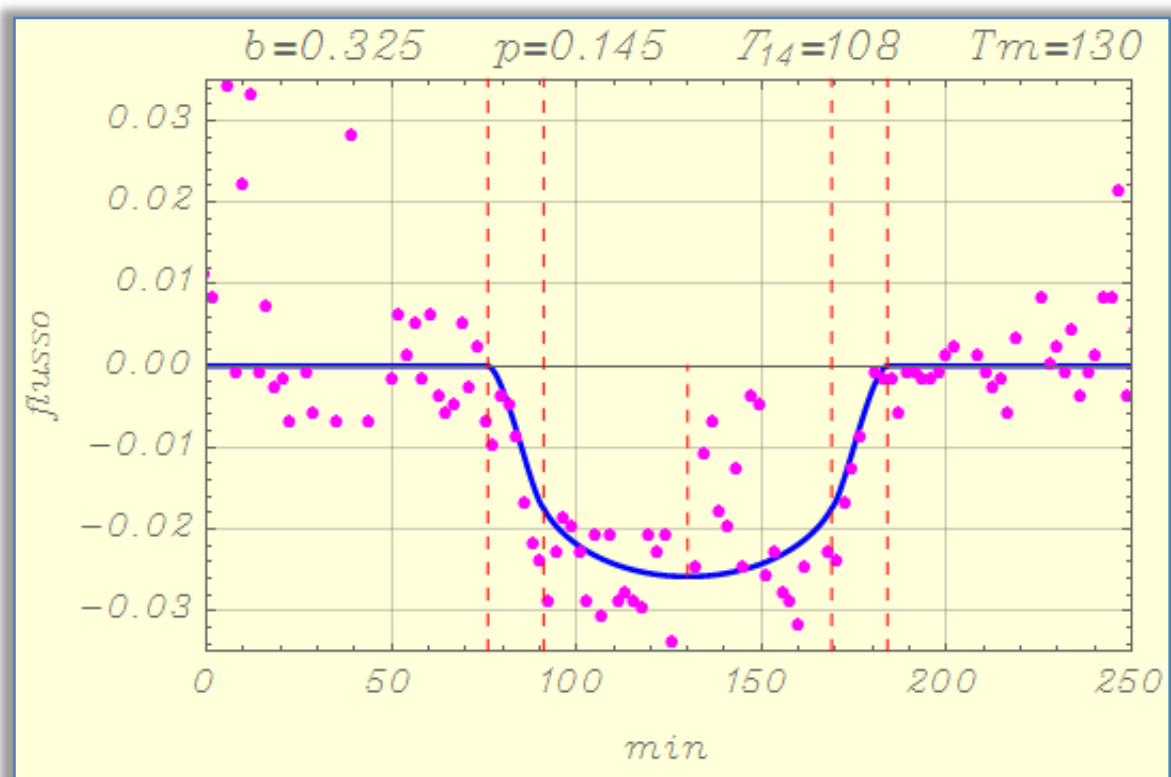


ANALISI CURVA DI LUCE DEL TRANSITO DELL'ESOPIANETA QATAR-2B

(DATI FOTOMETRICI DELL'OSSERVATORIO S. LUCIA)



LORI LORIS

ATA

12 SETTEMBRE 2017

Premessa

Nella primavera del 2017, alcuni astrofili di Santa Lucia di Stroncone-Tr e di Mentana –Roma ^[1], hanno deciso di collaborare per una survey rivolta alla ricerca e allo studio delle stelle variabili a breve periodo e, occasionalmente, allo studio degli esopianeti.

La tecnica standard consiste nell'inquadrare un particolare campo stellare per tutta la notte e di riprendere una immagine ogni 2 minuti di tempo, al fine di evidenziare le brevi variazioni di luminosità delle eventuali stelle variabili rapide presenti nel campo. Le esposizioni di due minuti garantiscono di avere buone immagini per le stelle dalla 14^a alla 16^a magnitudine e di avere comunque la possibilità di misurare stelle fino alla magnitudine 18 o più. In caso di stelle molto luminose da misurare, come nel caso degli esopianeti, il tempo di esposizione può essere ridotto fino ad un minuto.

Le immagine ottenute nel corso di una sessione vengono elaborate con il software "Astrometrica", dell'austriaco *Herbert Raab*, al fine di ottenere sia i dati astrometrici (ascensione retta, declinazione), sia quelli fotometrici (magnitudine, rapporto segnale/rumore) di tutte le stelle presenti nel campo stellare.

Gli elenchi di stelle ottenuti con questo programma vengono poi sottoposti ad analisi da parte di alcuni softwares realizzati dal mentanese *Stefano Valentini*. "AstrometricaParser" riesce a ricostruire in maniera del tutto automatica le curve di luce di tutte le stelle presenti nel campo stellare, mentre "PeriodFinder" riesce a determinare sia il tipo di variabilità sia il periodo delle eventuali variabili presenti nello stesso campo.

La strumentazione utilizzata è quella dell'osservatorio di Santa Lucia di Stroncone, costituita da un telescopio di tipo Ritchey-Chretien (500mm di diametro, 3000mm di focale) e da un CCD della Sbig (sensore di 1024x1024 pixel da 24 mm).

Il 30 marzo 2017 è stato puntato il telescopio verso la stella nana Qatar2 (tipo spettrale K, Temperatura 4645 °K, mag visuale 13.3, con il duplice obiettivo di:

- ✓ individuare e risolvere eventuali criticità strumentali durante il transito di un esopianeta, mai osservato prima d'ora all'Osservatorio S. Lucia,
- ✓ misurare la variazione di flusso della stella ospite durante il transito dell'esopianeta Qatar-2b.

^[1] *Tonino Vagnozzi* (supervisione strumentazione e ricerca); *Stefano Valentini* (supervisione software e analisi immagini); *Paolo Casali* (riduzione delle immagini e studio variabili); *Loris Lori* (riduzione delle immagini e studio esopianeti); *Giovanna Cozzari* (coordinatore tecnico-scientifico)

1. File Dati

Seguendo queste procedure siamo riusciti ad ottenere dati fotometrici (magnitudine, rapporto segnale/rumore) delle stelle presenti nel campo stellare in riferimento al catalogo UCAC4. I dati della registrazione dell'evento, sono:

- data giuliana
- magnitudine
- errore stimato

La variazione di flusso di Qatar 2 è stata ottenuta per mezzo di fotometria differenziale con due stelle target di riferimento, Fig. 1. La durata del fenomeno è stata arbitrariamente divisa in 5 intervalli temporali: (Fuori Transito, Ingresso, Eclisse Piena, Egresso, Fuori Transito). La magnitudine di Qatar2 ($M = 12.69807$) è la media dei valori registrati prima e dopo l'evento di transito.

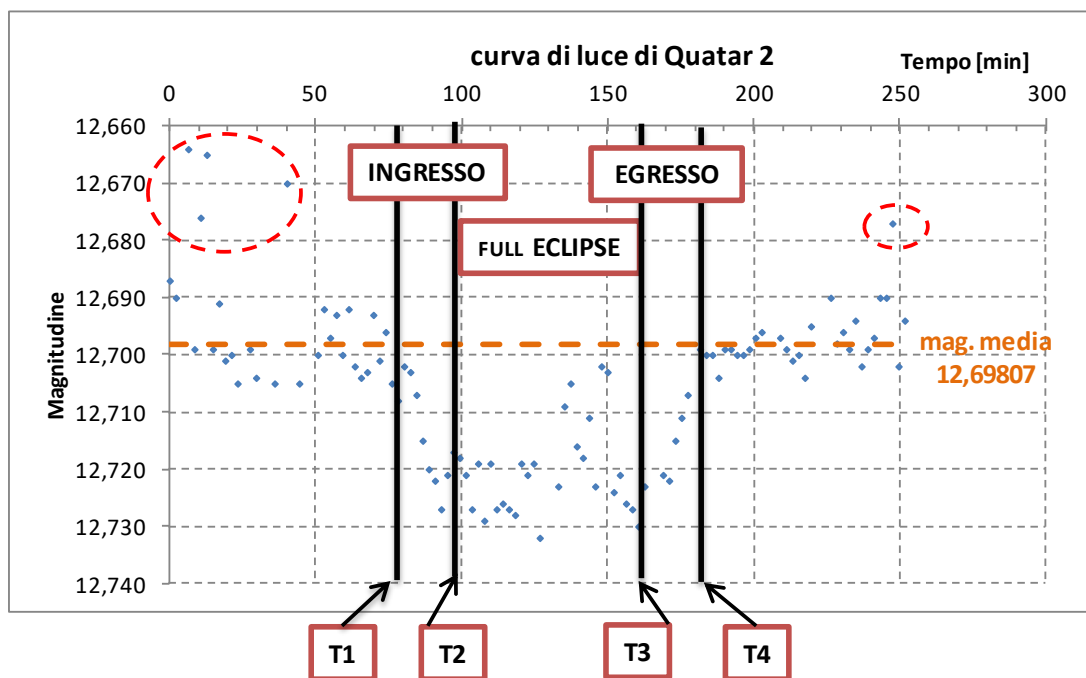


Fig. 1 – Distribuzione dei dati fotometrici

Nel calcolo della magnitudine media sono stati esclusi i 10 punti cerchiati perché ritenuti non affidabili, inoltre non è stato tenuto in conto l'errore stimato di ogni dato. Dalla distribuzione dei punti si desume una durata totale di transito (T_1T_4) approssimativa di circa 100÷130 min.

2. Fitting dei punti sperimentali

E' stata eseguita una semplice regressione lineare dei dati in ognuna delle quattro fasi distinte del transito (Fuori Transito, Ingresso, Eclisse Piena, Egresso), Fig. 2.

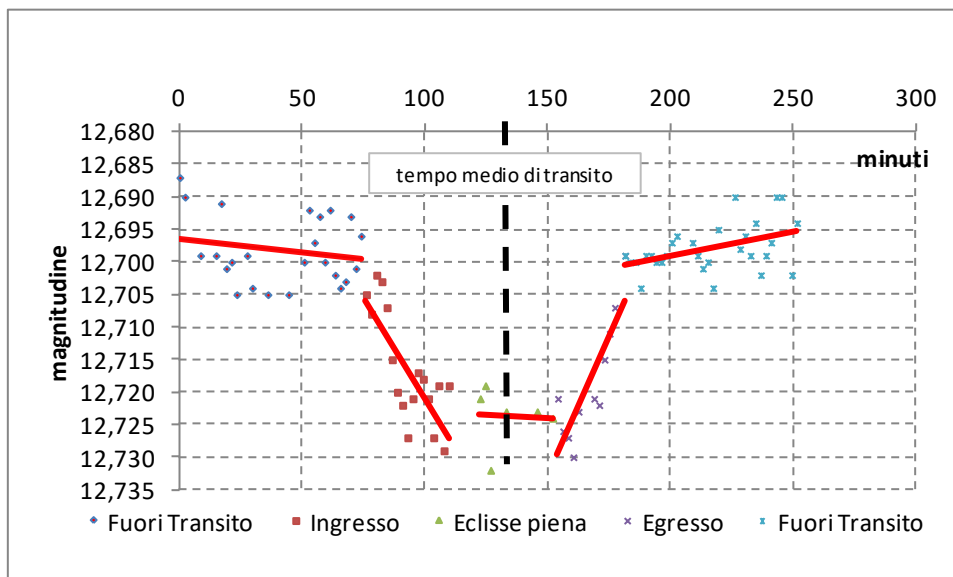


Fig. 2 - Approssimazioni lineari delle cinque zone della curva di luce

Le inclinazioni delle rette di regressione, la loro forte asimmetria e mancanza di specularità per riflessione intorno al tempo medio di transito indicano che il fenomeno non è riconducibile a semplici approssimazioni lineari.

Per tracciare correttamente la curva di luce più rappresentativa dei dati sperimentali è necessario:

- elaborare un modello matematico che interpreti correttamente l'evoluzione del fenomeno fisico;
- effettuare successivamente una analisi statistica ai minimi quadrati per minimizzare lo scarto tra i dati sperimentali e la predizione del modello.

3. Modello del transito planetario

I dati esportati sono stati adattati ad un modello matematico di curva di luce descritto nell'articolo di K. Mandel e E. Agol (2002) ^[2].

Nello schema sottostante sono riportati i parametri geometrici della configurazione stella/pianeta alla base del modello. Il transito viene simulato come l'eclisse di una stella sferica con una sfera opaca.

$z[t]$ è la distanza centro stella-centro pianeta (funzione del tempo t).

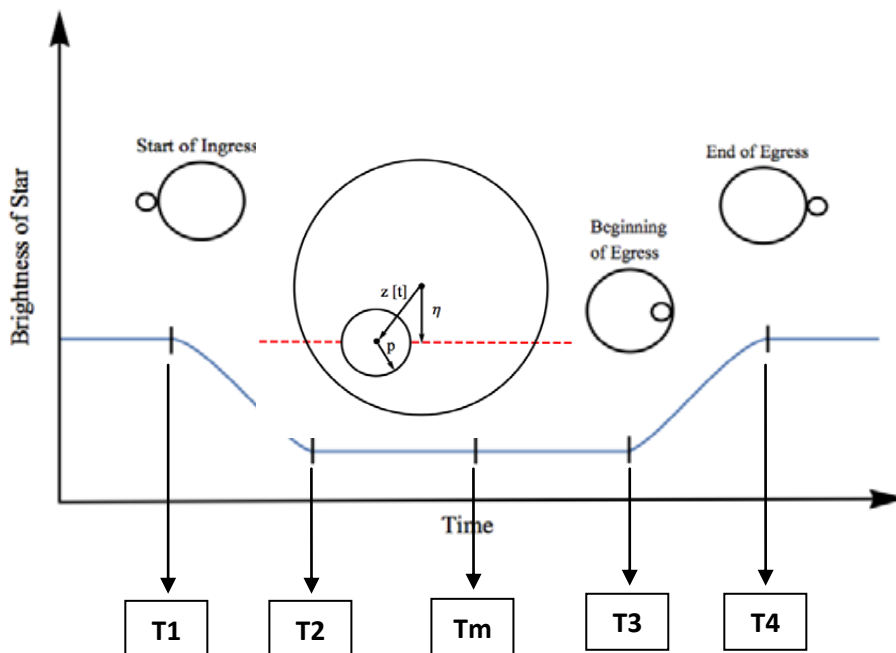
p R_p/R_s è il raggio normalizzato del pianeta (numero adimensionale).

b è il parametro di impatto, $0 \leq b \leq 1$, (numero adimensionale).

$T_1 T_4$ è la durata totale del transito.

T_m è il tempo alla metà del transito.

Il grafico seguente della curva di luce mostra le posizioni di stella e pianeta in diverse zone e tempi caratteristici del transito: ($T_1 T_2$ = intervallo di ingresso, $T_3 T_4$ intervallo di egresso, $T_2 T_3$ = intervallo di eclisse piena, $T_1 T_4$ = intervallo totale del transito, T_m tempo medio al transito).



3.1 Modello della Curva di luce con sorgente di Luminosità Uniforme

In prima approssimazione si assume che la stella abbia luminosità uniforme. In tali condizioni il flusso della curva di luce può essere ben rappresentato dalle seguenti funzioni definite a tratti in ognuno degli intervalli di tempo $T_1 T_2$, $T_2 T_3$, $T_3 T_4$.

INTERVALLO	FLUSSO
$T < T_1$	1
$T_1 \leq t < T_2$	$1 - \frac{1}{\pi} * \left(p^2 * \left(-\text{ArcCos} \left[\frac{p^2 - z[t]^2 - 1}{2pz[t]} \right] + \pi \right) + \left(-\text{ArcCos} \left[\frac{1 - p^2 - z[t]^2}{2z[t]} \right] + \pi \right) - \sqrt{\frac{4z[t]^2 - (1 + z[t]^2 - p^2)^2}{4}} \right)$
$T_2 \leq t < T_3$	$1 - p^2$
$T_3 \leq t < T_4$	$1 - \frac{1}{\pi} * \left(p^2 * \text{ArcCos} \left[\frac{p^2 - z[t]^2 - 1}{2pz[t]} \right] + \text{ArcCos} \left[\frac{1 - p^2 - z[t]^2}{2z[t]} \right] - \sqrt{\frac{4z[t]^2 - (1 + z[t]^2 - p^2)^2}{4}} \right)$
$T > T_4$	1

Le equazioni precedenti, inserite nel software Wolfram Mathematica, possono essere manipolate dinamicamente variando i parametri p , b , t_1 , t_4 , t_m . Si ottiene in tal modo una curva simile alla Fig. 3 per ogni combinazione dei parametri di controllo che devono essere scelti entro ranges opportuni altrimenti il programma restituisce una segnalazione di errore per calcoli non ammissibili.

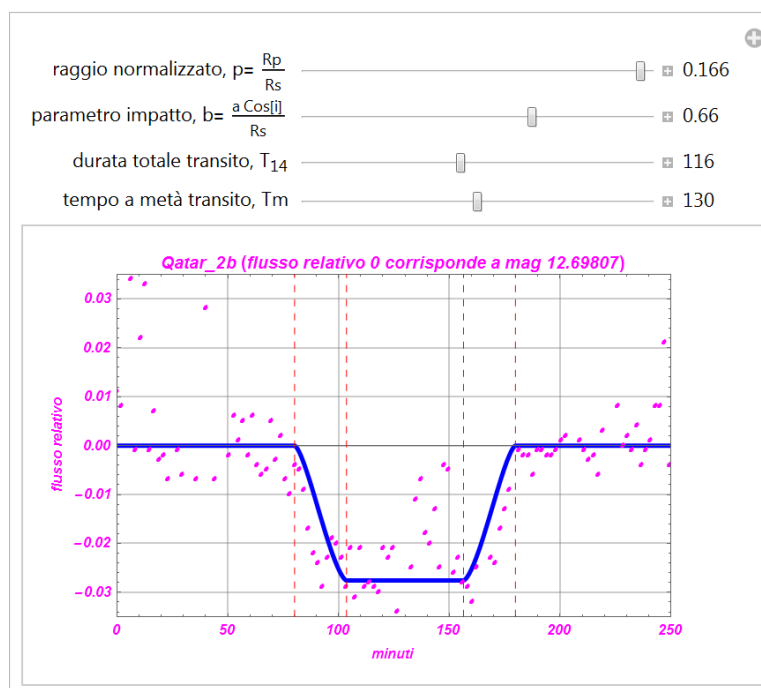
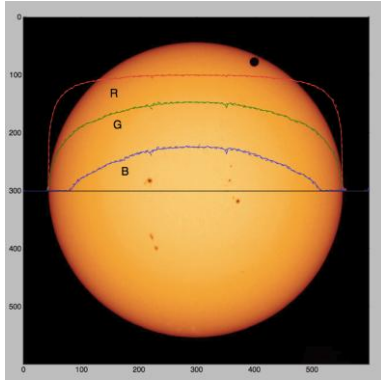


FIG. 3 - Curva di luce Qatar2 (ipotesi di sorgente uniforme)

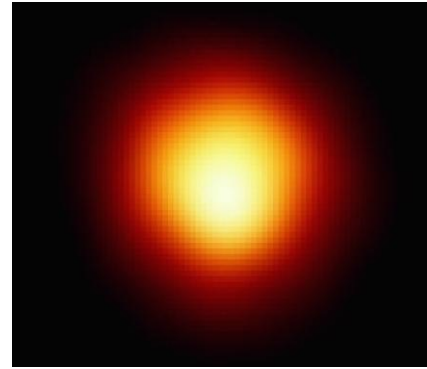
La Fig. 3 mostra chiaramente che, con l'approssimazione di sorgente uniforme, si ottiene una curva con un fondo più piatto rispetto ad una curva di transito reale in cui l'effetto del Limb Darkening provoca maggior oscuramento durante l'eclisse e quindi una curvatura più accentuata nel ventre della curva di luce.

3.2 Modello della Curva di luce con Limb Darkening

Per un accurato calcolo della curva di luce nel transito planetario è assai importante considerare l'effetto del Limb Darkening. La stella infatti non è uniformemente luminosa; il suo bordo appare generalmente più scuro rispetto al centro del disco.

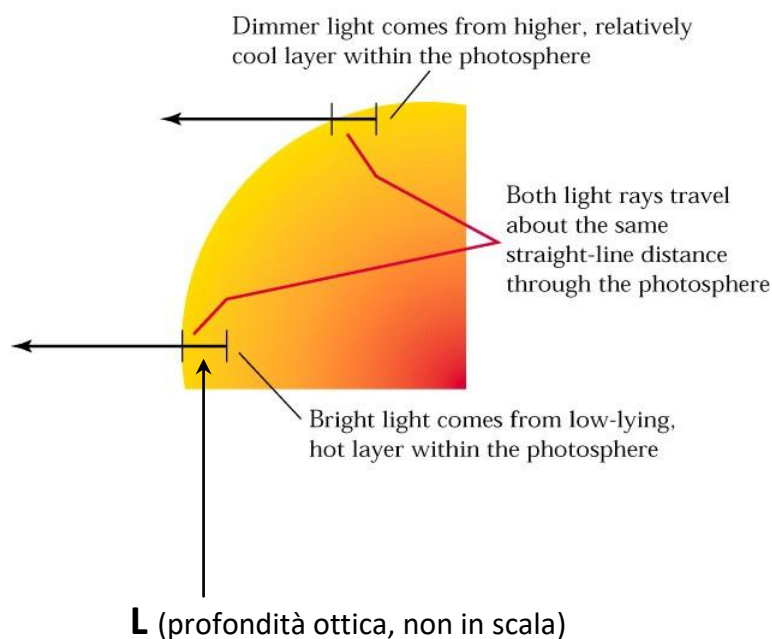


Limb Darkening del Sole



Limb Darkening di Betelgeuse (HST)

Il parametro fisico che spiega il Limb Darkening è la PROFONDITA' OTTICA (L), che rappresenta la quantità di luce dispersa per diffusione o assorbimento durante un dato percorso all'interno del gas stellare, ed è legata alla profondità geometrica che si estende all'interno della stella fino al punto in cui il plasma diviene opaco, (ad esempio sul nostro Sole corrisponde ad una profondità geometrica dell'ordine di qualche centinaio di chilometri).



L'intensità specifica della radiazione dipende anche dalla sua frequenza come è evidenziato nel caso del Sole dove l'intensità nel blu presenta un maggiore oscuramento al bordo rispetto al rosso.

L'effetto del Limb Darkening sulla curva di luce dipende dalla variazione dell'intensità luminosa $i(r)$ emergente alla coordinata r della stella. Generalmente il Limb Darkening viene simulato introducendo una legge di tipo quadratico che specifica il profilo di intensità in funzione di due coefficienti g_1 e g_2 .

Nel caso di Qatar2 questi due coefficienti sono stati dedotti con il metodo descritto in ^[3], $g_1 = 0.595$ e $g_2 = 0.1155$. La legge dell'intensità emergente, usata per Qatar2, con Limb Darkening quadratico è:

$$i[r] = 1 - \gamma_1 \left(1 - \sqrt{1 - r^2}\right) - \gamma_2 \left(1 - \sqrt{1 - r^2}\right)^2$$

Nel grafico di Fig. 4 è visualizzato l'andamento dell'intensità $i(r)$.

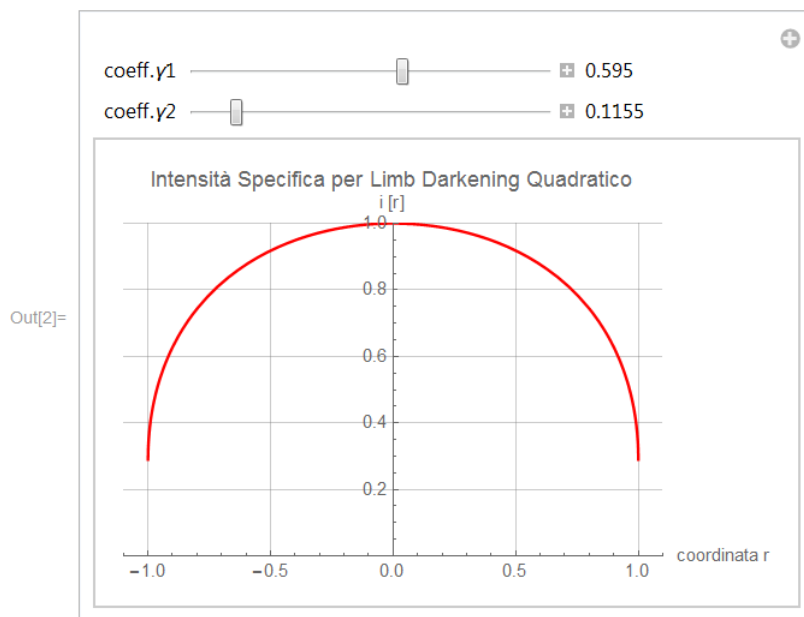


FIG. 4 - Legge di intensità emergente $i(r)$ attribuita a Qatar2

Con l'ulteriore semplificazione di piccoli pianeti ($p \sim 0.1$) e Limb Darkening quadratico il flusso della curva di luce risulta ben rappresentato dalle seguenti funzioni definite a tratti:

INTERVALLO	FLUSSO
------------	--------

$t < T1$	1
$T1 \leq t < T2$	$1 - \frac{(1 - (z[t] - p)^2)^{-1} \int_{z[t]-p}^1 i[r] + 2r \, dr}{4\pi\omega} \left(p^2 \text{ArcCos} \left[\frac{z[t]-1}{p} \right] - (z[t] - 1) \sqrt{p^2 - (z[t] - 1)^2} \right)$
$T2 \leq t \leq T3$	$1 - \frac{p^2}{4\omega} (4z[t]p)^{-1} \int_{z[t]-p}^{z[t]+p} i[r] + 2r \, dr$
$T3 < t \leq T4$	$1 - \frac{(1 - (z[t] - p)^2)^{-1} \int_{z[t]-p}^1 i[r] + 2r \, dr}{4\pi\omega} \left(p^2 \text{ArcCos} \left[\frac{z[t]-1}{p} \right] - (z[t] - 1) \sqrt{p^2 - (z[t] - 1)^2} \right)$
$t > T4$	1

In questo caso le equazioni, essendo più complicate, non vengono manipolate dinamicamente ma, dopo aver dato in INPUT al Wolfram Mathematica il valore dei parametri di controllo p , b , $t_1 t_4$, t_m viene eseguito il grafico di una sola curva di luce alla volta, simile a quella di Fig. 5.

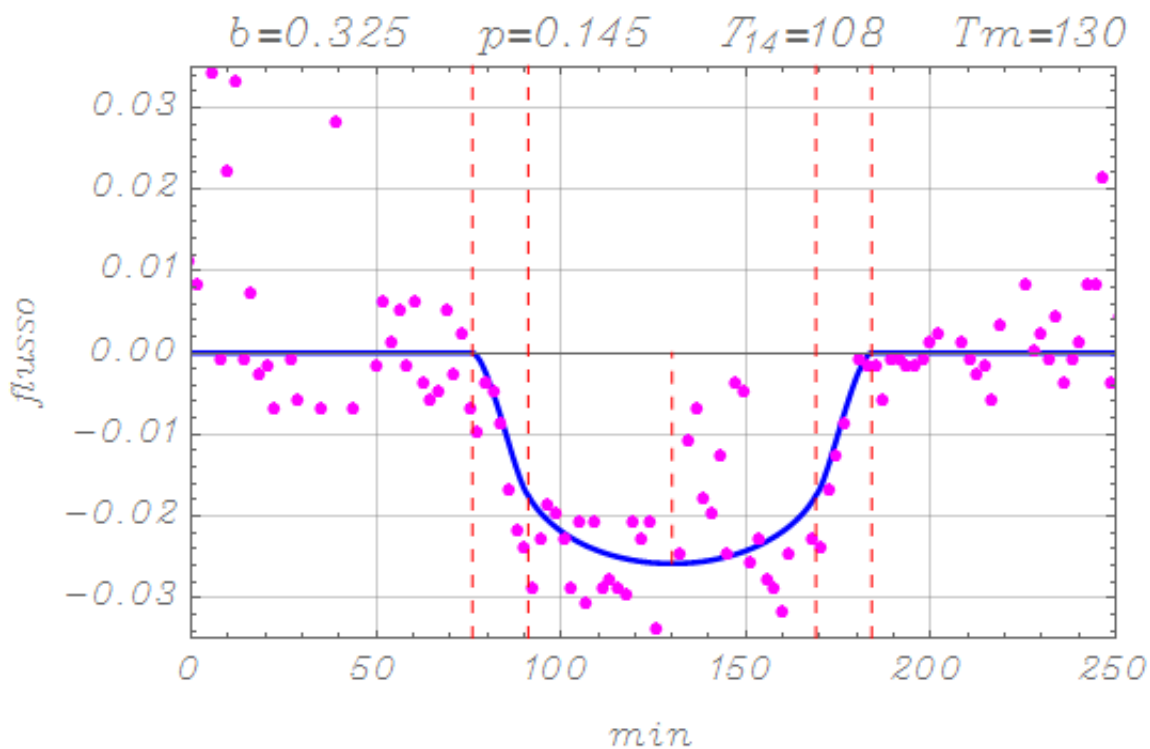


FIG.5 : Curva luce di Qatar2 generata con Limb Darkening quadratico.

La curva ottenuta appare ora più incurvata al centro poiché per effetto del Limb Darkening il pianeta bloccherà più luce quando transita al centro della stella rispetto a quando attraversa i bordi. Tuttavia la curva non è ancora il miglior fit dei dati. Per ottenerlo si dovrà eseguire una analisi statistica in grado di

determinare lo scarto quadratico medio minimo corrispondente ai 4 parametri di controllo.

Il programma è stato avviato più volte con diversi INPUT e, dopo vari tentativi, sono stati trovati i seguenti valori di p , b , t_1t_4 , t_m con i quali è stato possibile determinare i parametri orbitali del sistema Qatar2 con un buon grado di approssimazione.

p	0.145
b	0.325
t_1t_4	108 min
t_m	130 min

I parametri orbitali dedotti con il modello che tiene conto dell'effetto del Limb Darkening, vedi Tab.1, sono in buon accordo con i valori pubblicati in un articolo del Montly Notices of the Royal Astronomical Society ^[4], relativo all'occultazione di macchie stellari su Qatar 2 da parte dell'esopianeta gioviano Qatar-2b.

PARAMETRI ORBITALI DI QATAR-2B RICAVATI DALLA CURVA DI LUCE				
parametro	simbolo	valore calcolato	unità di misura	Royal Astronomical Society, NMRAS 1-10 (2017)
durata totale transito	T_{14}	108.	min	108.589
durata eclisse piena	T_{23}	77.7924	min	77.784
durata di ingresso	T_{12}	15.1038	min	15.402
durata di egreso	T_{34}	15.1038	min	15.402
profondità del transito	δ	0.0258017		0.026587
raggio Qatar-2b	R_p	1.13171	raggio Jupiter	1.115
parametro di impatto	b	0.10832		0.115
periodo orbitale	P	1.3504	day	1.33711677
raggio orbitale raggio stella	$\frac{a}{r_s}$	6.65746		6.531
semiasse orbitale	a	0.0218059	U.A	0.02136
densità Qatar	ρ_s	2.17203	ρ Sole	2.090
inclinazione piano orbitale	i	89.0629	gradi	88.99

Tab.1. Confronto dei parametri orbitali ricavati con il modello e i dati di letteratura.

4. Lavoro futuro

Saranno eseguite altre osservazioni di transiti esoplanetari con l'obiettivo di migliorare per quanto possibile la qualità dei dati fotometrici cercando di determinare qualche routine che possa minimizzare la deviazione dei dati dal modello.

Bibliografia

[2] *"Analytic Lightcurves for Planetary Transit Searches"*, K. Mandel & E. Agol, *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 580, no. 2, pp. L171–L175, 2002

[3] *"Limb darkening and exoplanets: testing stellar model atmospheres and identifying biases in transit parameters"* Néstor Espinoza, Andrés Jordan

[4] *"Recurring sets of recurring starspot occultations on exoplanet-host Qatar-2"* T. Mocnik and C. Hellier, *MNRAS* 000, 1-10 (2017)

"Light Curve Analysis for Transit of Exoplanet Qatar-1b", Dhiraj Bansal, Baylor University

"Caccia agli esopianeti tramite il modello del transito", Giuliani & Vincenzi

"Other Worlds: Analyzing the light Curves of Transiting Extrasolar Planets", Emily Leiner, 2010