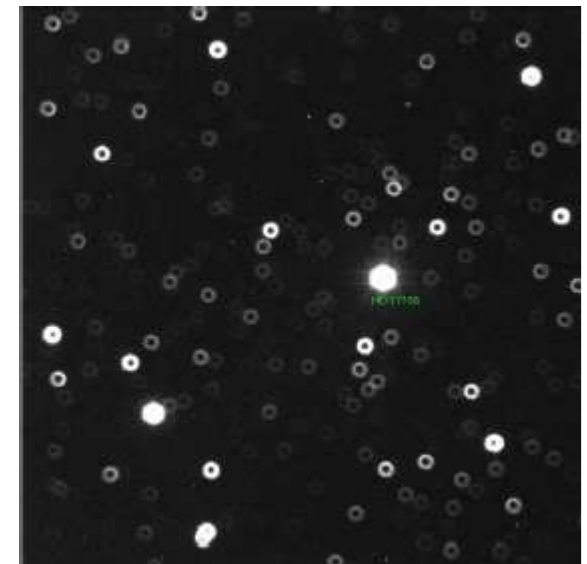
FONDAMENTALE: LA STELLA CON IL PIANETA IN TRANSITO E LE STELLE DI RIFERIMENTO NON DEVONO AVERE PIXEL SATURI

Una delle condizioni chiave affinché la precisione fotometrica sia sufficiente per rilevare con chiarezza il transito è che il livello ADU del pixel più luminoso della stella sia intorno a **25000-30000** (per una camera CCD a 16 bit).

Nel caso in cui la luminosità della stella fosse troppo elevata, si potrà interporre un filtro (R oppure V).

In alternativa si potrà anche sfocare l'immagine stellare di 2 o 3 volte la FWHM, ma anche fino ad ottenere delle immagini a ciambella.

Ciò crea però potrebbe creare problemi nell'uso dell'autoguida.



Tecniche di ripresa

NELLA NOTTE DEL TRANSITO

1. Stabilizzare termicamente la strumentazione prima di iniziare le riprese.
2. Accendere il CCD e attendere il raggiungimento della temperatura d'esercizio.

RICORDATE CHE LE RIPRESE DOVRANNO COMINCIARE ALMENO 30 MINUTI PRIMA DELL'INIZIO DEL TRANSITO E TERMINARE 30 MINUTI DOPO LA FINE.

3. Puntare il telescopio sul campo della stella con il pianeta in transito, un'ora prima dell'evento. Inserire l'autoguida che, per l'intera durata dell'evento, non dovrà mai essere disattivata.
4. Eseguire alcune riprese di test con il tempo di integrazione precedentemente determinato e verificare che il rapporto S/N della stella con pianeta in transito e delle stelle di confronto sia adeguato (>1000).

Tecniche di ripresa

Nel caso che S/N non raggiunga il valore indicato, non aspettiamoci una precisione fotometrica molto elevata.

Se vogliamo un risultato ragionevole ognuna delle tre componenti deve essere al più di 0.002 magnitudini.

A QUESTO PUNTO SI POSSONO AVVIARE LE RIPRESE.

Tecniche di ripresa

Al termine del transito si devono realizzare i bias (almeno una ventina), i dark (tra 20 e 40) ed i flat field (il loro numero deve essere di diverse decine).

La qualità del FLAT FIELD incide in modo determinante sull'accuratezza delle misure fotometriche

Più bias, dark e flat field si fanno e più si riduce l'errore di Poisson.

Questa fase può essere MOLTO lunga, per cui è buona norma provvedere a realizzarli nelle notti precedenti (almeno i dark e i bias).

Quando il tempo di integrazione del flat è di alcuni secondi è opportuno effettuare dei dark anche per questi tempi di integrazione e applicare dark e bias anche ai flat field.

CIO' CONCLUDE LA FASE DI ACQUISIZIONE

Rielaborazione delle immagini e analisi dati

Per la riduzione delle immagini i passi sono pochi e tutti automatici.

Calibrazione delle immagini

Allineamento delle immagini

Fotometria

Rielaborazione delle immagini e analisi dati

Calibrazione delle immagini

Consiste nel correggere le immagini eliminando i vari “rumori”, in pratica è necessario applicare bias, dark e flat field alle immagini.

I software normalmente utilizzati effettuano questo lavoro in automatico.

Sostanzialmente bisogna crearsi: un **MASTER BIAS** facendo la *mediana* dei bias e un **MASTER DARK FLAT** facendo la *mediana* dei dark fatti con i tempi dei flat field.

Calibrare i flat field con i MASTER appena creati e quindi creare un **MASTER FLAT** facendo la *mediana* dei flat field.

Creare quindi un **MASTER DARK IMAGE** mediando i dark fatti con i tempi delle immagini.

Applicare il **MASTER DARK IMAGE**, il **MASTER FLAT** e il **MASTER BIAS** a tutte le immagini.

Le procedure saranno messe a disposizione.

Rielaborazione delle immagini

Allineamento delle immagini

Consiste nell'allineare le immagini alla stella in esame per eliminare eventuali slittamenti.

Anche in questo caso i software utilizzati hanno una funzione che effettua questa operazione.

Rielaborazione delle immagini e analisi dati

Fotometria

La procedura di MaxIm permette di avere rapidamente la curva di luce.

Dopo aver selezionato i raggi dei cerchi per la fotometria, basta indicare qual è la stella da misurare (***NEW OBJECT***) e quali sono le stelle di confronto (***NEW REFERENCE STAR***).

Il comando ***VIEW PLOT*** ci permette di visualizzare il grafico della curva di luce.

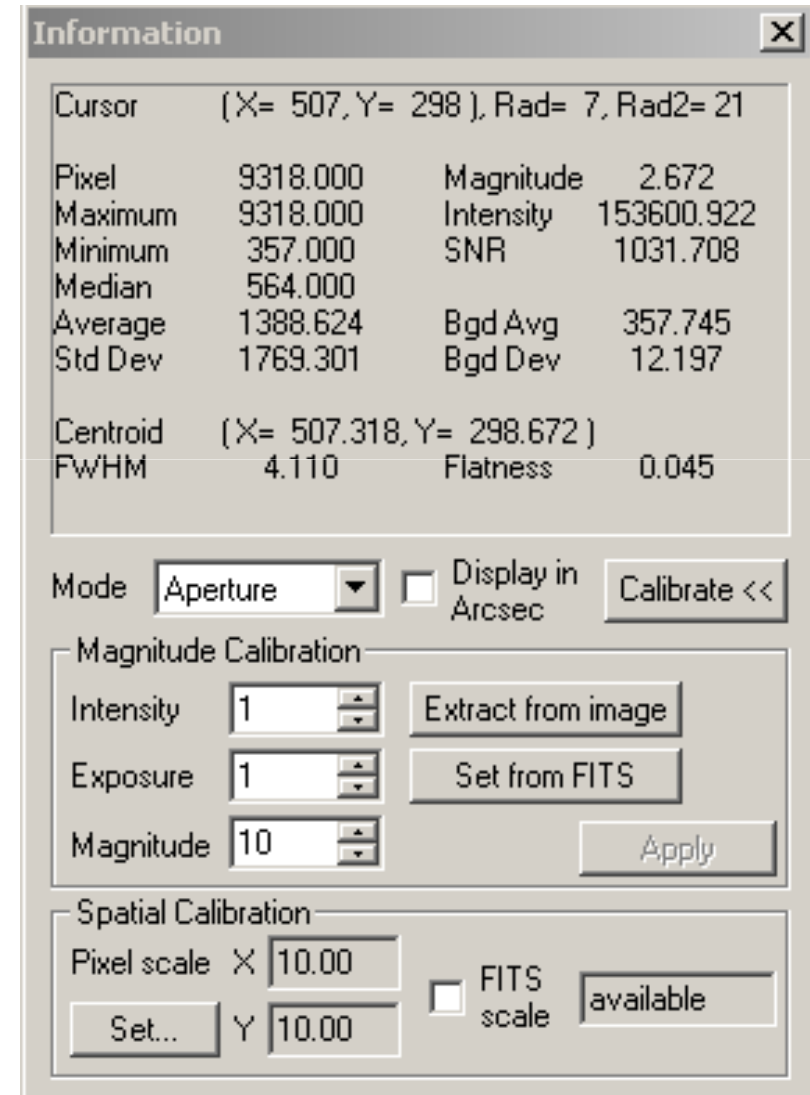
Il comando ***SAVE DATA*** ci permette di salvare i dati per successive rielaborazioni con un foglio elettronico (Excel o Origin).

Rielaborazione delle immagini e analisi dati

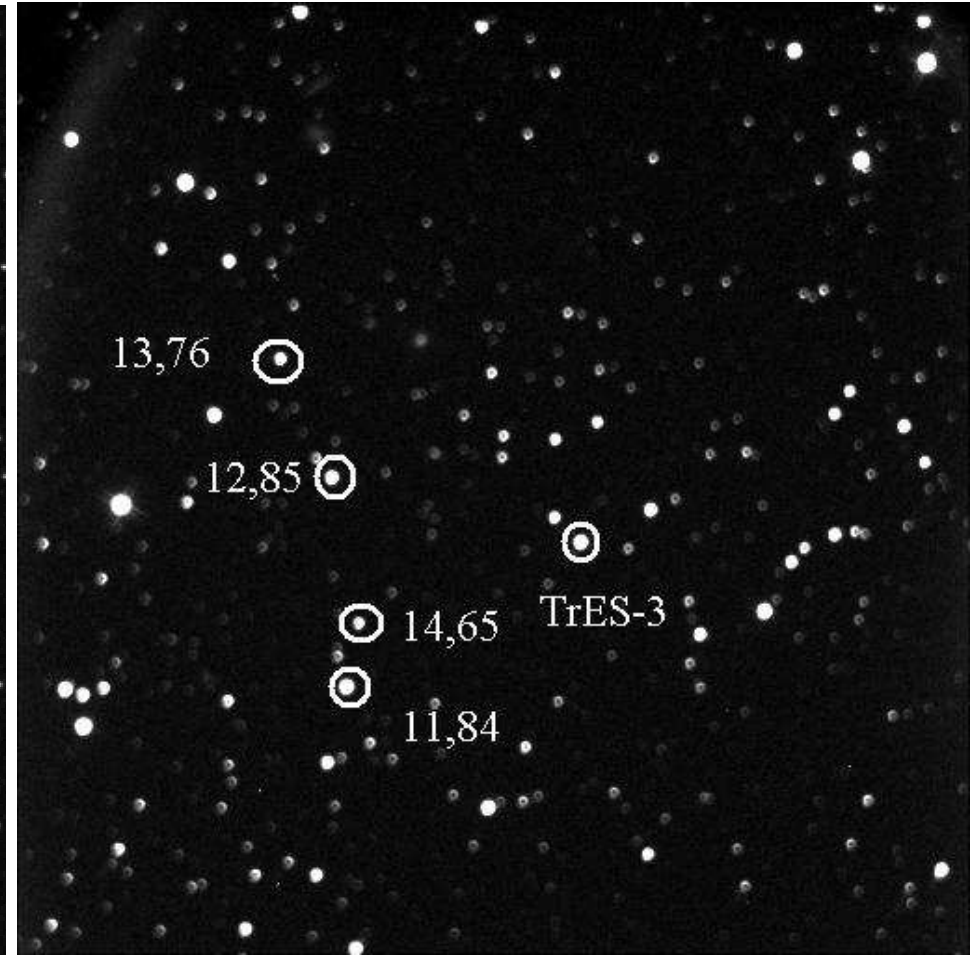
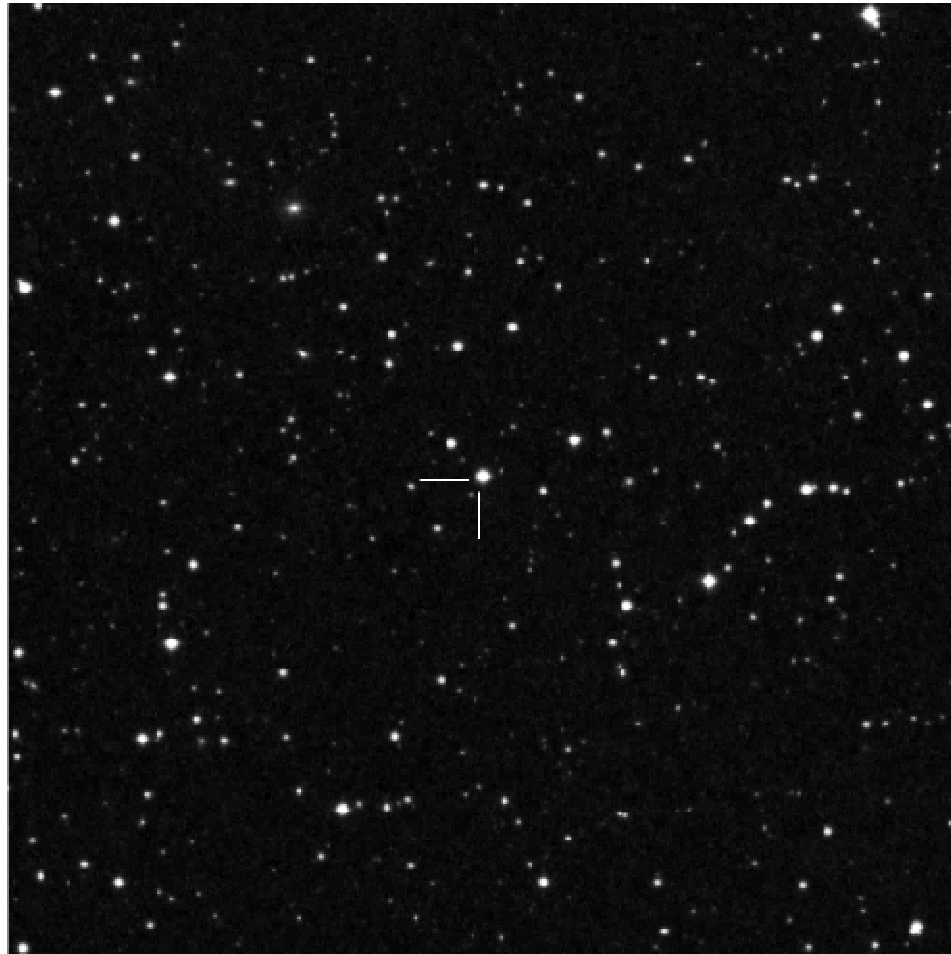
Per la determinazione degli errori è necessario avere a disposizione dei dati che sono contenuti nella finestra “Information” di MaxIm.

Tali informazioni possono essere salvate su un file utilizzando un script che contiene la funzione di MaxIm

Document.CalcInformation.



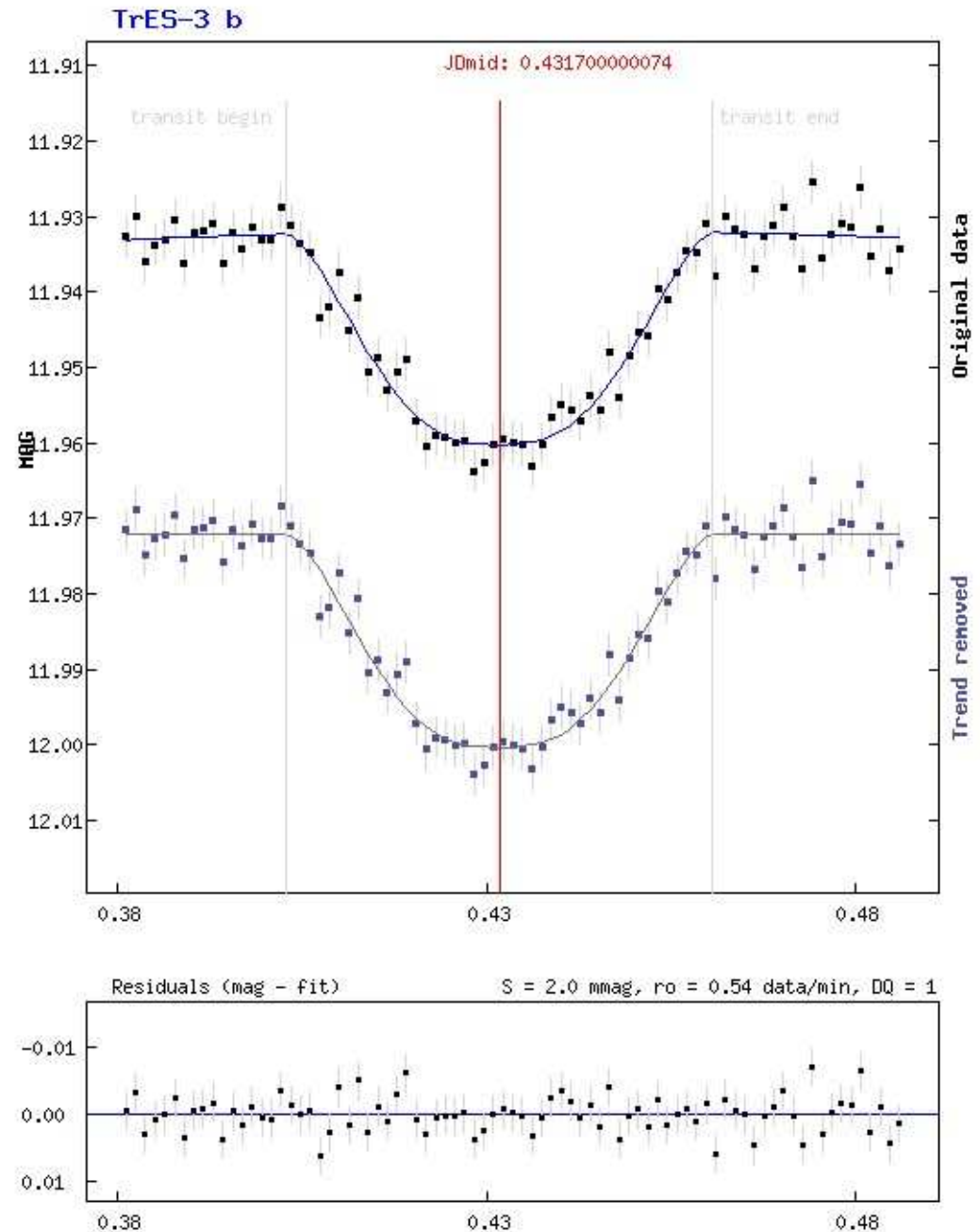
Rielaborazione delle immagini e analisi dati



<http://var2.astro.cz/ETD/>

Rielaborazione delle immagini e analisi dati

Passando un opportuno file dati a siti quali <http://var2.astro.cz/ETD/> si possono ottenere curve di luce come quelle a fianco dalle quali si ricavano i valori della durata del transito e della sua profondità che permettono di determinare i parametri fisici del pianeta.



Rielaborazione delle immagini e analisi dati

JD mid: 2455732.43170 +/- 0.00039

HJD mid: 2455732.43455 +/- 0.00039

(helcor = **0.00285**)

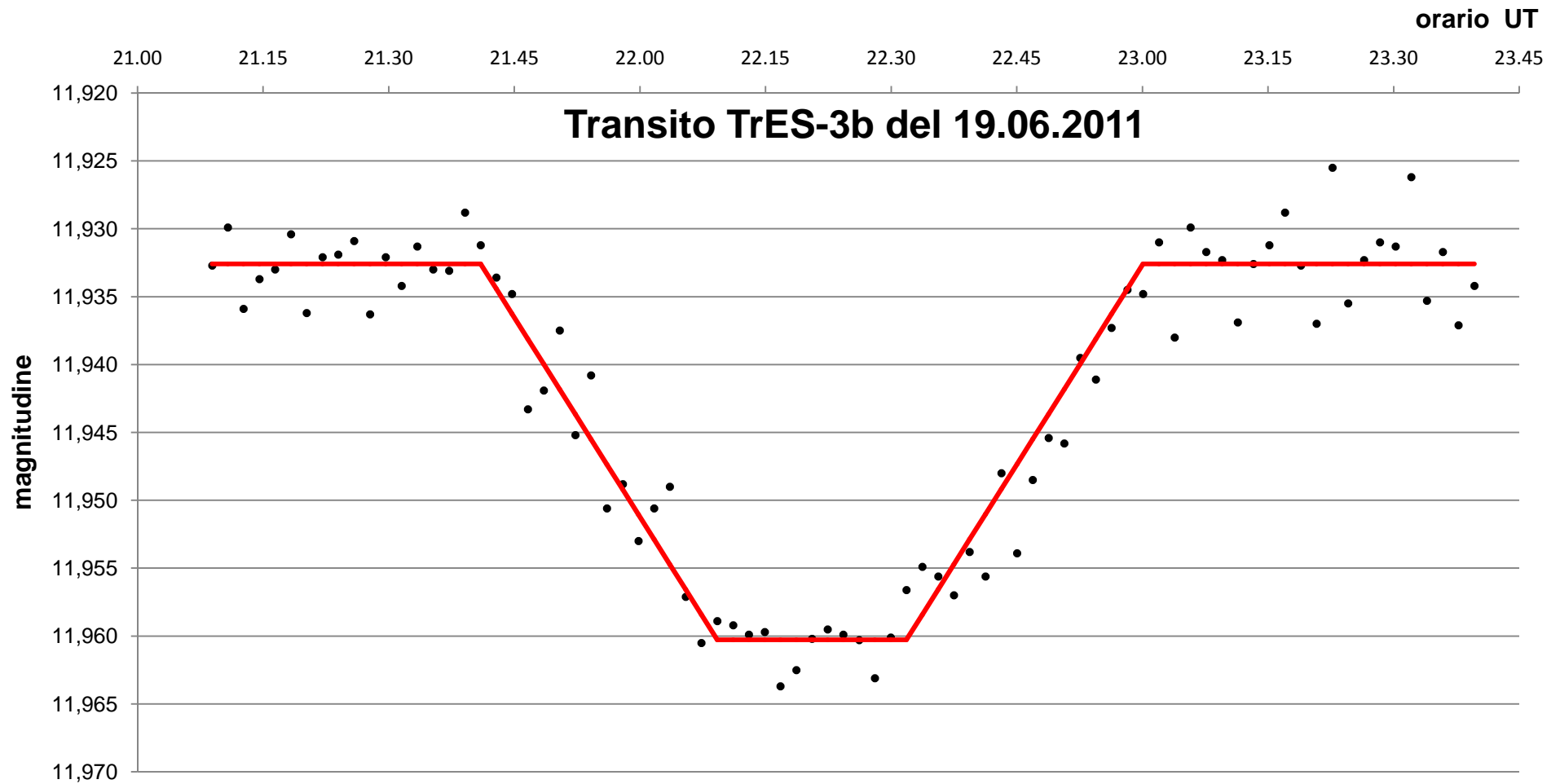
Duration: 83.2 +/- 2.1

minutes

Depth: 0.0283 +/- 0.0015

mag

Rielaborazione delle immagini e analisi dati



$a = 0.0227 \pm 0.0002 \text{ UA}$ ($0,0226 \pm 0.0002 \text{ UA}$) $R = 1,3 \pm 0.1 \text{ RJ}$ ($1.305 \pm 0.09 \text{ RJ}$)

$i = 82,6^\circ \pm 0.6^\circ$ ($82.15^\circ \pm 0.21^\circ$)