Osservazione di esopianeti

Lavoro di maturità 2015 di Boila Tanya e Magnoli Christopher, sotto la supervisione del professor Cretton Nicolas
Liceo Lugano 2, Savosa

"Però, signor Simplicio, venite pure con le ragioni e con le dimostrazioni, vostre o di Aristotile, e non con testi e nude autorità, perché i discorsi nostri hanno a essere intorno al mondo sensibile, e non sopra un mondo di carta."

Dialogo sopra i due massimi sistemi, Galileo Galilei

Immagine di copertina: *rapresentazione grafica di Kepler-78b (di Karen Teramura).*

Sommario

Introduzione 5

1. Ricerca attuale 6
1.1 Fascia di abitabilità 6
1.2 Il telescopio Kepler 6
1.3 Combinazioni particolari 9

2. Metodi di osservazione di esopianeti 11
2.1 Rilevazione diretta 11
2.2 Spettroscopia Doppler 12
2.3 Astrometria 16
2.4 Microlente gravitazionale 18
2.5 Transito 19

3. Telescopio e osservazioni 20
3.1 Coordinate celesti equatoriali 21
3.2 Telescopio 22

4. Osservabilità di un transito 23

5. Analisi dei dati di osservazione 25
5.1 Derivazione delle formule per l'analisi dei dati 25
5.2 Limb darkening 30
5.3 Analisi dell'incertezza nei risultati 32
5.4 Massa d'aria 33

6. Dati 34
6.1 Diario delle osservazioni 34
6.2 HAT-P-12b 35
6.3 HAT-P-19b 37
6.4 HAT-P-36b 39
6.5 WASP-103b 41

7. Conclusioni 43
Ringraziamenti 44

Appendice 1 Condizioni per la vita evoluta 45

Appendice 2 Utilizzo del telescopio di Carona passo per passo 46
1. Ricerca dei casi possibili di pianeti osservabili da Carona a una certa data 46
2. Conversione della classificazione 47
3. Impostazione del telescopio 49

Appendice 3 Lista dei pianeti che rispettano i parametri dell'osservatorio Calina 52

Appendice 4 Dimostrazione dell'approssimabilità dell'angolo α e β 54

Appendice 5 Programma Muniwin per l'analisi dei dati 56

Fonti 59
Bibliografia 59
Sitografia 60
Immagini 60

Introduzione

L'oggetto di questo lavoro è l'osservazione di esopianeti (pianeti che non fanno parte del nostro sistema solare) e il calcolo di alcuni dei parametri fondamentali per caratterizzarli. Il metodo utilizzato per osservare questi pianeti è quello del transito, un metodo di osservazione indiretta. Questo metodo funziona grazie ad un eclissi parziale della stella quando il pianeta si trova tra quest'ultima e la Terra. Ciò che si misura è quindi una diminuzione di luminosità della stella ospitante. Creando un grafico di luminosità in funzione del tempo si crea una curva caratteristica dei transiti di esopianeti. Tramite questo metodo si è in grado di calcolare il raggio del pianeta, il suo periodo, il parametro d'impatto (*b*), il semiasse maggiore dell'orbita del pianeta e la sua inclinazione.
La struttura della ricerca è suddivisa essenzialmente in due parti. Si parte da una parte teorica per arrivare ad un'analisi pratica, in modo tale da passare dal generale al puntuale. Nel primo capitolo viene spiegato il concetto, importante per gli esopianeti, di "fascia di abitabilità" e viene poi presentato il progetto Kepler (NASA) che ha tra i suoi obiettivi quello di trovare pianeti all'interno di questa fascia. Nello stesso capitolo vengono presentati anche dei casi di combinazioni particolari di più esopianeti. Nel secondo capitolo vengono invece presentati i principali metodi di osservazione di esopianeti: rilevazione diretta, spettroscopia Doppler, astrometria, microlente gravitazionale e transito. Il terzo capitolo è invece dedicato al telescopio utilizzato per effettuare le osservazioni (telescopio Newton) ed alle coordinate celesti. Nel quarto capitolo vengono presentati i principali fattori (generali e personali) che bisogna tenere in considerazione quando si vuole effettuare la misurazione di un transito (es. limiti dovuti al luogo, al telescopio,…). Il quinto capitolo è dedicato alla derivazione e spiegazione delle equazioni che verranno poi utilizzate nel capitolo 7 per trovare alcuni parametri del pianeta (raggio e orbita del pianeta, parametro d'impatto (*b*), semiasse maggiore e inclinazione dell'orbita). Nel capitolo 6 viene invece trattato il problema dell'errore sui dati e quello della massa d'aria. Per concludere nel settimo capitolo vengono fatte le analisi dei dati di 4 pianeti osservati (HAT-P-12b, HAT-P-19b, HAT-P-36b e Wasp-103b).

1. Ricerca attuale

1.1 Fascia di abitabilità

La fascia di abitabilità, chiamata anche zona abitabile, è una zona che deriva dalla combinazione di alcuni componenti indispensabili alla vita. La stella deve trovarsi circa tra i 7 e i 9 kpc dal centro galattico, poiché in questa zona della galassia le stelle hanno un'età compresa tra i 4 e gli 8 miliardi di anni, periodo nel quale vi è la formazione di stelle con l'idonea metallicità per la creazione di pianeti rocciosi nella nostra galassia[(i)].
La zona abitabile è definita dalla presenza di acqua liquida; ciononostante il calcolo preciso di questa zona è complesso. La posizione dipende dalla natura dell'atmosfera del pianeta, come la percentuale di nuvolosità del pianeta, che può aumentare l'albedo (o "bianchezza": radiazione incidente che viene riflessa in tutte le direzioni), come l'effetto serra, la temperatura della superficie di un pianeta o l'energia prodotta dalla stella[(ii)].
L'energia che arriva dalla stella è proporzionale alla sua grandezza e alla distanza dal pianeta alla quale si trova dal pianeta, mentre la temperatura superficiale del pianeta è un insieme di cause tra le quali le principali sono il clima, il calore geocentrico e l'eccentricità dell'orbita. In poche parole il pianeta si deve trovare ad una distanza tale che la temperatura percepita sulla superficie non sia troppo elevata oppure troppo bassa (confronta le immagini in fig.1.1). Ciononostante questo pianeta deve rispettare anche altri parametri per poter essere abitabile, si veda appendice 1 (Callejas et al., 2014).

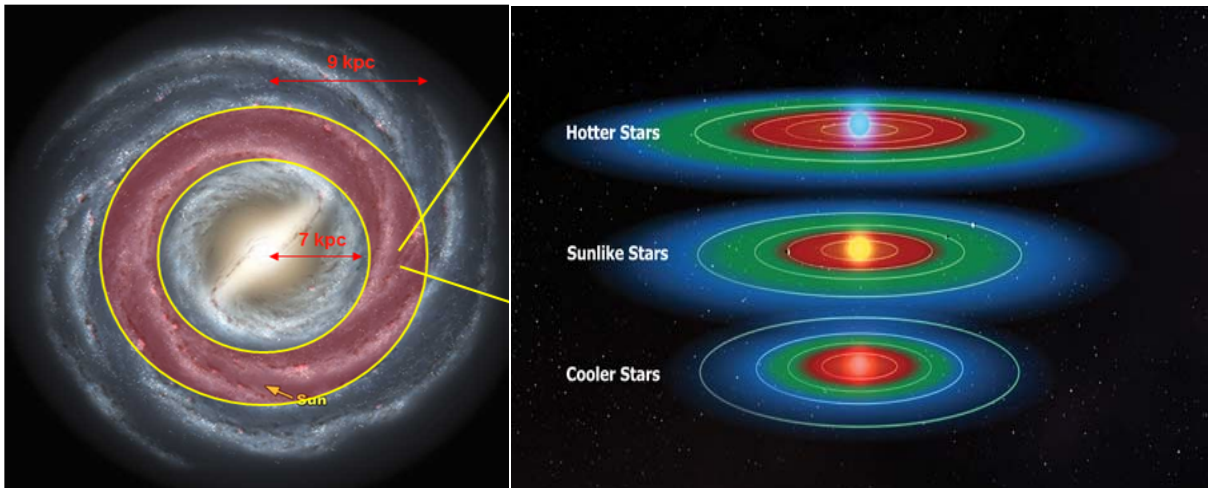

Fig.1.1 *A sinistra la zona galattica abitabile nella nostra galassia (le due circonferenze sono i limiti della zona). A destra la zona abitabile in un sistema solare con tre tipologie di stelle differenti (Credito: R. Mark Elowitz e NASA).*

1.2 Il telescopio Kepler

Lo scopo di questa missione è quella di esplorare la struttura e la varietà dei sistemi planetari e di misurarne grandezza dell'orbita, massa, raggio e densità. Viene soprattutto cercata la percentuale di pianeti nella zona abitabile, dove è possibile trovare acqua liquida e dunque la vita[(iii)]. Considerando che uno degli scopi della missione è quello di trovare pianeti nella zona abitabile che ruotano attorno a stelle come il Sole, l'intervallo di tempo fra due transiti di questi pianeti è simile a quello della Terra. Per certificare la presenza di un pianeta e calcolarne i suoi parametri si necessita di almeno quattro transiti. Per questo motivo, la durata minima della missione è di tre anni e mezzo. Se la missione Kepler continuasse più a lungo, essa sarebbe in

grado di trovare pianeti più piccoli e più distanti dalla Terra. Il telescopio Kepler è un telescopio con un diametro di 0,95 m.
Kepler ha un campo visivo enorme (105 gradi quadrati) rispetto agli altri telescopi astronomici, che possiedono in media un campo visivo di meno di un grado quadrato. Questa area è comparabile all'area di un pugno con il braccio teso puntato verso il cielo. Kepler necessita un campo visivo molto grande per poter misurare continuamente e contemporaneamente la luminosità di più di 100'000 stelle (le stelle nel campo visivo sono più di 500'000, ma solo 100'000 sono utili a Kepler).

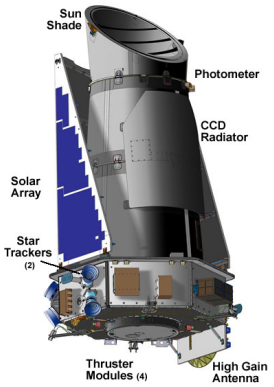

Fig.1.2 *Il telescopio Kepler della NASA che osserva transiti di esopianeti (Credito: NASA).*

Siccome i transiti di pianeti possono durare anche solo poche ore il telescopio deve monitorare continuamente tutte le stelle. Per questo Kepler non orbita intorno alla Terra ma intorno al Sole, con un'orbita molto simile a quella della Terra (vedi figura 1.3).

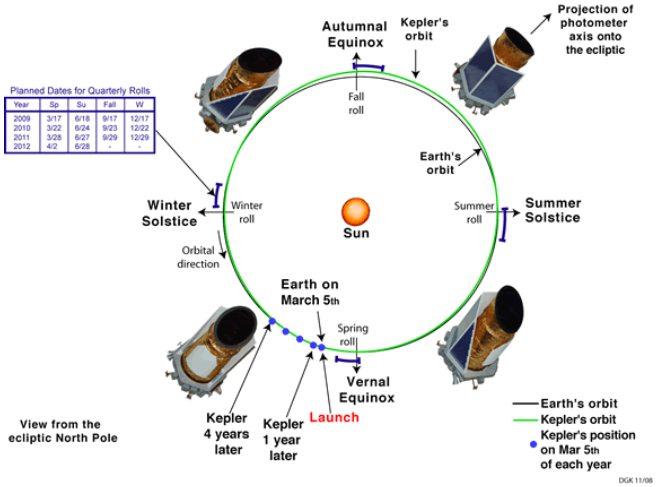

Fig.1.3 *Orbita di Kepler attorno al Sole. Grazie a questa orbita la zona osservata dal telescopio non è mai coperta dalla Terra (Credito: NASA).*

In questo modo la zona osservata non è mai coperta dalla Terra. Inoltre questa zona è stata scelta molto lontana dall'eclittica, così che la luce del sole non entri mai nel fotometro del telescopio, compromettendo i dati. La zona che è stata scelta si trova tra la costellazione del Cigno, della Lira e del Dragone (vedi figura 1.4).

Fig.1.4 *Porzione di cielo osservata da Kepler (Credito: NASA).*

La missione spaziale Kepler, il 23 luglio 2015, ha confermato, tramite il metodo del transito primario (Quintana et al., 2014), il primo pianeta di dimensione simile alla Terra e situato all'interno della zona abitabile.
Paul Hertz, direttore della divisione di astrofisica della NASA, disse riguardo a questa scoperta: "La scoperta di Kepler-186f è un passo significativo nella scoperta di pianeti come il nostro pianeta Terra", ce proseguì dicendo che si continuerà nella ricerca di esopianeti, cercando di determinarne anche la composizione atmosferica, il tutto per trovare il pianeta più simile alla Terra.
Kepler-186 si trova a circa 500 anni luce dalla Terra, nella costellazione del Cigno. In questo sistema vi sono altri 4 pianeti e la stella è classificata come nana rossa (come circa il 70 % delle stelle della nostra galassia).

Kepler-186f	
Semiasse maggiore	0,432 (± 0,171) AU
Periodo orbitale	129,9459 (± 0,0013) giorni
Raggio del paineta	1,17 (± 0,08) R_{Terra}

Tabella 1 *Parametri conosciuti per adesso di Kepler-186f, ricavati da NASA Exoplanet Archive.*

Come si può notare dalla tabella (dati ricavati da NASA Exoplanet Archive) soprastante, mancano ancora molti dati, principalmente la composizione, la massa, due dati questi ultimi molto rilevanti, poiché necessari per definire se il pianeta può ospitare vita o meno.[iv]

1.3 Combinazioni particolari

Stefano Meschieri, del McDonald Observatory dell'Università di Austin (Texas, USA), disse: "Noi non possiamo sapere/immaginare della diversità e della configurazione di esopianeti fin quando non li osserviamo."
Alcuni esopianeti sono molto diversi dalla Terra e quindi da come siamo soliti pensare debba essere un pianeta. Le cinque combinazioni che verranno illustrate qui di seguito si differenziano per forma, composizione/grandezza e orbite (figura 1.5); esse sono puramente delle ipotesi: infatti non sono ancora stati scoperti sistemi planetari con queste caratteristiche. La formazione dei pianeti è causata da un insieme di polveri che circondano una stella, formando un disco proto planetario. Se alcuni detriti dovessero eccedere nella formazione di un pianeta, questi potrebbero formare una Luna.
Molti modelli relativi alla formazione della nostra Luna mostrano la possibilità che un corpo, denominato Theia, si sia schiantato sulla Terra primordiale, scavandone così del materiale che si sarebbe poi aggregato a formare la Luna. Grazie a questo modello è possibile spiegare il primo dei cinque esempi rappresentati in figura 1.5, cioè un sistema binario di corpi planetari. Si pensa che, nel caso di un impatto meno potente, i due corpi risultanti possano avere dimensioni simili, influenzandosi gravitazionalmente a vicenda e creando una sorta di epiciclo (nel quale orbitano entrambi) perpendicolare all'orbita attorno alla stella.
Un'altra combinazione possibile è che più pianeti condividano la stessa orbita, come succede per gli asteroidi Troiani, che condividono l'orbita con i pianeti. Sarebbe possibile scoprire questo tipo di esopaneti usando il metodo del transito, descritto nel prossimo paragrafo. Una scoperta di questo tipo capovolgerebbe l'idea corrente che i pianeti debbano mantenere i loro "cortili" orbitali liberi da altri corpi delle stesse dimensioni. Oltre a ciò, se questi pianeti si dovessero trovare nella zona abitabile, allora vi sarebbe un possibile e significativo scambio di pezzi di "materiale genetico", dovuto a impatti di meteoriti, creando così persino una "impollinazione incrociata".
Le "stranezze" non si trovano solo nella disposizione orbitale dei pianeti, ma anche nella forma planetaria: un esempio è il pianeta gigante e gassoso WASP-12b, che orbita così vicino alla sua stella da essere stato deformato assumendo una forma ovale.
Nell'osservazione di esopianeti è possibile trovare pianeti come Giove o Nettuno in orbite molto vicine alla stella: questo fenomeno è dovuto all'effetto chiamato migrazione. Un pianeta di queste dimensioni non può infatti formarsi a questa distanza, perciò si deve formare lontano e poi migrare verso la stella.
Sono sostanzialmente due i tipi di pianeti soggetti a migrazione che rivestono un interesse per gli astronomi e sono rilevabili scientificamente. Il primo è costituito dagli HECs (nuclei abitabili evaporati), che migrano verso zone più calde e abitabili. Questi pianeti, simili a Nettuno, presentano un nucleo roccioso con possibile presenza di ghiaccio, che, sciogliendosi a causa delle temperature più elevate, può formare acqua e permettere la formazione di un'atmosfera, permettendo così la vita. Il secondo tipo, pianeti simili a Giove (definiti ctoni[1]), avvicinandosi alla stella "perdono" il gas, permettendo di osservare il nucleo roccioso di questi pianeti giganti. Gli studi che si possono effettuare su questi pianeti permettono di avere una prova della teoria dei pianeti Ctonie. Per esempio, il pianeta WASP-12b, oltre che avere una forma ovoidale, potrebbe essere in una fase evolutiva tipica di questi pianeti Ctonie.
Infine esiste la possibilità che un pianeta si trovi ad orbitare attorno ad un asse di un sistema binario di due stelle: in questo caso si formerebbe un'orbita non circolare, bensì a forma di cono. Malgrado la forma orbitale strana, questo sistema sarebbe stabile. Si pensa che sia possibile l'esistenza di un pianeta che si trovi tra due stelle nane: il sistema Kepler-16, a 200 anni luce dalla Terra (Hadhazy, 2015).

[1] La denominazione di pianeti ctoni deriva dalle divinità sotterranee greche (come Ade). In astronomia viene utilizzato questo attributo per definire i pianeti giganti gassosi (ovvero dei Giove caldi), che hanno perso la loro tipica atmosfera a base di idrogeno e di elio a causa della loro vicinanza alla stella (Hébrard, 2003).

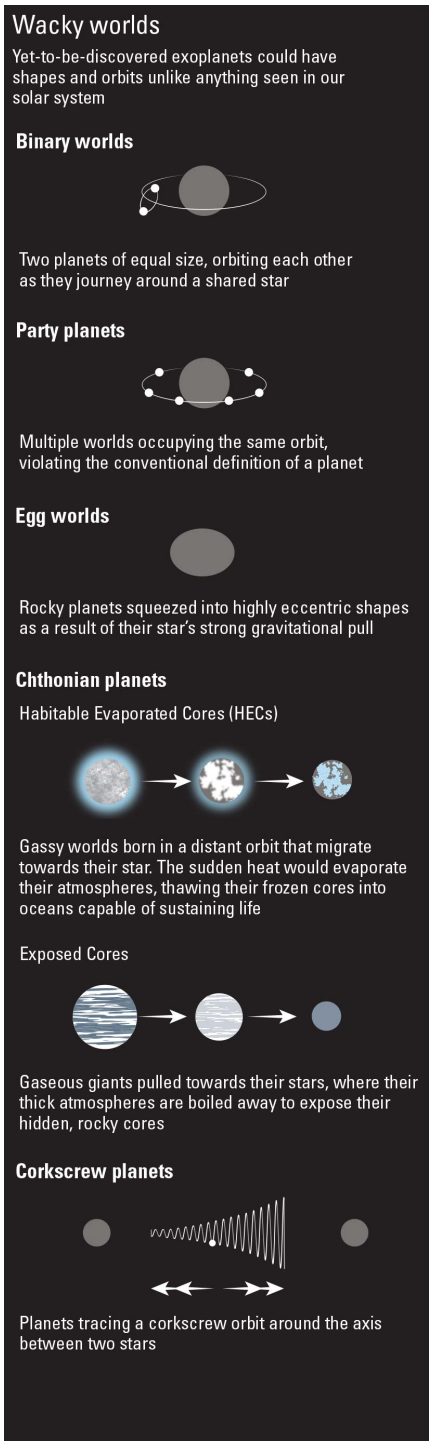

Fig.1.5 *Rappresentazioni grafiche delle cinque tipologie di combinazioni particolari (Credito: Hadhazy).*

2. Metodi di osservazione di esopianeti

Nella ricerca di esopianeti si utilizzano principalmente cinque metodi, che si distinguono in due categorie: il metodo diretto e i metodi indiretti. Il primo si basa sull'osservazioni del pianeta, mentre gli altri quattro sfruttano il movimento della stella ospite o l'effetto luminoso. [v] L'astrometria e la spettroscopia doppler (o anche velocità radiale, RV nello schema) utilizzano il movimento della stella, mentre la microlente gravitazionale e il transito utilizzano la luminosità per la rilevazione di esopianeti. (vedi figura 2.1a), Rudy (2004). [vi][vii]
In questo capitolo ci concentreremo soprattutto sul metodo della spettroscopia doppler e quello del transito, essendo quest'ultimi i metodi con i quali si sono trovati più esopianeti (vedi figura 2.1b), per approfondire in seguito il metodo utilizzato per la redazione di questo lavoro, ovvero il transito (Seager, 2010). [viii][ix][x]

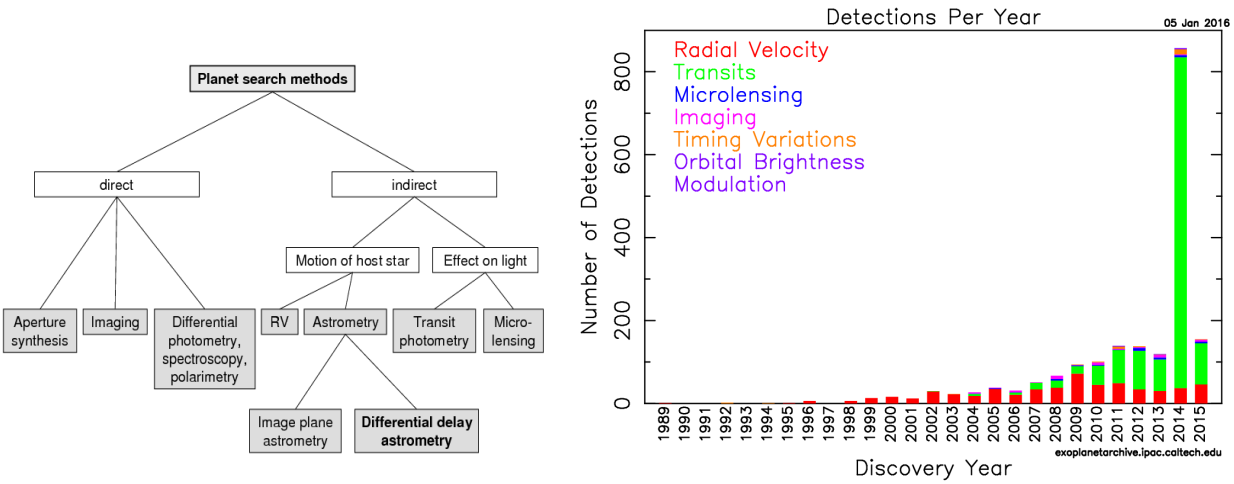

Fig.2.1 *(a)Visione schematica dei vari metodi di ricerca di esopianeti (Credito: Ralph Launhardt). (b)Istogramma che rappresenta la quantità di esopianeti scoperti in totale ogni anno (Credito: NASA).*

2.1 Rilevazione diretta

Nel 2004 è stato rilevato il primo esopianeta tramite il metodo della rilevazione diretta (vedi figura 2.2), la stella che ospita questo questo pianeta è 2M1207. Questa osservazione è stata effettuata dall'europeo Very Large Telescope (VLT) dell'ESO (Chauvin et al., 2014). [xi][xii]

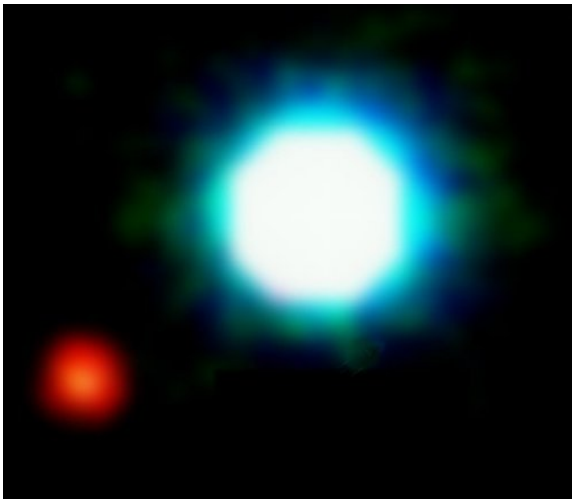

Fig.2.2 *Prima immagine di un esopianeta, osservato* con il VLT (*Chauvin et al., 2014), immagine modificata rispetto l'originale: tolte le distanze (Credito: ESO).*

2.1.1 Tecnica

Il metodo della rilevazione diretta, è estremamente difficile da attuare, poiché la luce emessa dalla stella è molto maggiore rispetto a quella emessa dal pianeta stesso. Allo scopo di riuscire a superare questa difficoltà si utilizzano due sistemi (Seager; Traub, 2010). Il primo, denominato coronografia, utilizza uno scudo che blocca la luce della stella e perciò rende meglio visibile il pianeta e la sua orbita (vedi figura 2.3a). Il secondo, interferometrico, permette di combinare la luce emessa dalla stella ossevata, ricevuta da due o più telescopi, e di annullarla, ritardando di mezza lunghezza d'onda quella ricevuta dalla metà degli strumenti. In questo modo si riesce ad osservare esclusivamente la luce emessa dal pianeta, la quale grazie all'inclinazione delle onde (differente rispetto a quelle della stella) presenta già un ritardo, che, sommandosi a quello immesso artificialmente, amplifica la luce ricevuta (vedi figura 2.3b).[xiii]

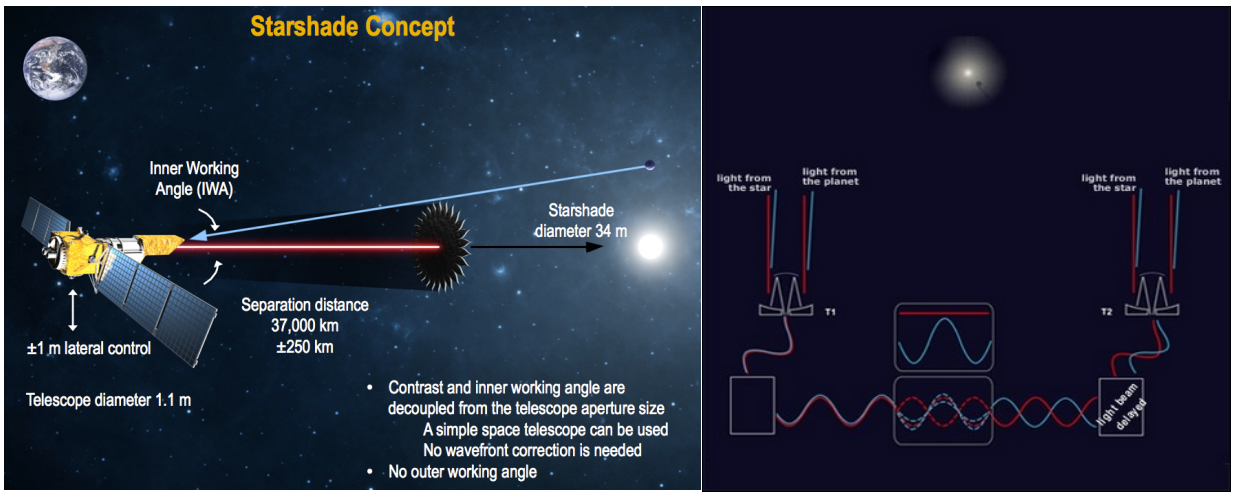

Fig.2.3 *(a)Lo Starshade della NASA. Lo scudo di 34 metri di diametro si troverà a una distanza di 37000 km dal rispettivo telescopio spaziale, avente un diametro di 1,1 metri. Questo scudo a forma di fiore dovrà oscurare la luce emessa dalla stella ospitante, rendendo più facile la visione del pianeta orbitante attorno ad essa (Credito: NASA). (b) L'annullamento delle onde tramite il metodo dell'interferometria: le linee rosse corrispondo alla luce emessa dalla stella, le quali vengono ricombinate ed annullate mediante un ritardo di trasmissione di uno dei telescopio, (linea rossa diritta rappresenta l'annullamento). La luce del pianeta (linee blu), arriva ai telescopi con un angolo (Credito: ESA).*

2.1.2 Programmi di ricerca

Principalmente si occupano di questo metodo il VLT di ESO e, nei prossimi anni, una missione spaziale che farà uso di uno *starshade* della NASA (vedi Fig.2.3a). La NASA in questa missione ha intenzione di mettere in atto il progetto EXO-S ideato da Vanderbei et al., creato nel 2007, il quale prevede di mandare uno scudo nello spazio a coprire la luce della stella (principio della coronografia). [xiv]

2.2 Spettroscopia Doppler

La spettroscopia Doppler, anche chiamata "misurazione della velocità radiale", è un altro metodo molto usato accanto a quello dei transiti, per individuare pianeti extrasolari. Esso funziona grazie ai cambiamenti Doppler nello spettro della stella osservata, attorno alla quale orbita un pianeta.

2.2.1 Storia

Il primo a proporre questo tipo di metodo fu Otto Struve nel 1952. Esso infatti aveva intuito che con degli spettrografi molto sensibili sarebbe stato possibile osservare piccolissimi spostamenti verso il rosso e verso il blu nelle righe di emissione della stella, dovuti al suo spostamento di allontanamento e avvicinamento rispetto alla terra (Struve, 1952). Purtroppo però la tecnologia del tempo produceva misurazioni della velocità radiale, con errori di più di 1000 m/s, rendendo impossibile l'osservazione di pianeti extrasolari. Si noti infatti che il pianeta Terra causa un cambiamento nella velocità del Sole pari a 0,1 m/s all'anno, mentre un pianeta più grande come Giove causa un cambiamento di circa 13 m/s con un periodo di 12 anni. [(xv)] Durante gli anni ottanta e novanta ci fu un notevole progresso nella tecnologia spettrometrica e questo permise nell'ottobre del 1995 agli astronomi Michel Mayor e Didier Queloz (vedi figura 2.4) di scoprire il pianeta 51 Pegasi b, il primo pianeta extrasolare scoperto utilizzando la spettroscopia Doppler. Si tratta di un pianeta simile a Giove che si trova nella costellazione di Pegasus (Mayor e Queloz, 1995).

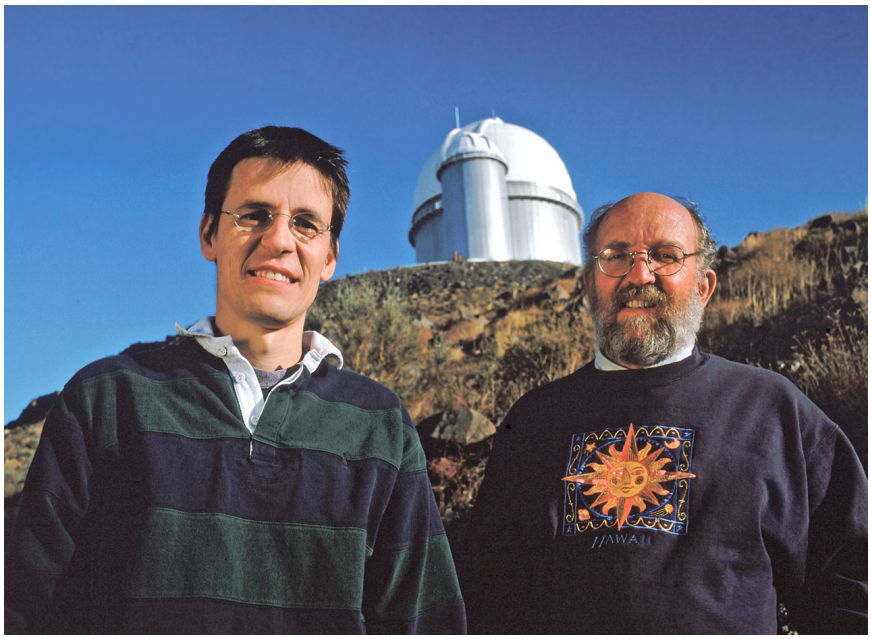

Fig.2.4 *Didier Queloz (a sinistra) e Michel Mayor (a destra) all'osservatorio di La Silla, davanti al telescopio di 3,6 metri di ESO.*

All'inizio degli anni duemila, fu creata una seconda generazione di spettrografi per la ricerca di pianeti extrasolari, che permetteva misurazioni molto più precise delle precedenti. Ad esempio lo spettrografo HARPS (La Silla Observatory, Cile), entrato in funzione nel 2003, è in grado di osservare spostamenti con una precisione di 0,3 m/s. Con questa precisione è possibile osservare pianeti più piccoli e rocciosi, dunque più simili alla Terra (Mayor et al., 2003).

2.2.2 Metodo

Il metodo della velocità radiale si basa sulla legge di gravitazione universale di Isaac Newton. [(xvii)(xviii)]

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2} \qquad \text{[eq.2.1]}$$

Dove F è la forza di attrazione gravitazionale tra m_1 (massa della stella) e m_2 (massa del pianeta), G la costante di gravitazione universale ($6{,}674 \cdot 10^{-11}$ N m^2 kg^{-2}) ed r la distanza tra i centri delle masse.

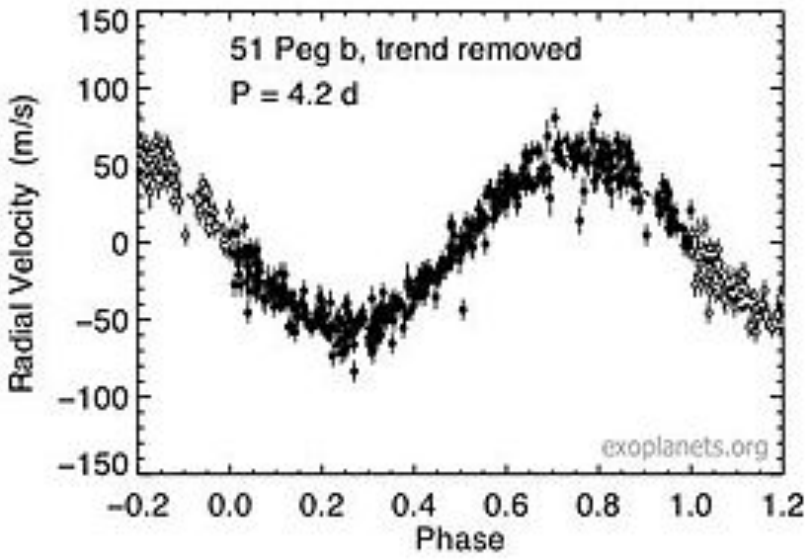

Fig. 2.5 *Grafico della velocità radiale di 51 Pegasi b, la stella si muove in avanti e in dietro e quindi la sua velocità cambia da positiva a negativa (Credito: Mayor e Queloz).*

La stella esercita una forza sul pianeta che le gira attorno (il pianeta orbita grazie a questa forza). Allo stesso modo però, anche il pianeta esercita una forza sulla stella. La forza esercitata sulla stella provoca un suo movimento di essa e l'intento della spettroscopia Doppler è proprio quella di misurare tale movimento. Vengono fatte una serie di osservazioni dello spettro di luce emesso dalla stella e se è presente un pianeta si noteranno delle variazioni periodiche nello spettro. Quando la stella si allontana dalla Terra emette luce con una frequenza più bassa e dunque il suo spettro si sposta verso il rosso, mentre quando si avvicina alla terra la sua frequenza osservata è più alta e il suo spettro si sposta verso il blu (fig.2.6). Questa variazione di frequenza è causata dall'effetto Doppler ed è osservabile solo quando la stella si avvicina o si allontana dalla terra, mentre quando effettua uno spostamento perpendicolare alla linea di vista non è osservabile nessuna variazione dalla Terra.

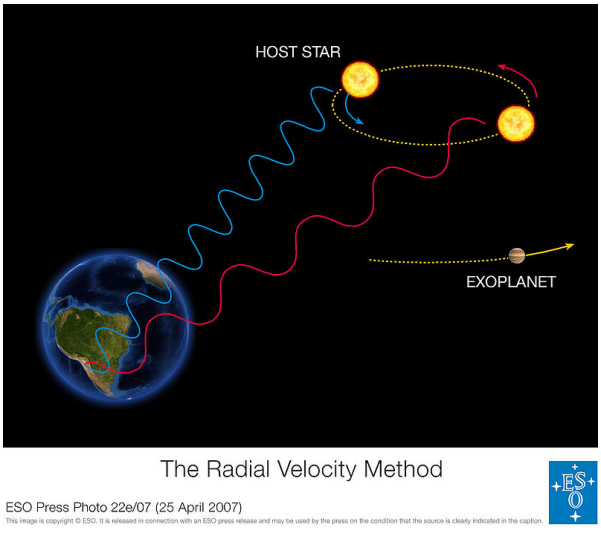

Fig.2.6 *Frequenza che cambia con lo spostarsi della stella (Credito: ESO).*

Con la misura della velocità, si è in grado di ricavare la massa del pianeta che orbita attorno alla stella misurata. Usando la terza legge di Keplero si è in grado di ricavare la distanza tra il centro del pianeta e il centro della stella (r).

$$r^3 = \frac{GM_{\text{stella}}}{4\pi^2} P^2_{\text{pianeta}} \qquad \text{[eq. 2.2]}$$

Dove G è la costante di gravitazione universale, M_{stella} la massa della stella e P_{pianeta} il periodo di rotazione del pianeta intorno alla stella.

Si utilizza ora la formula della forza centripeta

$$F_{\text{cent}} = M_{\text{pianeta}} \frac{v_{\text{pianeta}}^2}{r} \qquad \text{[eq. 2.3]}$$

Dove F_{cent} è la forza esercitata sul pianeta, M_{pianeta} la massa del pianeta, v_{pianeta} la velocità del pianeta e r la distanza tra il centro del pianeta e il centro della stella.

e la legge di gravitazione universale.

$$F = G \frac{m_{\text{stella}} m_{\text{pianeta}}}{r^2} \qquad \text{[eq.2.4]}$$

Unendo le due formule e utilizzando la distanza r trovata in precedenza si può ricavare la velocità del pianeta.

$$v_{\text{pianeta}} = \sqrt{\frac{G m_{\text{stella}}}{r}} \qquad \text{[eq.2.5]}$$

Dove G la costante di gravitazione universale, m_{stella} la massa della stella e r la distanza tra il centro del pianeta e il centro della stella. La quantità di moto p si conserva in un sistema chiuso. Possiamo dunque scrivere la seguente equazione:

$$p_{\text{stella}} = p_{\text{pianeta}} \qquad \text{[eq.2.6]}$$

Essendo la definizione di quantità di moto p=mv possiamo riscrivere la formula nel seguente modo:

$$m_{\text{stella}} v_{\text{stella}} = m_{\text{pianeta}} v_{\text{pianeta}} \qquad \text{[eq.2.7]}$$

Dove v_{stella} è la velocità di rotazione della stella (costante) e v_{pianeta} è la velocità del pianeta trovata con l'equazione 2.5. Così si può ricavare la massa del pianeta.

$$m_{\text{pianeta}} = \frac{m_{\text{stella}} v_{\text{stella}}}{v_{\text{pianeta}}} \qquad \text{[eq.2.8]}$$

Bisogna notare che attraverso il metodo delle velocità radiali non si è in grado di trovare la vera massa del pianeta ma $m_{\text{pianeta}}\sin(i)$. Questo perché, se l'orbita del pianeta non è allineata con la nostra linea di vista, noi non misuriamo la vera velocità della stella ma $v_{\text{stella}}\sin(i)$ (vedi fig.2.7).

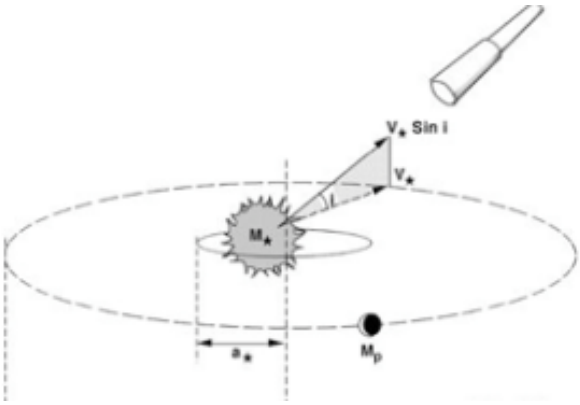

Fig.2.7 *Al centro è rappresentata la stella ed il suo movimento circolare, mentre l'orbita più grande è quella del pianeta (rappresentato in nero). Noi ci troviamo dove c'è il cannocchiale e quindi non misuriamo la vera velocità della stella, in quanto la nostra linea di vista non è allineata con l'orbita del pianeta. Quello che misuriamo è* v_{stella}*sin(i) (credito: St. Andrew).*

Il metodo sopra presentato è una semplificazione che non viene usata in ricerca. In ricerca viene utilizzata l'equazione 2.9, dove *T* è il periodo orbitale, M_{pianeta} è la massa del pianeta, M_{stella} è la massa della stella, *i* è l'inclinazione dell'orbita rispetto alla nostra linea di vista (fig.2.7), *G* è la costante di gravitazione universale e *e* è l'eccentricità dell'orbita (Papaloizou e Terquem, 2000).

$$K = \left(\frac{2\pi G}{T}\right)^{\frac{1}{3}} \frac{M_{\text{pianeta}}\sin(i)}{(M_{\text{pianeta}} + M_{\text{stella}})^{\frac{2}{3}}} \frac{1}{\sqrt{1-e^2}} \qquad \text{[eq.2.9]}$$

K si trova attraverso l'equazione 2.10, dove *v* è la velocità radiale misurata e *f(T)* è una funzione sinusoidale che dipende dal tempo. Se l'orbita del pianeta è circolare l'ampiezza della sinusoidale è unitaria.

$$v = Kf(T) \qquad \text{[eq.2.10]}$$

2.3 Astrometria

Il primo caso confermato tramite questo metodo di rilevamento di esopianeti è HD 176051 b, il 22 ottobre 2010, dal gruppo di lavoro di Palomar High-precision Astrometric Search for Exoplanet Systems, PHASES, (Muterspaugh et. al, 2010).

2.3.1 Tecnica

La tecnica dell'astrometria si basa sul cambiamento della posizione di una determinata stella sulla sfera celeste. Questa oscillazione è dovuta alla forza di gravitata esercitata dal pianeta, il quale muovendosi lungo la sua orbita fa variare la posizione della stella stessa (fig.2.8). Il problema maggiore di questo metodo è che il diametro angolare dello spostamento della stella causato dal pianeta diminuisce con l'aumentare della distanza, rendendo possibile l'osservazione di stelle prossime alla nostra e quindi si restringe il campo di possibili osservazioni. Malgrado questo problema tecnico l'astrometria presenta aspetti con una certa potenzialità, poiché permette di ricavare facilmente tutti i parametri orbitali del pianeta e la massa. Altra potenzialità di questo metodo è la capacità (rispetto alla velocità radiale che non permette di osservare pianeti in orbita perpendicolare alla nostra linea di vista) di scoprire pianeti che provocano oscillazioni della stella in qualsiasi orientamento.[xix]

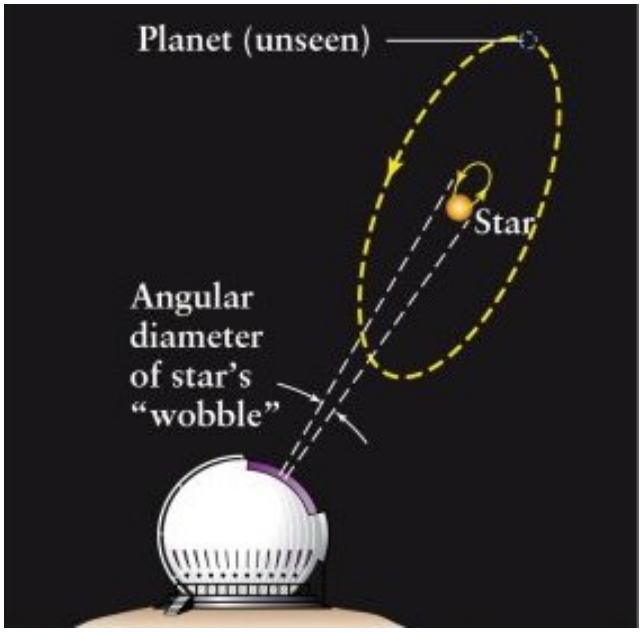

Fig.2.8 *Oscillazione della stella percepita dal telescopio.*

2.3.2 Programmi di ricerca

GAIA (*Global Astrometric Interferometer for Astrophysics*) è il programma spaziale dell'ESA successore della missione Hipparcos (Perryman et al., 1997). Rispetto a Hipparcos, GAIA è 200 volte più precisa e produce 10'000 volte più dati. La missione consiste in una dettagliatissima mappatura della Via Lattea, delle distanze, dei movimenti e cambiamenti di luminosità dei corpi celesti nella nostra galassia. In questo modo essa è in grado di determinare la presenza di esopianeti, stelle nane marroni e asteroidi (fig.2.8). [(xx)]

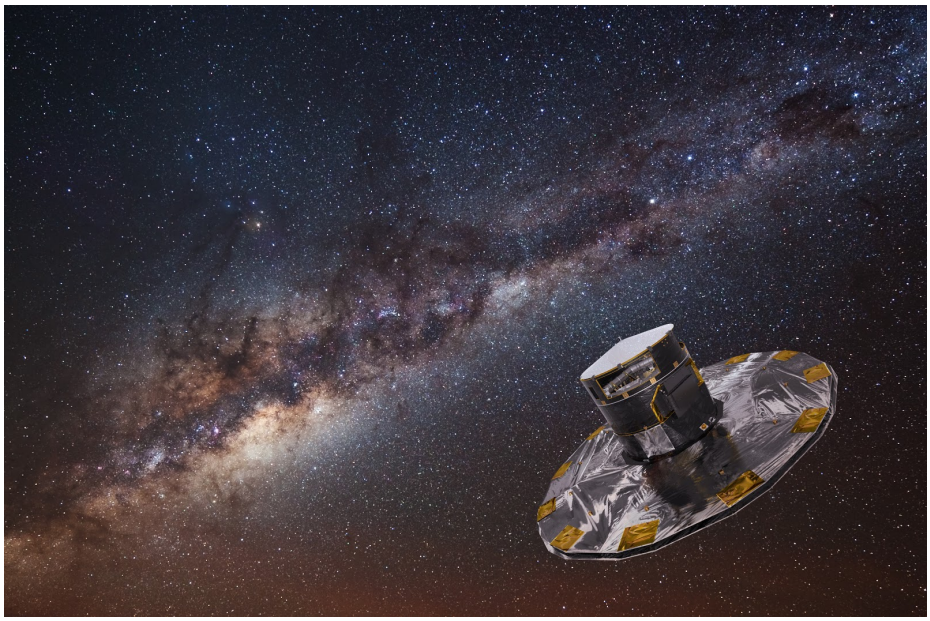

Fig.2.9 *GAIA mentre mappa le stelle della Via Lattea (Credito: ESO).*

2.4 Microlente gravitazionale

Il primo caso di esopianeta determinato utilizzando questa tecnica è denominato OGLE253-MOA53b (Bond et al., 2004). Questo pianeta è stato misurato nell'ambito del progetto OGLE (dell'università di Varsavia) il 22 giugno 2003 e dal progetto MOA (dell'università di Canterbury) il 21 luglio 2003 (fig.2.10).

Fig.2.10 *(a) Osservatorio di Las Campanas in Cile utilizzato dal progetto OGLE (Credito: Università di Varsavia). (b) Osservatorio del Monte John in Nuova Zelanda utilizzato dal progetto MOA (Credito: Università di Canterbury).*

2.4.1 Tecnica

Questo metodo si basa sull'effetto della lente gravitazionale, predetto dalla teoria della relatività generale di Albert Einstein. La lente gravitazionale è causata dalla presenza di un corpo di una certa massa che, piegando lo spazio, devia (come una lente) la luce emessa da altri oggetti più lontani.
Per esempio un corpo è una lente gravitazionale per un'altra stella. Se la stella che causa l'effetto ha un pianeta, anche esso è responsabile di una deviazione della luce (anche se in maniera molto minore, da qui il termine microlente) e di un conseguente aumento della luminosità apparente della stella lontana (Gaudi, Scott, 2010). Quindi il grafico dell'intensità luminosa della stella osservata presenterà due picchi, uno maggiore causato dalla stella-lente e un secondo minore causato dal pianeta-lente, come mostrato nella fig.2.11.
La difficoltà maggiore nell'utilizzo di questo metodo è che la stella responsabile dell'effetto deve essere perfettamente allineata a quella sullo sfondo e ciò accade solo per brevi periodi. [(xxi)] Mentre uno dei vantaggi è che con questo metodo anche pianeti simili alla Terra per dimensione e orbita riescono a essere rilevati.[(xxii)]

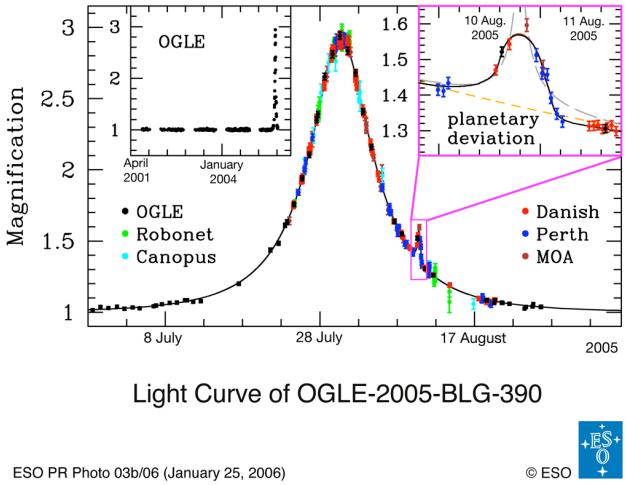

Fig.2.11 *La curva di luce di OGLE-2005-BLG-390 presenta due picchi: quello maggiore (ai primi di agosto) causato dalla stella-lente e quello minore (circa dieci giorni dopo) causato dal pianeta-lente, ovvero il pianeta ospitato dalla stella-lente (Credito: ESO).*

2.4.2 Programmi di ricerca

OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment) è un progetto dell'Università di Varsavia, che utilizza un telescopio di diametro di 1,3 metri si trova all'osservatorio di Las Campanas in Cile. MOA (Microlensing Observations in Astrophysics) è un progetto dell'Università di Canterbury, che usa un telescopio di diametro 0,6 metri si trova all'osservatorio del Monte John in Nuova Zelanda.

2.5 Transito

Il metodo del transito, utilizzato per determinare la presenza di esopianeti (adoperato anche in questa ricerca) non si basa sull'oscillazione della stella come nelle due tecniche spiegate in precedenza, bensì sulla luminosità apparente osservata.[xxiii]Quando un pianeta transita davanti alla sua stella provoca un calo apparente della luminosità della stella (fig. 2.12). Questo metodo prevede di analizzare i vari parametri relativi alla stella e alla sua orbita utilizzando dati ricavati dalla luminosità della stella. [xxiv]

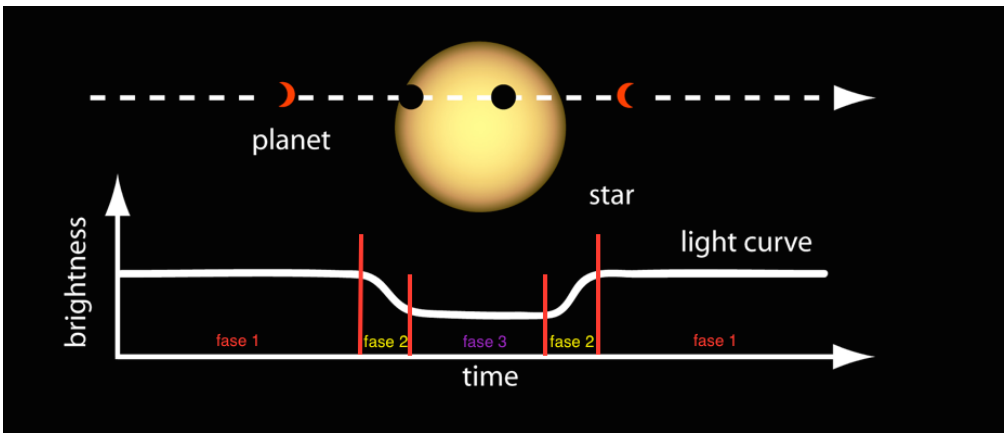

Fig.2.12 *Rappresentazione grafica della tecnica del transito. Come si può notare nella figura, la luminosità della stella ha tre fasi ben distinte di luminosità. La prima fase, nella quale la luminosità apparente della stella è maggiore e indica che non vi è un transito. La seconda, che è la diminuzione/aumento della luminosità ed è la fase in cui il pianeta inizia o finisce di sovrapporsi alla stella. La terza fase, nella quale il pianeta si trova completamente davanti alla stella e causa un periodo nel quale la luminosità apparente della stella è minore (Credito: NASA).*

2.5.1 Storia

Nella storia dell'astronomia il metodo del transito ha basi molto antiche, in quanto inizialmente utilizzato per osservare i passaggi di pianeti davanti al Sole (per esempio Venere).[xxv] Johannes Kepler fu il primo a ipotizzare (nel 1629) un'eclissi solare dovuta a Venere; egli calcolò che essa dovesse avvenire il 7 dicembre 1631, ma in Europa nessuno riuscì a vederla, poiché i calcoli di Kepler non furono abbastanza precisi da capire che la suddetta eclissi avrebbe dovuto essere osservata più a oriente (Asia centrale, meridionale e Africa orientale).[xxvi]
Fu così che il primo ad osservare un'eclissi solare dovuta al transito di Venere fu Jeremiah Horrocks nel 1639, il quale, rifacendo i calcoli, riuscì a capire che sarebbe stato possibile osservare questa eclissi il 4 dicembre 1639.
Questo metodo venne utilizzato per la prima volta il 3 novembre 1999, per osservare la stella HD 209458 (Charbonneau et al., 1999). Charbonneau e il suo team notarono che questa stella presentava delle variazioni di velocità radiale. Per stabilire che ciò fosse causato dalla presenza di un pianeta e non da una qualche variabilità della stella, decisero di adottare il metodo del transito per verificare un calo di luminosità durante l'eclissi.
Il primo caso di un esopianeta trovato tramite il metodo del transito risale al 3 novembre 2002 e fu confermato tramite velocità radiale il 6 gennaio dell'anno successivo: si tratta di OGLE-TR-56b, pianeta del sistema planetario della stella OGLE-TR-56 (Konacki et al., 2003).
Dimitar D. Sasselov, astronomo di Harvard e capo squadra della CfA, si espresse in questi termini riguardo alla scoperta fatta: *"We stand on the threshold of a new era of exploration and discovery. It only happens once in the history of an intelligent species and we are closing in on it, as in the Golden Age of Exploration in the 16th century, we have found a better way to detect new worlds in our own Milky Way galaxy that paves the way for future planetary discoveries."*

2.5.2 Vantaggi e svantaggi

Questo metodo permette di ottenere il raggio del pianeta, studiare l'atmosfera planetaria e misurare la temperatura del pianeta. Ma esso presenta anche due grossi svantaggi, 1) il sistema deve essere quasi perfettamente allineato con la linea di vista dell'osservatore, 2) il transito deve essere confermato da un altro metodo (generalmente il metodo della velocità radiale), poiché vi è il rischio di false rilevazioni.

CHEOPS (CHaracterizing ExOPlanet Satellite) sarà la prima missione dedita alla ricerca di transiti e utilizzerà strumenti tali da poter avere un'ottima precisione fotometrica per l'osservazione di stelle che ospitano pianeti (già note). Grazie alla sua capacità di osservare quasi qualsiasi punto del cielo, CHEOPS potrà fornire un'accurata determinazione dei raggi planetari, per pianeti dei quali si conosce già la massa.[xxvii]
I principali obiettivi della missione saranno quelli di studiare la struttura degli esopianeti con raggio compreso da 1 a 6 volte quello della Terra. Sulla base delle informazioni ottenute (massa, raggio) si vorrebbero fissare nuovi vincoli per quanto concerne la struttura, la formazione e l'evoluzione dei pianeti in questo intervallo di massa di raggio o di massa?. In particolare CHEOPS vorrebbe:

- determinare la relazione tra massa e raggio;
- sondare l'atmosfera dei pianeti gioviani caldi, studiando i meccanismi fisici e l'efficienza del trasporto dell'energia dal lato diurno e quello notturno;
- fornire obiettivi univoci per le future ricerche spettroscopiche (con telescopi come: ELT o ECHO e JWST);
- offrire il 10% del tempo di apertura alla comunità scientifica;
- identificare pianeti con atmosfere significative in funzione della relativa massa, distanza della stella e parametri stellari;
- trovare se vi sono luoghi vincolanti nei percorsi di migrazione dei pianeti.

3. Telescopio e osservazioni

3.1 Coordinate celesti equatoriali

Le coordinate celesti equatoriali sono coordinate che rimangono fisse per qualunque posto ci si trovi sulla superficie terrestre. Questo sistema di coordinate si basa sul concetto di sfera celeste, una sfera di raggio infinito che circonda la Terra. La sfera viene divisa con lo stesso sistema usato sulla Terra in linee orizzontali e in verticali. Si ottengono cosi i corrispondenti celesti dei meridiani e dei paralleli.

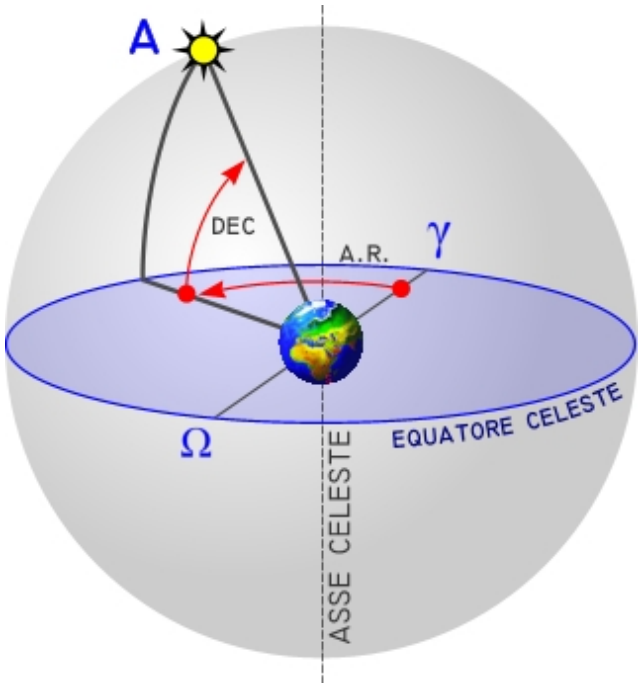

Fig. 3.1 *Sfera celeste (grigio), declinazione indicata come DEC e ascensione retta indicata come A.R, entrambe indicate da frecce rosse.*

Declinazione (DE)

La declinazione è il corrispondente dei paralleli. L'equatore celeste (cioè il punto che si trova a 0°) è una continuazione dell'equatore terrestre ed è perpendicolare all'asse terrestre. Il polo nord e il polo sud celesti (rispettivamente +90° e -90°) si trovano esattamente sopra quelli terrestri. La declinazione è misurata in gradi e va da +90° a -90°. La misura della declinazione è indicata nella figura 3.1 dalla linea rossa.

Ascensione retta (RA)

L'ascensione retta è il corrispondente dei meridiani. Cambia però, rispetto al sistema terrestre, la posizione arbitraria del punto zero (Greenwich per il sistema terrestre). Il punto zero del sistema di coordinate celesti si chiama punto vernale e si trova in una delle due intersezioni tra l'equatore celeste e l'eclittica (percorso apparente che compie il Sole in un anno sulla sfera celeste), come si vede nella figura 3.2. Quando il Sole passa per il punto vernale la Terra viene a trovarsi nell'equinozio di primavera. L'ascensione retta è misurata in ore e va da 0 a 24 ore. Un'ora corrisponde a 13°. La misura dell'ascensione retta è indicata nella figura 3.1 dalla linea blu.

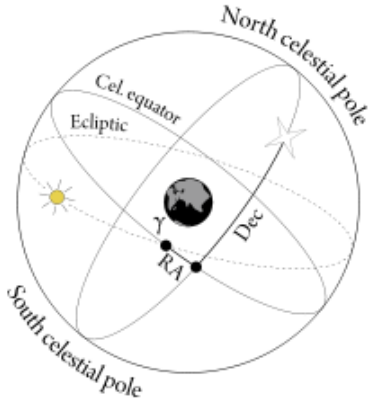

Fig.3.2 *Punto vernale, intersezione tra l'eclittica e l'equatore celeste (Credito: Joshua Cesa).*

3.2 Telescopio

Il telescopio utilizzato per effettuare le osservazioni all'osservatorio di Carona ha una configurazione ottica Newton.[(xxxiii)] Si tratta dunque di un telescopio riflettore. Come si vede nella figura 3.3 la luce entra da davanti e viene riflessa da un primo specchio chiamato "specchio primario". Viene poi riflessa dallo specchio secondario che la riflette verso l'oculare. Il sensore che registra l'immagine si trova al posto dell'oculare.

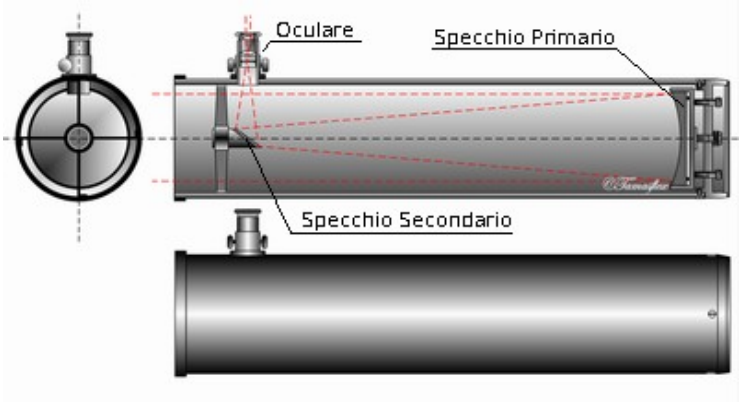

Fig.3.3 *Funzionamento del telescopio con configurazione ottica Newton. La luce entra da davanti e viene riflessa dallo specchio primario, poi viene riflessa dallo specchio primario ed arriva all'oculare, dove si trova il* sensore *(Credito: Fulvio Mete).*

Il diametro del telescopio (potenza) è di 305mm, mentre la focale è di 1500 mm. Dunque il rapporto fra la focale e il diametro (rapporto focale) è 5. Si tratta di un telescopio che, a parità di tempo di esposizione, grazie al rapporto focale basso è in grado di raccogliere più luce rispetto ad un telescopio con un rapporto focale alto (f/10 , F/12;…). L'asse su cui è poggiato il telescopio è puntato a nord ed è parallelo all'asse terrestre. L'inclinazione dell'asse equivale alla latitudine del luogo in cui ci si trova (nel caso specifico ha un'inclinazione di 45°). Questo modo di montare il telescopio è molto utile per l'inseguimento dell'oggetto osservato nel corso della notte: in questo modo, una volta puntato l'oggetto, la declinazione non viene più modificata e dunque l'oggetto viene seguito solo modificando l'ascensione retta. L'unico movimento che deve effettuare telescopio è una rotazione attorno all'asse. Per trovare la spiegazione completa su come utilizzare e impostare il telescopio di Carona per osservare esopianeti si consulti l'appendice 2.

4. Osservabilità di un transito

Limiti dovuti all'orbita

Per essere osservato dalla Terra il pianeta deve avere un'orbita allineata con la nostra linea di vista (fig.4.1), in modo da eclissare la stella. Se, rispetto alla Terra, il pianeta ha un'orbita perpendicolare alla linea di vista (fig.4.2) esso non eclissa la stella e dunque non può venir osservato dalla Terra. L'orbita può avere un'inclinazione (i) rispetto alla nostra linea di vista, ma questa inclinazione deve rispettare la relazione:

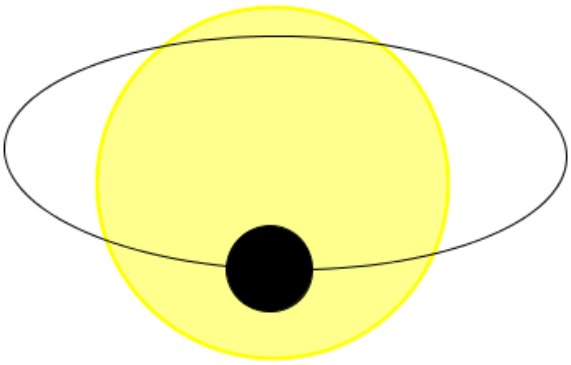

Fig.4.1 *Orbita orizzontale osservabile.*

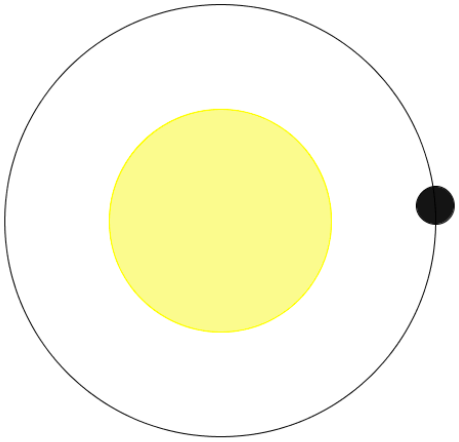

Fig.4.2 *Orbita verticale non osservabile.*

$$a\cos i \leq R_{\text{stella}} + R_{\text{pianeta}} \qquad \text{[eq. 4.1]}$$

I parametri utilizzati nell'equazione 4.1 sono quelli rappresentati nelle figura 4.3.

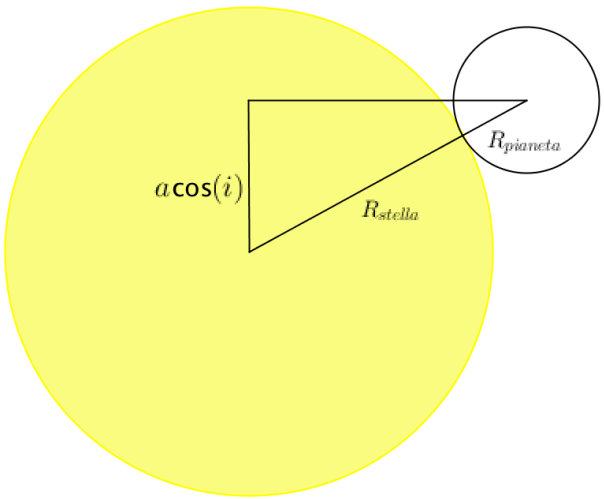

Fig.4.3 *Raffigurazione dei tre parametri dell'equazione 4.1.*

La probabilità che un pianeta abbia un'orbita osservabile dalla terra è pari al rapporto tra il diametro della stella e il diametro dell'orbita. Per pianeti come la Terra che orbitano attorno a stelle come il Sole questo valore è pari a 0,5%.

Limiti dovuti all'atmosfera terrestre

L'atmosfera è un grande problema per l'osservazione di esopianeti con il metodo del transito. Infatti la differenza di luminosità della stella durante un transito è difficilmente osservabile. In più, l'atmosfera assorbe molta della luminosità e perciò la misura è ancora più difficile ed è impossibile l'osservazione di pianeti piccoli o di stelle poco luminose. Per questo sono state create missioni come la missione Kepler, che utilizzano telescopi spaziali per cercare esopianeti. Per saperne di più si consulti il capitolo sulla massa d'aria e quello sulla missione Kepler.

Limiti dovuti al telescopio

Per le nostre osservazioni abbiamo utilizzato il telescopio dell'osservatorio *Calina* di Carona. Questo telescopio è in grado di individuare transiti solo in alcune condizioni. La luminosità della stella deve essere minore o uguale a 14 mag e la profondità del transito deve essere maggiore o uguale a 15 milli magnitudine (mmag). Transiti con profondità minori non sono visualizzabili con la caratteristica curva, perché la diffusione dei punti dovuta all'imprecisione dell'osservazione sarebbe uguale o superiore alla profondità del transito. Questi parametri hanno permesso di creare una lista di pianeti osservabili dall'osservatorio di Carona. Sono stati ad esempio eliminati dalla lista totale degli esopianeti tutti i pianeti scoperti dal telescopio spaziale Kepler, perché non osservabili. Si veda appendice 3.

Limiti dovuti alle condizioni atmosferiche

Osservando dalla terra occorre tenere in considerazione le condizioni atmosferiche prima di iniziare la rilevazione. Infatti per poter esaminare le diminuzioni di luminosità così piccole il cielo non deve essere coperto da nessuna nuvola, che altererebbe completamente i dati misurati.
Bisogna perciò informarsi sulle condizioni metereologiche durante tutto l'arco della notte, in più bisogna tenere in considerazioni fattori come il vento, che rendono le condizioni metereologiche più instabili.

Limiti dovuti al luogo

Per osservare il transito di un esopianeta bisogna anche tenere conto del paesaggio che circonda l'osservatorio. Bisogna infatti fare attenzione ad eventuali oggetti (ad es. alberi, case, montagne,…) che potrebbero coprire il transito e dunque rendere impossibile l'osservazione. Nel caso dell'osservatorio *Calina* di Carona ci si trova in un ambiente montagnoso, dunque occorre fare attenzione che il transito non sia nascosto da una delle montagne. In più vi è un grande pino molto vicino all'osservatorio che copre una parte di cielo ed è capitato durante le nostre osservazioni che la stella osservata venisse coperta.

Limiti dovuti alla tempistica

Un altro parametro che bisogna tenere in considerazione è la durata del transito e verificare quando quest'ultimo si verifica nell'arco della notte. Infatti transiti che durano più di una notte non sono osservabili, in quanto si possono raccogliere dati solo durante la notte e quindi non si riuscirebbe ad analizzare il passaggio del pianeta per intero. Per lo stesso motivo bisogna anche controllare che questo inizi e finisca durante la notte.

5. Analisi dei dati di osservazione

5.1 Derivazione delle formule per l'analisi dei dati

Quando un esopianeta passa davanti alla sua stella ospitante una parte della luce viene bloccata e dunque dalla Terra si può osservare una diminuzione della luminosità apparente. Il cambiamento della luminosità dipende sia dal raggio della stella (R_{stella}) sia dal raggio del pianeta (R_{pianeta}). La formula seguente descrive il cambiamento di luminosità della stella misurato dalla terra.

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{R^2_{\text{pianeta}}}{R^2_{\text{stella}}} \qquad \text{[eq.5.1]}$$

Dove F è il flusso di luminosita della stella senza transito, ΔF è la differenza di flusso, R_{pianeta} è il raggio del pianeta e R_{stella} è il raggio della stella (Seager, Mallén-Orlnelas, 2003; Odunlade, 2010).

Il rapporto $\Delta F / F$ viene chamato δ:

$$\delta = \frac{R^2_{\text{pianeta}}}{R^2_{\text{stella}}} \qquad \text{[eq.5.2]}$$

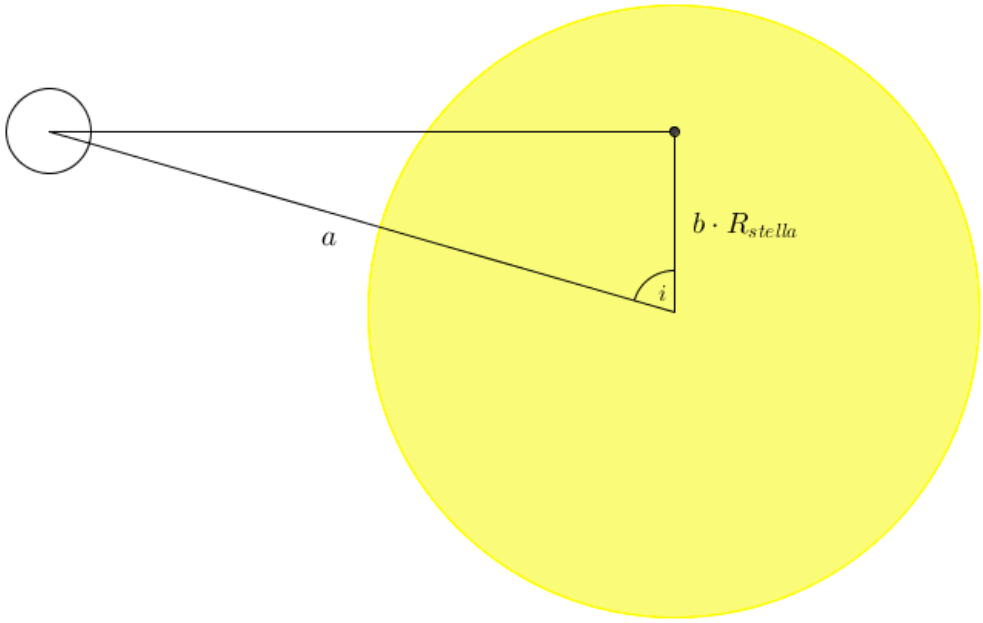

Fig.5.1 *In questa figura sono rappresentati il semiasse maggiore dell'orbita del pianeta (a) e il parametro b normalizzato con il raggio della stella (*R_{stella}*). Osservando l'immagine in due dimensioni il pianeta si trova nel punto in cui è più lontano dalla stella.*

Attraverso la trigonometria si può ricavare questa formula:

$$b = \frac{a\cos(i)}{R_{\text{stella}}} \qquad \text{[eq. 5.3]}$$

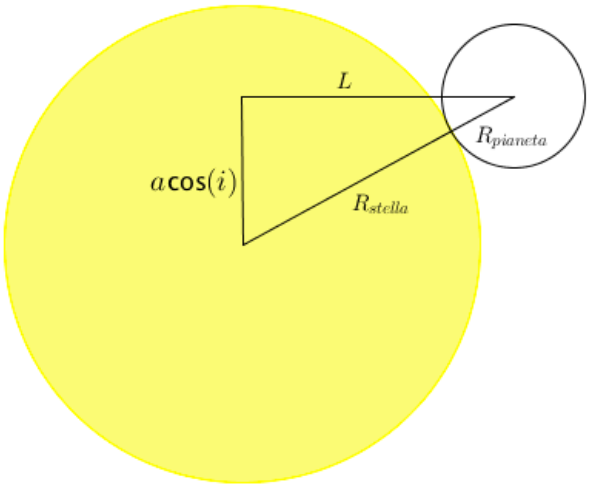

Fig.5.2 *In questa figura sono rappresentati il raggio della stella (*R_{stella}*), il raggio del pianeta (*R_{pianeta}*) e metà del percorso che percorrerà il pianeta durante il transito (L).*

Si vuole a questo punto trovare *L*, cioè metà dello spazio percorso in totale dal pianeta durante il transito. Possiamo utilizzare il teorema di Pitagora (fig. 5.2) per ricavare lo spazio percorso (2*L*).

$$2L = 2\sqrt{(R_{\text{stella}} + R_{\text{pianeta}})^2 - (a\cos(i))^2} \qquad \text{[eq. 5.4]}$$

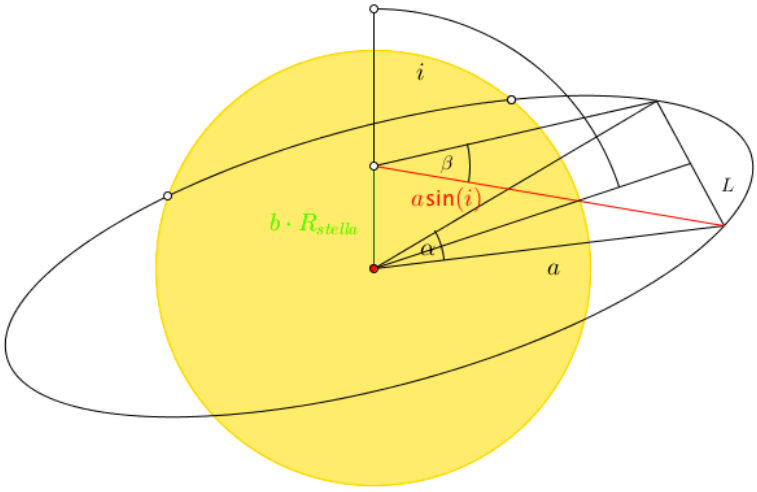

Fig.5.3 *In questa immagine è rappresentata l'orbita del pianeta intorno alla sua stella ospitante.*

L'angolo α (fig. 5.3) è quasi identico all'angolo β (appendice 4). Quando l'inclinazione dell'orbita del pianeta (i) è diversa da 90° lo spazio percorso ($2L$) non è esattamente una retta ma una curva. Per fare in modo che anche in questo caso lo spazio $2L$ sia descritto da una retta utilizziamo una nuova orbita, un'orbita che non passa per il centro ma è distante b dal centro. Questa nuova orbita ha un'inclinazione di 90° e dunque lo spazio percorso è esattamente una retta. Proprio per questo viene utilizzato l'angolo β, che è l'angolo della nuova orbita. Bisogna tenere presente che, per essere osservato dalla terra, il transito deve avere un'inclinazione molto vicina ai 90°, dunque possiamo considerare le due orbite identiche (nel segmento analizzato). Grazie alla trigonometria si può trovare l'equazione seguente (è stato utilizzato l'angolo β, che è uguale ad α).

$$\sin\frac{\alpha}{2} = \frac{L}{a\sin(i)} \qquad \text{[eq.5.5]}$$

Si cerca la durata del transito, chiamata T_{dur}. La durata del transito è uguale al periodo del pianeta diviso 2π (radianti) e poi moltiplicato per l'angolo α.

$$T_{\mathrm{dur}} = P\frac{\alpha}{2\pi} \qquad \text{[eq.5.6]}$$

Dove P è il periodo del pianeta. Inserendo l'equazione 5.5 nell'equazione 5.6 si ottiene:

$$T_{\mathrm{t}} = \frac{P}{\pi} sin^{-1}\frac{L}{a\sin\,(i)} \qquad \text{[eq.5.7]}$$

Dove T_{t} è la durata totale del transito. Con l'equazione 5.4:

$$T_{\mathrm{t}} = \frac{P}{\pi} sin^{-1}\frac{\sqrt{(R_{\mathrm{stella}} + R_{\mathrm{pianeta}})^2 - (a\cos\,(i))^2}}{a\sin\,(i)} \qquad \text{[eq.5.8]}$$

Tenendo conto che nel in questo caso $a \gg R_{\mathrm{stella}}$ e che $\cos(i) \ll 1$, allora $\arcsin(x) \cong x$.
La formula dunque si semplifica e diventa:

$$T_{\mathrm{t}} = \frac{P}{\pi}\frac{\sqrt{(R_{\mathrm{stella}} + R_{\mathrm{pianeta}})^2 - (a\cos\,(i))^2}}{a} \qquad \text{[eq.5.9]}$$

Si cerca ora il rapporto fra il transito del pianeta quando esso si trova completamente nel perimetro della stella (T_{f}) e il transito totale (T_{t}).

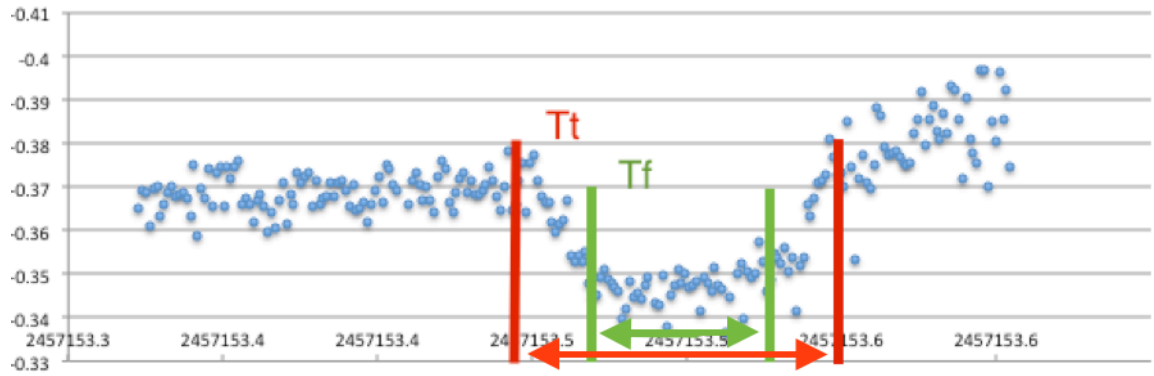

Fig.5.4 *Grafico di HAT-P-12b, in verde* T_f *(transito quando il pianeta si trova completamente nel perimetro della stella) e in rosso* T_t *(transito totale).*

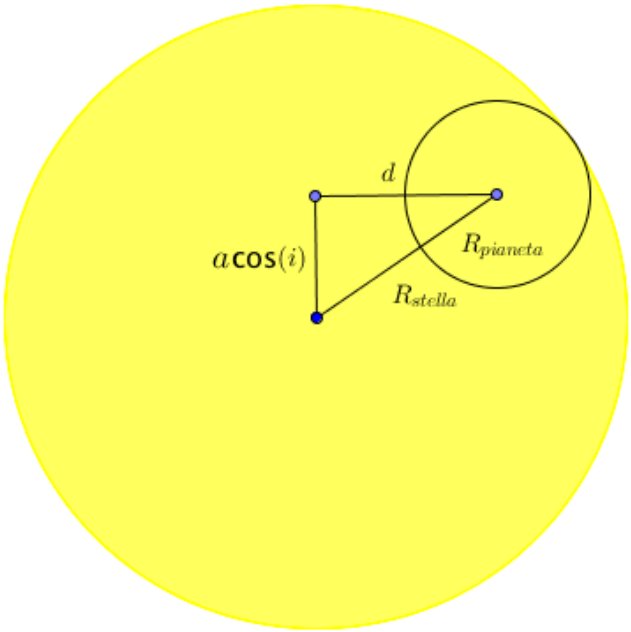

Fig.5.5 *In questa figura sono rappresentati il raggio della stella (*R_{stella}*), il raggio del pianeta (*$R_{pianeta}$*) e metà della distanza percorsa dal pianeta quando esso è completamente nel perimetro della stella (d).*

L'equazione per trovare *d* (la metà dello spazio percorso dal pianeta quando esso è completamente nel periodo della stella) è molto simile all'equazione 5.4 trovata in precedenza ma al posto di addizionare i due raggi si sottrae il raggio del pianeta al raggio della stella. Si ottiene quindi la seguente equazione:

$$d = \sqrt{(R_{stella} - R_{pianeta})^2 - (a\cos(i))^2} \qquad \text{[eq.5.10]}$$

Inserendo questa equazione nell'equazione 5.7 si ottiene:

$$T_f = \frac{p}{\pi} sin^{-1} \frac{\sqrt{(R_{stella} - R_{pianeta})^2 - (a\cos(i))^2}}{a\sin(i)} \qquad \text{[eq.5.11]}$$

Dividendo l'equazione 5.11 con l'equazione 5.8 si ottiene:

$$\left(\frac{\sin\left(\frac{T_f\pi}{P}\right)}{\sin\left(\frac{\pi T_t}{P}\right)}\right)^2 = \frac{\left(1-\frac{R_{pianeta}}{R_{stella}}\right)^2-\left(\frac{a}{R_{stella}}\cos(i)\right)^2}{\left(1+\frac{R_{pianeta}}{R_{stella}}\right)^2-\left(\frac{a}{R_{stella}}\cos(i)\right)^2} \qquad \text{[eq.5.12]}$$

Approssimando che $a \gg R_{stella}$, $T_t\pi/P \ll 1$ e, per x piccole, $\sin x \cong x$ si può semplificare l'equazione nel modo seguente:

$$\left(\frac{T_f}{T_t}\right)^2 = \frac{\left(1-\frac{R_{pianeta}}{R_{stella}}\right)^2-\left(\frac{a}{R_{stella}}\cos(i)\right)^2}{\left(1+\frac{R_{pianeta}}{R_{stella}}\right)^2-\left(\frac{a}{R_{stella}}\cos(i)\right)^2} \qquad \text{[eq.5.13]}$$

In questo modo è stato ricavato il rapporto tra T_f e T_t.
Attraverso le equazioni 5.2, 5.3 e 5.13 si può ricavare il parametro b.

$$b = \sqrt{\frac{(1-\sqrt{\delta})^2-\left(\frac{sin^2\left(\frac{T_f\pi\alpha}{P}\right)}{sin^2\left(\frac{T_t\pi\alpha}{P}\right)}\right)(1+\sqrt{\delta})^2}{1-\frac{sin^2\left(\frac{T_f\pi\alpha}{P}\right)}{sin^2\left(\frac{T_t\pi\alpha}{P}\right)}}} \qquad \text{[eq.5.14]}$$

Approssimando che $a \gg R_{stella}$ e $T_t\pi/P \ll 1$ l'equazione 5.14 può essere semplificata nel seguente modo:

$$b = \sqrt{\frac{(1-\sqrt{\delta})^2-\left(\frac{T_f}{T_t}\right)^2(1+\sqrt{\delta})^2}{1-\left(\frac{T_f}{T_t}\right)^2}} \qquad \text{[eq.5.15]}$$

Tramite le equazioni 5.9 e 5.15 si ottiene:

$$\frac{a}{R_{stella}} = \frac{2P}{\pi}\frac{\delta^{\frac{1}{4}}}{\sqrt{T_t^2-T_f^2}} \qquad \text{[eq.5.16]}$$

Si vuole ricavare ora l'equazione del parametro a attraverso la 3° legge di Keplero.
Terza legge di Keplero:

$$\frac{P^2}{4\pi^2} = \frac{a^3}{G(M_{stella}+M_{pianeta})} \qquad \text{[eq.5.17]}$$

Dove *P* è il periodo del pianeta e *G* la costante di gravitazione universale. M_{pianeta} è trascurabile rispetto alla stella ospitante.

$$a = \left(\frac{P^2 G M_{\text{stella}}}{4\pi^2}\right)^{\frac{1}{3}} \qquad \text{[eq.5.18]}$$

Usando la 3° legge di Keplero, approssimando che $M_{\text{stella}} \gg M_{\text{pianeta}}$, e l'equazione 5.16 si può ricavare la densità della stella (ρ_{stella}).

$$\rho_{\text{stella}} \equiv \frac{M_{\text{stella}}}{R^3_{\text{stella}}} = \frac{4\pi^2}{P^2 G}\left(\frac{a}{R_{\text{stella}}}\right)^3 = \frac{4\pi^2}{P^2 G}\left(\frac{(1+\sqrt{\delta})^2 - b^2\left(1-sin^2\frac{T_t\pi}{P}\right)}{sin^2\frac{T_t\pi}{P}}\right)^{\frac{3}{2}} \qquad \text{[eq.5.19]}$$

Utilizzando l'equazione 5.19 si può calcolare il periodo del pianeta **attraverso un solo transito** se sono conosciuti il raggio del pianeta e la massa della stella.

$$P = \sqrt{\frac{R^3_{\text{stella}} 4\pi^2}{M_{\text{stella}} G}\left(\frac{(1+\sqrt{\delta})^2 - b^2\left(1-sin^2\frac{T_t\pi}{P}\right)}{sin^2\frac{T_t\pi}{P}}\right)^{\frac{3}{2}}} \qquad \text{[eq.5.20]}$$

Quest'ultima equazione può essere scritta in modo più semplice utilizzando le equazioni 5.15 e 5.17.

$$P = \frac{M_{\text{stella}} G\pi}{32 R^3_{\text{stella}}} \frac{(T_{\text{t}}^2 - T_{\text{f}}^2)^{\frac{3}{2}}}{\delta^{\frac{3}{4}}} \qquad \text{[eq.5.21]}$$

In conclusione con un solo transito si possono trovare questi parametri:

- Raggio del pianeta (eq. 5.2)
- Periodo del pianeta (eq. 5.21)
- Semiasse maggiore dell'orbita del pianeta *a* (eq. 5.18)
- Inclinazione dell'orbita *i* (eq. 5.9)
- Parametro *b* (eq. 5.3)

I dati di cui si dispone sono solitamente dati in magnitudini, mentre l'equazione 5.2 necessita del flusso. Per trasformare le magnitudini in flusso viene usata questa formula:

$$m - m_0 = 2{,}5 \log\left(\frac{F_0}{F}\right) \qquad \text{[eq.5.22]}$$

Dove *m* è la magnitudine della stella variabile, m_0 è la magnitudine della stella di confronto, F_0 è il flusso di luminosità della stella di confronto e *F* è il flusso di luminosità della stella variabile.

5.2 Limb darkening

Le equazioni del capitolo 5.1 sono state ricavate considerando la luminosità della stella uniforme. Questo non corrisponde però alla realtà. Infatti la stella è più luminosa al centro rispetto ai bordi (da qui il termine "limb darkening"). Questo è dovuto al fatto che, essendo di forma sferica, la stella al centro è più spessa rispetto ai bordi e quindi anche più luminosa. Facendo un grafico del transito di un pianeta dove la stella ha luminosità omogenea si dovrebbero vedere molto bene e (grafico rosso della figura 5.6). I grafici reali

(dove agisce il limb darkening) sono invece più incurvati e non permettono di determinare in maniera precisa i due parametri (curve blu e verde nel grafico di figura 5.6).

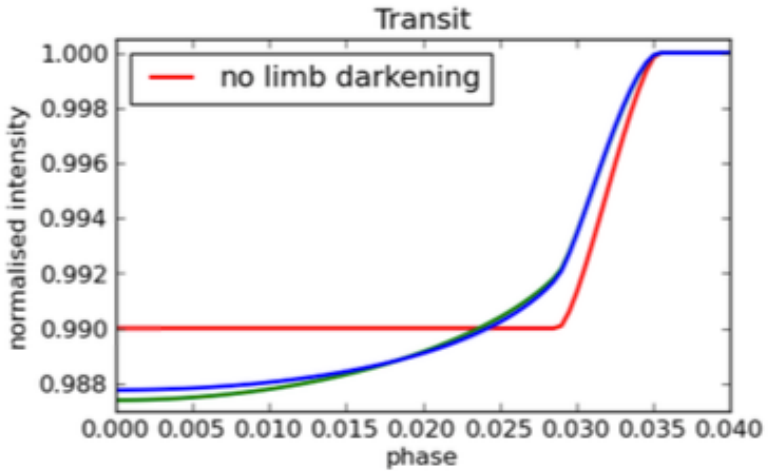

Fig.5.6 *In rosso la curva teorica senza limb darkening, mentre in blu e in verde due curve con il limb darkening a diverse lunghezze d'onda (Credito: Alapini Odunlade).*

Come si vede della figura 5.6 più il limb darkening è forte e più la curva è arrotondata. Questo fa si che con limb darkening forti non siano più distinguibili l'inizio e la fine di T_f e quindi non siano più applicabili le formule del capitolo 5.1.
Il limb darkening dipende dalla lunghezza d'onda in cui viene misurata la luminosità della stella.
Per correggere i grafici dei transiti affetti da limb darkening bisogna per prima cosa fare un grafico della luminosità della stella in ogni suo punto (fig.5.7). (Seager and Mallén-Ornelas, 2003; Sackett, 1999; Odunlade, 2010).

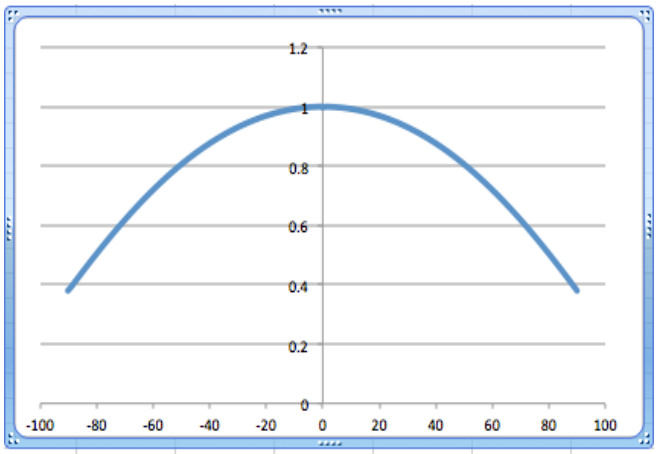

Fig.5.7 *Grafico della luminosità di HAT-P-12 in ogni suo punto. La luminosità è data da valori da 0 a 1, dove 1 è il centro della stella (punto più luminoso). Sull'asse delle x sono dati degli angoli che corrispondono ai vari punti della stella (0° è il centro della stella, mentre 90° è il punto più lontano dal bordo). Questo grafico mostra bene come più ci si allontana dal centro della stella e più la luminosità di questa diminuisce.*

Per fare questa curva è stata utlizzata la legge quadratica (eq. 5.23)

$$\frac{I(\mu)}{I(1)} = 1 - u_1(1-\mu) - u_2(1-\mu)^2 \qquad \text{[eq.5.23]}$$

Dove $\mu = \cos(\theta)$, θ è l'angolo tra il normale in ogni punto della superficie della stella e la linea di vista e u_1 e u_2 sono due parametri che dipendono dalla temperatura della stella. (Espinoza and Jordan; 2015)

Fatto questo si creano delle curve cambiando i parametri orbitali del pianeta per cercare la curva che più si avvicina ai dati osservati (vedi fig. 5.8).

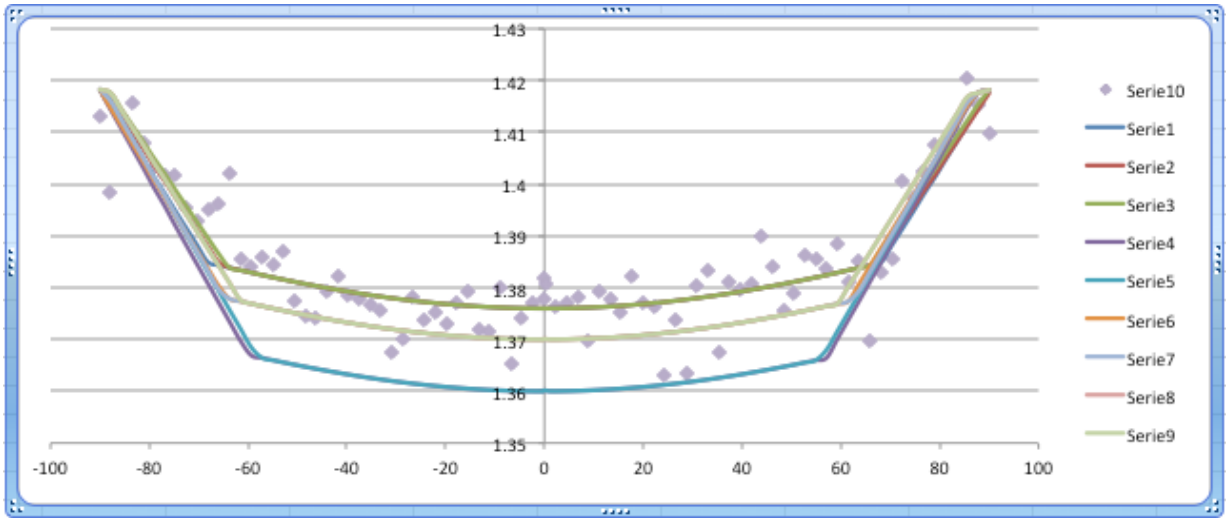

Fig.5.8 *9 curve create per cercare quella che approssimasse meglio i dati di HAT-P-12b. Le serie 1,2 e 3 sono state fatte con* $R_p = 0{,}79$ *raggi di Giove e* T_t *rispettivamente 8575, 8475 e 8375 secondi. Le serie 4, 5 e 6 sono state fatte con* $R_p = 0{,}98$ *raggi di Giove e* T_t *rispettivamente 8575, 8475 e 8375 secondi. Le serie 7,8 e 9 sono state fatte con* $R_p = 1{,}17$ *raggi di Giove e* T_t *rispettivamente 8575, 8475 e 8375 secondi. La curva che meglio approssima i dati è la serie 3.*

5.3 Analisi dell'incertezza nei risultati

Per analizzare i dati osservati dei transiti abbiamo usato il programa Muniwin (Filip Hroch, 2008). Per vedere nel dettaglio come utilizzare il programma si consulti l'appendice 5.
Una volta immessi i dati si possono ricavare il tempo totale del transito (T_t), il tempo del transito quando il pianeta è completamente nel perimetro della stella (T_f), la magnitudine della stella prima del transito e la magnitudine durante il transito.
A causa della presenza di errori casuali di misure, la distribuzione dei dati osservati segue una distribuzione di Gauss, descritta da due parametri: la media (μ) e la deviazione standard (σ) (eq. 5.24).
Distribuzione di Gauss:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \qquad \text{[eq.5.24]}$$

Per trovare un'approssimazione della deviazione standard dei dati viene utilizzato:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \mu)^2 \qquad \text{[eq.5.25]}$$

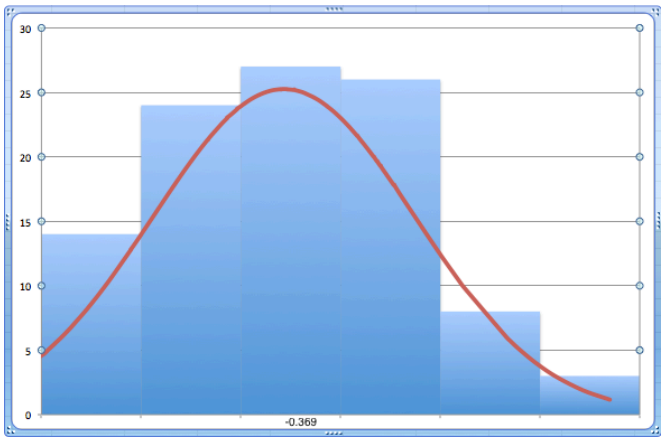

Fig.5.9 *Istogramma e curva di Gauss della distribuzione dei dati di HAT-P-12b. La deviazione standard di questi punti è 0,004 mag, mentre la media è -0,369 mag.*

Per qualificare l'incertezza dei dati viene utilizzata la deviazione standard dei punti (σ).
Per l'incertezza di T_f e T_t si tiene sempre 100 secondi in quanto è il tempo di esposizione di ogni immagine.

5.4 Massa d'aria

In astronomia, riuscire a determinare la massa d'aria che viene attraversata dalla luce proveniente dagli oggetti luminosi della sfera celeste è importante. L'atmosfera tende ad assorbire e quindi a bloccare i fotoni che ci arrivano da un corpo celeste, facendo così diminuire la sua luminosità. Come si può ben capire, questo risulta un problema per fare misurazioni astronomiche precise, poiché maggiore è la massa d'aria attraversata maggiore è il calo di luminosità.[xxix]
Visto che le immagini astronomiche sono influenzate da questo effetto dovuto all'atmosfera terrestre, si è cercato di collocare i centri di osservazione in zone favorevoli del nostro globo. Zone dove la luce proveniente da corpi esterni alla Terra deve attraversare meno atmosfera (zone montagnose). A questo scopo l'ESO, per esempio, ha costruito i suoi più grandi telescopi in Cile, nel deserto del Paranal, così da diminuire le imprecisioni dovute alle interferenze dell'atmosfera sulla qualità dell'immagine.
Malgrado la rilevanza della massa d'aria in ambito astronomico, essa non compromette la riuscita di questo lavoro. I dati da noi utilizzati sono infatti delle differenze di magnitudine tra la stella analizzata e la stella di confronto, i delta non sono influenzati dalla massa d'aria poiché la stella che ospita il pianeta e la stella di confronto si trovano estremamente vicine. Questa vicinanza provoca un'assorbimento di fotoni da parte dell'atmosfera identico (o quanto meno la differenza tra i due assorbimenti è irrilevante).

6. Dati

6.1 Diario delle osservazioni

Il diario delle osservazioni che segue mostra tutte le osservazioni che sono state fatte. Sia quelle che sono riuscite, sia quelle che, a causa di uno dei problemi sopracitati, non sono andate a buon fine.

Data	**Descrizione eventi**	**Esito**
Lunedì 20.04.2015	Prima osservazione guidata da Francesco Fumagalli, HATS-1b	Positivo
Martedì 21.04.2015	Seconda osservazione. Tentativo vano a causa di un albero che si trovava nella traiettoria d'osservazione del telescopio	Negativo
Mercoledì 22.04.2015	Osservazione in remoto di HAT-P36b	Positivo
Domenica 10.05.2015	Prima osservazione effettuata da noi, HAT-P-12b	Molto positivo
Mercoledì 27.05.2015	WASP-103b Difficoltà: profondità del transito al di sotto dei parametri prefissati(12mmag)	Positivo
Venerdì 19.06.2015	Osservazione di WASP-103b	Negativo
Domenica 20.09.2015	Osservazione di QATAR-1b	Positivo
Venerdì 13.11.2015	Osservazione a Saint-Barthélemy, in Val d'Aosta, di HAT-P-19b	Positivo

In questo capitolo ci occuperemo di mostrare l'analisi e i risultati ottenuti per quattro delle seguenti osservazioni, ovvero: HAT-P-12b osservato il 10 maggio 2015 all'osservatorio di Calina; HAT-P-19b osservato il 13 novembre 2015 all'osservatorio di Saint-Barthélemy; HAT-P-36b osservato il 22 aprile 2015 all'osservatorio di Calina; WASP-103b osservato il 27 maggio 2015 all'osservatorio di Calina.

6.2 HAT-P-12b

HAT-P-12b è il pianeta che orbita attorno a HAT-P-12, la quale si trova a 142,5 3,3 pc dal nostro pianeta. La stella ha una magnitudine apparente di 12,84 mag e un'età di 2,5 2.0 Gy.
HAT-P-12b è stato scoperto il 5 novembre 2009 (Hartman et al., 2009), quando Hartman e il suo team analizzarono il pianeta con il W.M.Keck Observatory, individuato tramite transito primario e confermato il 21 maggio 2014.[(xxix)]

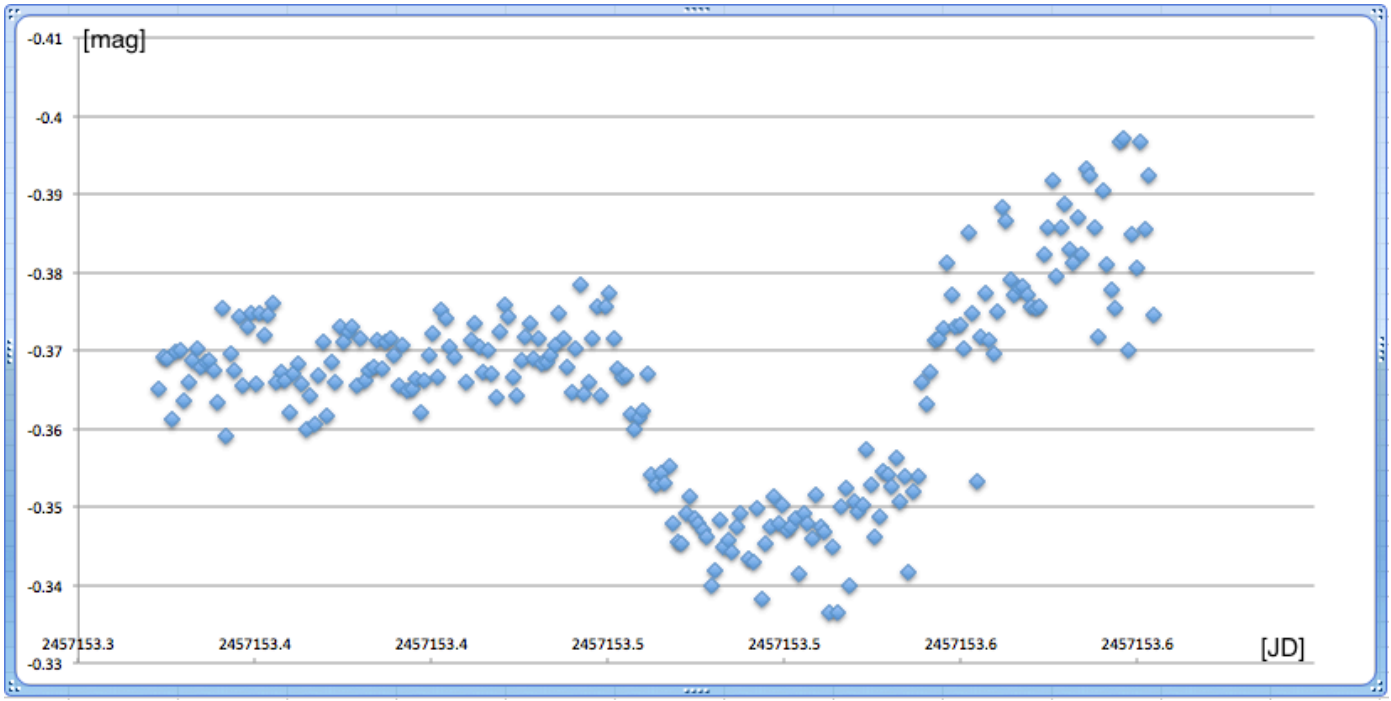

Fig.6.1 *Magnitudine apparente della stella HAT-P-12 in funzione del tempo (in giorni giuliani). Si nota il transito dovuto al pianeta HAT-P-12b tra i tempi 2457153,5 e 2457153,6 (Osservatorio di Carona). I dati di questo grafico sono il risultato della differenza di magnitudine tra la stella osservata con transito ed una stella di confronto, per questo le magnitudini possono essere negative.*

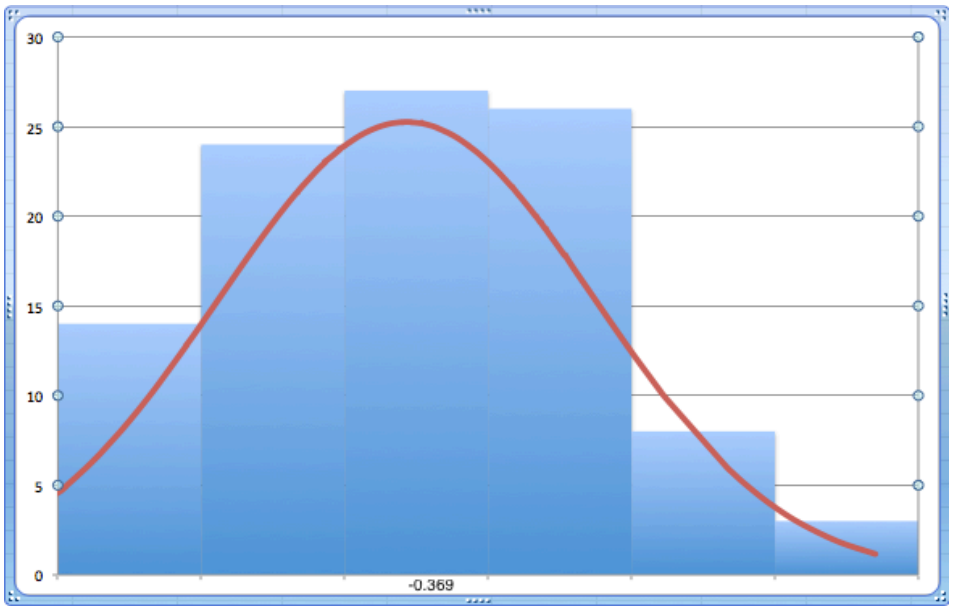

Fig.6.2 *Curva di Gauss e istogramma dei dati osservati prima del transito di HAT-P-12b. La deviazione standard di questi punti è 0,004 mag, mentre la media è -0,369 mag.*

Parametri derivati dalle nostre osservazioni	
Luminosità apparente della stella	-0,369 mag
Luminosità apparente della stella con transito	-0,347 mag
T_t	8475 sec
T_f	6134 sec
Deviazione standard	0,004 mag

Parametri trovati nell'archivio della NASA	
Massa stellare	0,733 $\pm$ 0,018 masse solari
Raggio stellare	0,701 $\pm$ 0,017 raggi solari

Utilizzando l'equazione 5.1 è stato trovato $\boldsymbol{\delta}$. Questo risultato e il raggio della stella (archivio della NASA) sono stati poi inseriti nell'equazione 5.2 per trovare il **raggio del pianeta**. Per trovare il **periodo del pianeta** sono stati inseriti nell'equazione 5.20 T_f, T_t, $\boldsymbol{\delta}$, il raggio e la massa della stella (archivio della NASA). Sono stati poi inseriti la massa della stella e il periodo del pianeta nell'equazione 5.17 per ottenere il **semiasse maggiore (a)**. Utilizzando T_t, il periodo, il semiasse maggiore e il raggio di stella e pianeta è stato calcolato **l'inclinazione dell'orbita (*i*)** (eq.5.8). Come ultima cosa sono stati inseriti il semiasse maggiore, l'inclinazione dell'orbita e il raggio della stella nell'eq.5.3 per calcolare il **parametro *b***.

Parametri orbitali di HAT-P-12b		
Parametri	Dati ottenuti all'osservatorio di Carona	Dati della letteratura
R_{pianeta}	0,98 $\pm$ 0,19 raggi di Giove	0,959 $\pm$ 0,029 raggi di Giove
P	3,4 $\pm$ 1,64 giorni	3,2130598 $\pm$ 0,0000021 giorni
a	0,040 $\pm$ 0,012 AU	0,0284 $\pm$ 0,0003 AU
i	88,65 ° $\pm$ 2,80°	89,0° $\pm$ 0,4 °
b	0,29 $\pm$ 0,69	0,211 $\pm$ 0,07

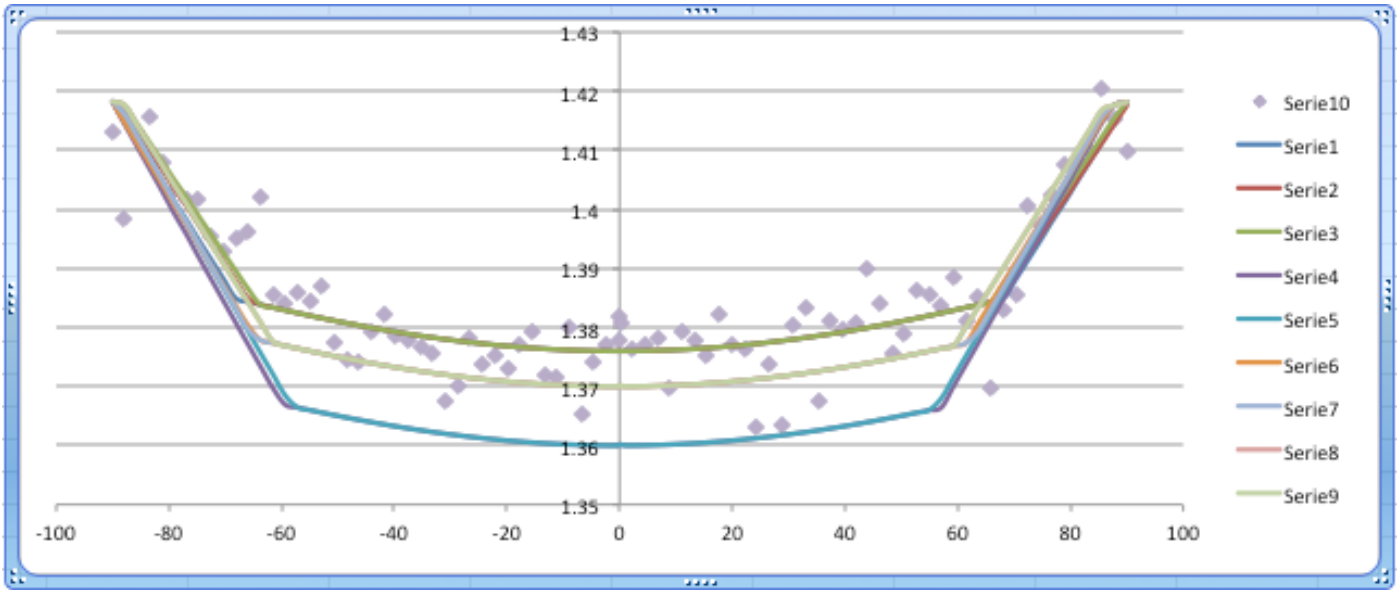

Fig.6.3 *9 curve create per cercare quella che approssimasse meglio i dati di HAT-P-12b. Le serie 1,2 e 3 sono state fatte con $R_p = 0{,}79$ raggi di Giove e T_t rispettivamente 8575, 8475 e 8375 secondi. Le serie 4, 5 e 6 sono state fatte con $R_p = 0{,}98$ raggi di Giove e T_t rispettivamente 8575, 8475 e 8375 secondi. Le serie 7,8 e 9 sono state fatte con $R_p = 1{,}17$ raggi di Giove e T_t rispettivamente 8575, 8475 e 8375 secondi. La curva che meglio approssima i dati è la serie 3.*

6.3 HAT-P-19b

HAT-P-19b è il pianeta che orbita attorno a HAT-P-19, la quale si trova a 215 15,0 pc dal nostro pianeta. La stella ha una magnitudine apparente di 12,9 mag e un'età di 8,8 5,2 Gyr.
HAT-P-19b è stato scoperto il 10 dicembre 2010 (Guillochon et al.,2011), quando Guillochon e il suo team hanno individuato il pianeta tramite transito primario. Esso fu confermato il 26 agosto 2015.[(xxx)]

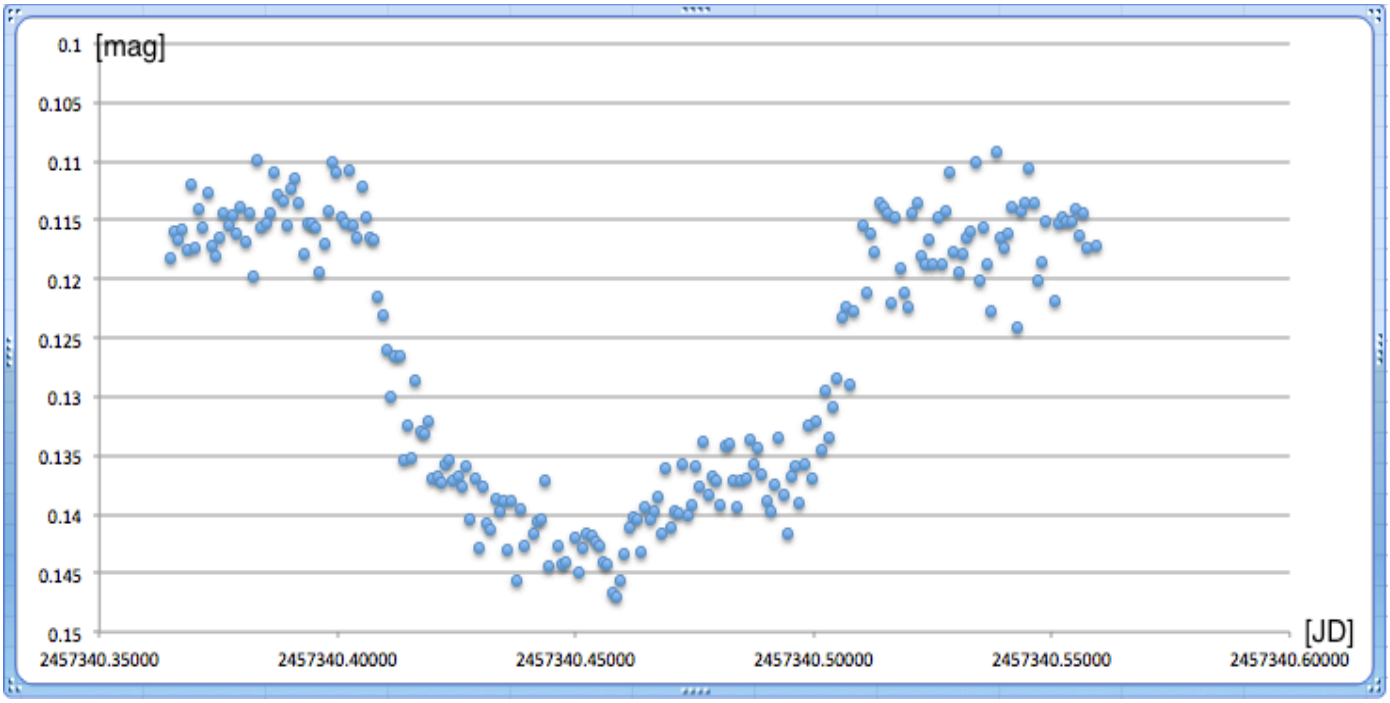

Fig.6.4 *Magnitudine apparente della stella HAT-P-19 in funzione del tempo (in giorni giuliani). Si nota il transito dovuto al pianeta HAT-P-19b tra i tempi 2457540,4 e 2457540,52 (Osservatorio di St-Bartelemy). I dati di questo grafico sono il risultato della differenza di magnitudine tra la stella osservata con transito ed una stella di confronto, per questo le magnitudini possono essere negative.*

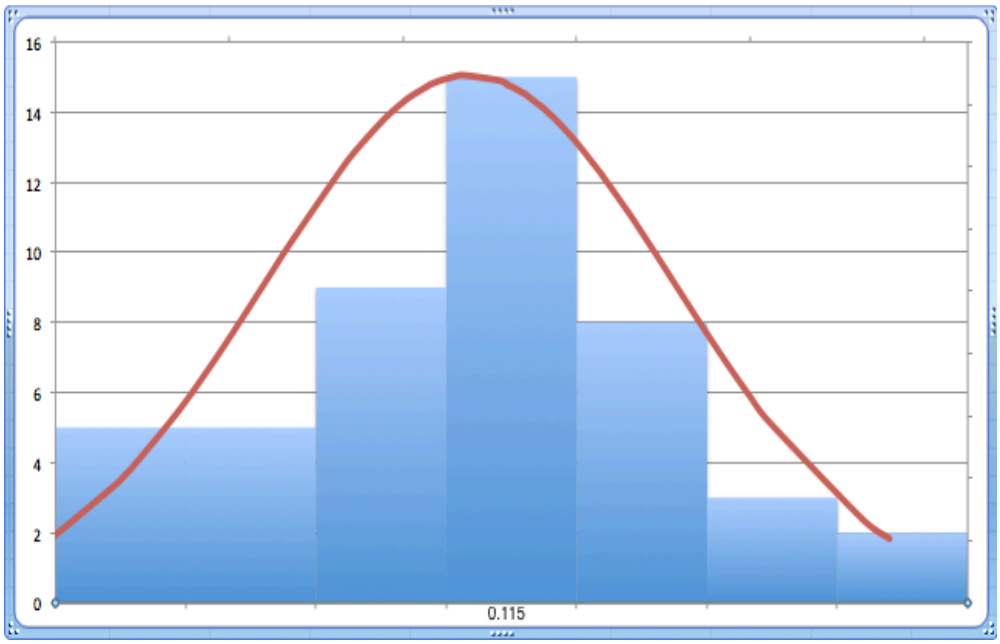

Fig.6.5 *Curva di Gauss e istogramma dei punti prima del transito di HAT-P-19b. La deviazione standard di questi punti è 0,002 mag, mentre la media è 0,115 mag.*

Parametri derivati dalle nostre osservazioni	
Luminosità apparente della stella	0,115 mag
Luminosità apparente della stella con transito	0,140 mag
T_t	8933 sec
T_f	5147 sec
Deviazione standard	0,002 mag

Parametri trovati nell'archivio della NASA	
Massa stellare	0,842 $\pm$ 0,042 masse solari
Raggio stellare	0,820 $\pm$ 0,048 raggi solari

Utilizzando l'equazione 5.1 è stato trovato $\boldsymbol{\delta}$. Questo risultato e il raggio della stella (archivio della NASA) sono stati poi inseriti nell'equazione 5.2 per trovare il **raggio del pianeta**. Per trovare il **periodo del pianeta** sono stati inseriti nell'equazione 5.20 T_f, T_t, $\boldsymbol{\delta}$, il raggio e la massa della stella (archivio della NASA). Sono stati poi inseriti la massa della stella e il periodo del pianeta nell'equazione 5.17 per ottenere il **semiasse maggiore (a)**. Utilizzando T_t, il periodo, il semiasse maggiore e il raggio di stella e pianeta è stato calcolato **l'inclinazione dell'orbita (*i*)** (eq.5.8). Come ultima cosa sono stati inseriti il semiasse maggiore, l'inclinazione dell'orbita e il raggio della stella nell'eq.5.3 per calcolare il **parametro *b***.

Parametri orbitali di HAT-P-19b		
Parametri	Dati ottenuti all'osservatorio di St-Bartelemy	Dati della letteratura
R_{pianeta}	1,21 $\pm$ 0,16 raggi di Giove	1,132 $\pm$ 0,072 raggi di Giove
P	3,69 $\pm$ 1,88 giorni	4,008778 $\pm$ 0,000006 giorni
a	0,044 $\pm$ 0,015 AU	0,0466 $\pm$ 0,0008 AU
i	87,3 ° $\pm$ 5,88°	88,2° $\pm$ 0,4°
b	0,54 $\pm$ 1,36	0,404 +0,061/-0,088

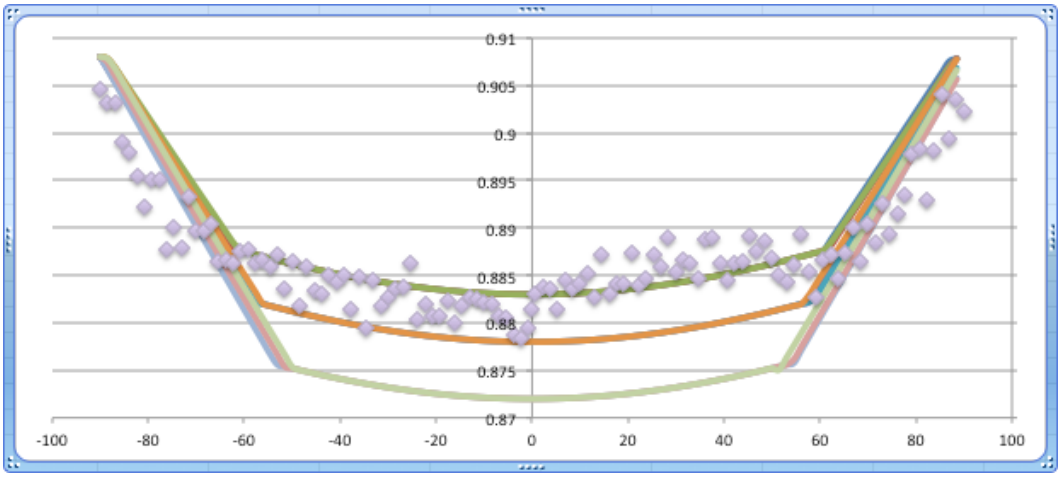

Fig.6.6 *9 curve create per cercare quella che approssimasse meglio i dati di HAT-P-19b. Le serie 1,2 e 3 sono state fatte con* $R_p = 1{,}05$ *raggi di Giove e* T_t *rispettivamente 9033, 8933 e 8833 secondi. Le serie 4, 5 e 6 sono state fatte con* $R_p = 1{,}21$ *raggi di Giove e* T_t *rispettivamente 9033, 8933 e 8833secondi. Le serie 7,8 e 9 sono state fatte con* $R_p = 1{,}37$ *raggi di Giove e* T_t *rispettivamente 9033, 8933 e 8833 secondi. La curva che meglio approssima i dati è la serie 3(curva verde).*

6.4 HAT-P-36b

HAT-P-36b è il pianeta che orbita attorno a HAT-P-36, la quale si trova a 317 17,0 pc dal nostro pianeta. La stella ha una magnitudine apparente di 12,26 mag e un età di 6,6 1,8 Gyr.
HAT-P-36b è stato scoperto il 23 dicembre 2011 (Bakos et al., 2012), quando Bakos e il suo team hanno individuato il pianeta tramite transito primario. Esso fu confermato il 13 aprile 2012.[(xxxi)]

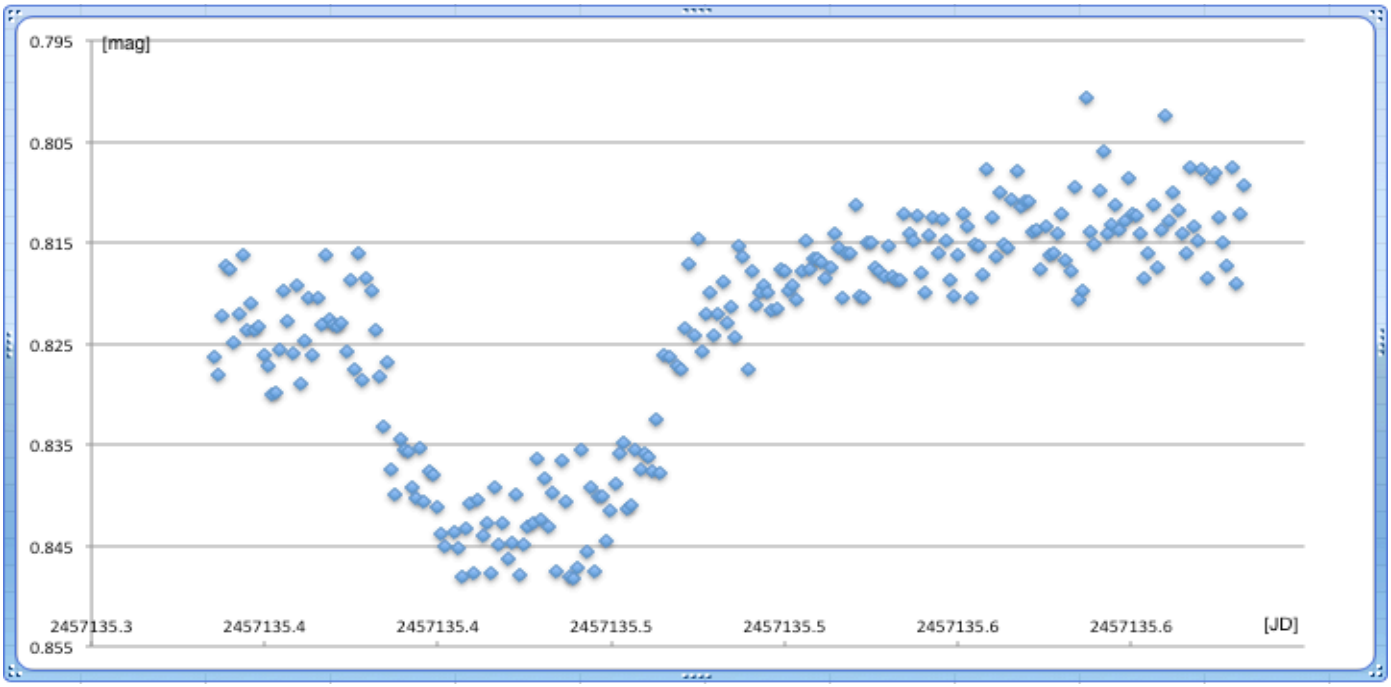

Fig.6.7 *Magnitudine apparente della stella HAT-P-36 in funzione del tempo (in giorni giuliani). Si nota il transito dovuto al pianeta HAT-P-36b tra i tempi 2457135,4 e 2457135,5 (Osservatorio di Carona). I dati di questo grafico sono il risultato della differenza di magnitudine tra la stella osservata con transito ed una stella di confronto, per questo le magnitudini possono essere negative.*

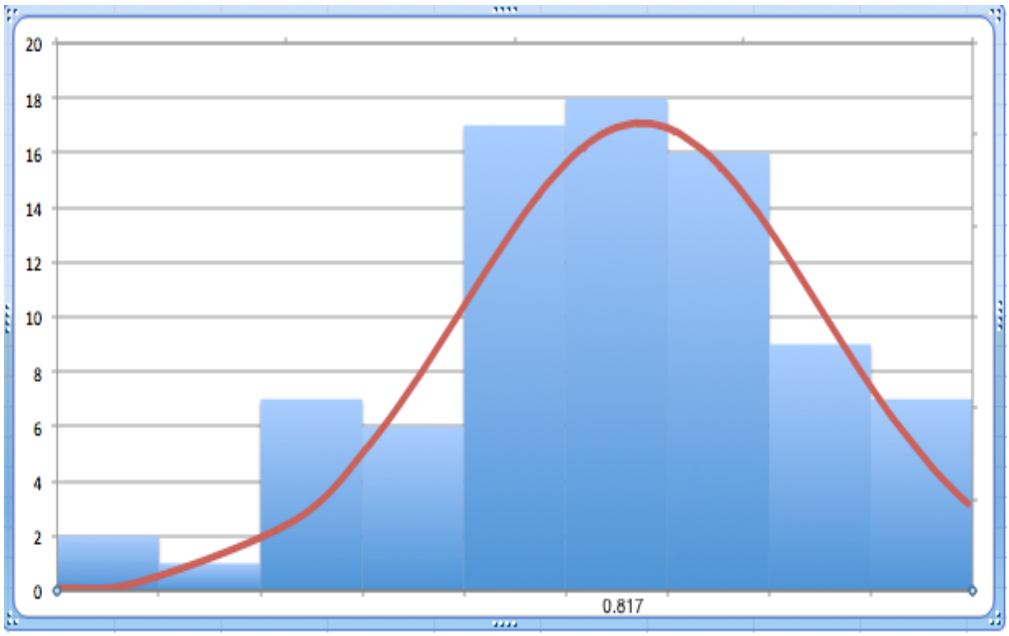

Fig.6.8 *Curva di Gauss e istogramma dei punti dopo il transito di HAT-P-36b. La deviazione standard di questi punti è 0,004 mag, mentre la media è 0,817 mag.*

Parametri derivati dalle nostre osservazioni	
Luminosità apparente della stella	0,817 mag
Luminosità apparente della stella con transito	0,843 mag
T_t	7736 sec
T_f	4127 sec
Deviazione standard	0,004 mag

Parametri trovati nell'archivio della NASA	
Massa stellare	1,022±0,049 masse solari
Raggio stellare	1,096±0,056 raggi solari

Utilizzando l'equazione 5.1 è stato trovato $\boldsymbol{\delta}$. Questo risultato e il raggio della stella (archivio della NASA) sono stati poi inseriti nell'equazione 5.2 per trovare il **raggio del pianeta**. Per trovare il **periodo del pianeta** sono stati inseriti nell'equazione 5.20 T_f, T_t, $\boldsymbol{\delta}$, il raggio e la massa della stella (archivio della NASA). Sono stati poi inseriti la massa della stella e il periodo del pianeta nell'equazione 5.17 per ottenere il **semiasse maggiore (a)**. Utilizzando T_t, il periodo, il semiasse maggiore e il raggio di stella e pianeta è stato calcolato **l'inclinazione dell'orbita (*i*)** (eq.5.8). Come ultima cosa sono stati inseriti il semiasse maggiore, l'inclinazione dell'orbita e il raggio della stella nell'eq.5.3 per calcolare il **parametro *b***.

Parametri orbitali di HAT-P-36b		
Parametri	Dati ottenuti all'osservatorio di Carona	Dati della letteratura
$R_{pianeta}$	1,64 ± 0,34 raggi di Giove	1,264 ± 0,071 raggi di Giove
P	1,61 ± 1,77 giorni	1,327347 ± 0,000003 giorni
a	0,027 ± 0,002 AU	0,0238 ± 0,0004 AU
i	82,5°± 18,16°	86,0° ± 1,3°
b	0,693 ± 1,75	0,31 ± 0,105

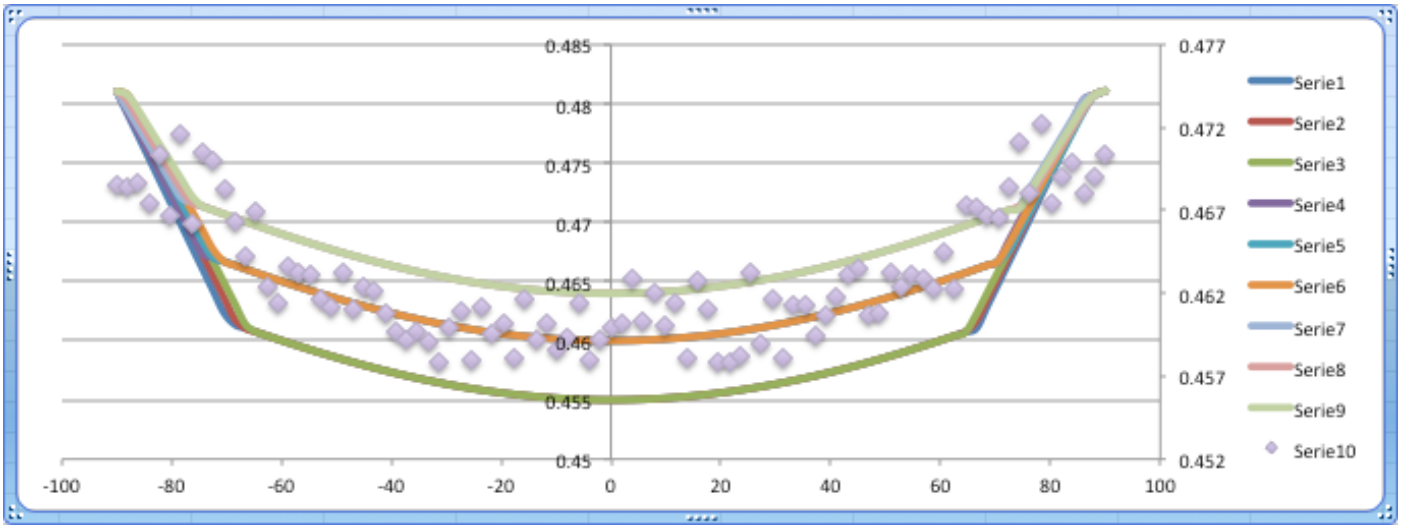

Fig.6.9 *9 curve create per cercare quella che approssimasse meglio i dati di HAT-P-36b. Le serie 1,2 e 3 sono state fatte con $R_p = 1{,}3$ raggi di Giove e T_t rispettivamente 7836, 7736 e 7636 secondi. Le serie 4, 5 e 6 sono state fatte con $R_p = 1{,}64$ raggi di Giove e T_t rispettivamente 7836, 7736 e 7636 secondi. Le serie 7,8 e 9 sono state fatte con $R_p = 1{,}98$raggi di Giove e T_t rispettivamente 7836, 7736 e 7636 secondi. La curva che meglio approssima i dati è la serie 6.*

6.5 WASP-103b

WASP-103b è il pianeta che orbita attorno a WASP-103, la quale si trova a 470 35,0 pc dal nostro pianeta. La stella ha una magnitudine apparente di 12,0 mag e un età di 4,0 1,0 Gyr.
WASP-103b è stato scoperto il 13 gennaio 2014 (Gillon et al.,2014), quando Gillon e il suo team hanno individuato il pianeta tramite transito primario. Esso fu confermato il 21 maggio 2014.[xxxii]

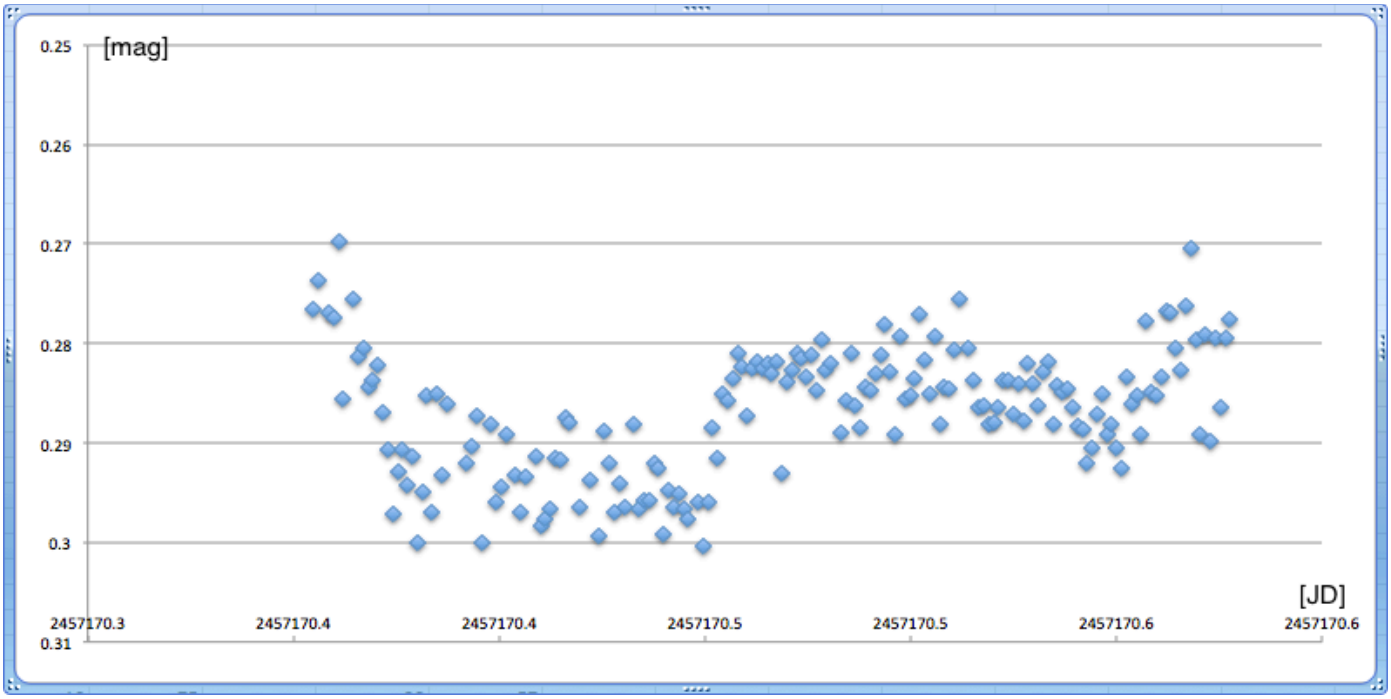

Fig.6.10 *Magnitudine apparente della stella WASP-103 in funzione del tempo (in giorni giuliani). Si nota il transito dovuto al pianeta WASP-103b tra i tempi 2457170.4 e 2457170.5 (Osservatorio di Carona). I dati di questo grafico sono il risultato della differenza di magnitudine tra la stella osservata con transito ed una stella di confronto, per questo le magnitudini possono essere negative.*

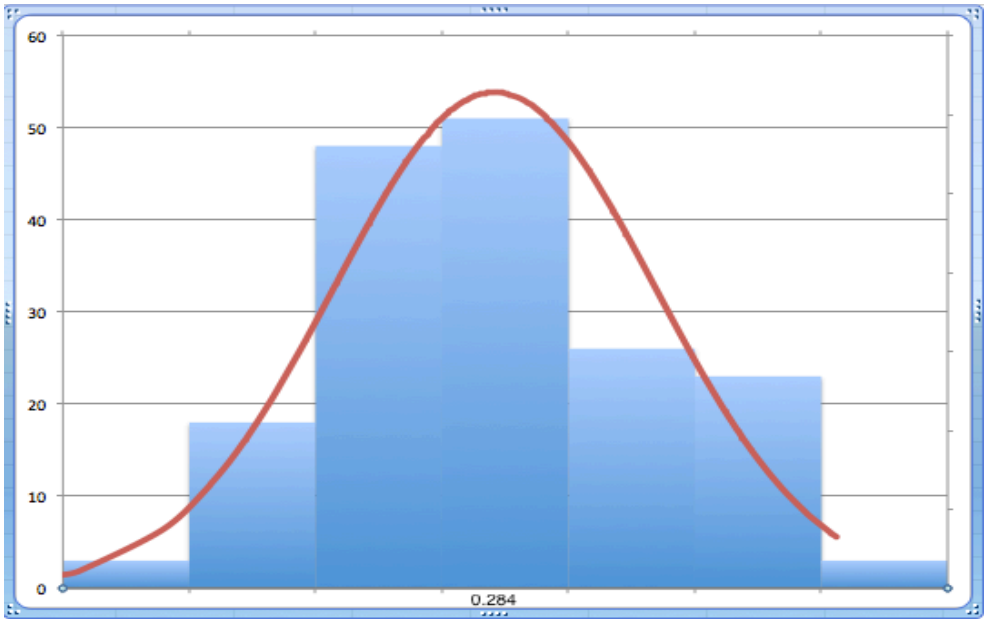

Fig.6.11 *Curva di Gauss e istogramma dei punti prima del transito di WASP-103b. La deviazione standard di questi punti è 0,006 mag, mentre la media è 0,284 mag.*

Parametri derivati dalle nostre osservazioni	
Luminosità apparente della stella	0,284 mag
Luminosità apparente della stella con transito	0,293 mag
T_t	7861 sec
T_f	3724 sec
Deviazione standard	0,006 mag

Parametri trovati nell'archivio della NASA	
Massa stellare	1,220 $\pm$ 0,039 masse solari
Raggio stellare	1,436 $\pm$ 0,052 raggi solari

Utilizzando l'equazione 5.1 è stato trovato $\boldsymbol{\delta}$. Questo risultato e il raggio della stella (archivio della NASA) sono stati poi inseriti nell'equazione 5.2 per trovare il **raggio del pianeta**. Per trovare il **periodo del pianeta** sono stati inseriti nell'equazione 5.20 T_f, T_t, $\boldsymbol{\delta}$, il raggio e la massa della stella (archivio della NASA). Sono stati poi inseriti la massa della stella e il periodo del pianeta nell'equazione 5.17 per ottenere il **semiasse maggiore (a)**. Utilizzando T_t, il periodo, il semiasse maggiore e il raggio di stella e pianeta è stato calcolato **l'inclinazione dell'orbita (*i*)** (eq.5.8). Come ultima cosa sono stati inseriti il semiasse maggiore, l'inclinazione dell'orbita e il raggio della stella nell'eq.5.3 per calcolare il **parametro *b***.

Parametri orbitali di WASP-103b		
Parametri	Dati ottenuti	Dati della letteratura
R_{pianeta}	1,31 $\pm$ 0,79 raggi di Giove	1,528 $\pm$ 0,073 raggi di Giove
P	0,68 $\pm$ 0,14 giorni	0,925542 $\pm$ 0,000019 giorni
a	0,016 $\pm$ 0,002 AU	0,01985$\pm$ 0,00021 AU
i	80,3°$\pm$ 26,9°	86,3° $\pm$ 2,7 °
b	0,41 $\pm$ 1,16	0,19 $\pm$ 0,13

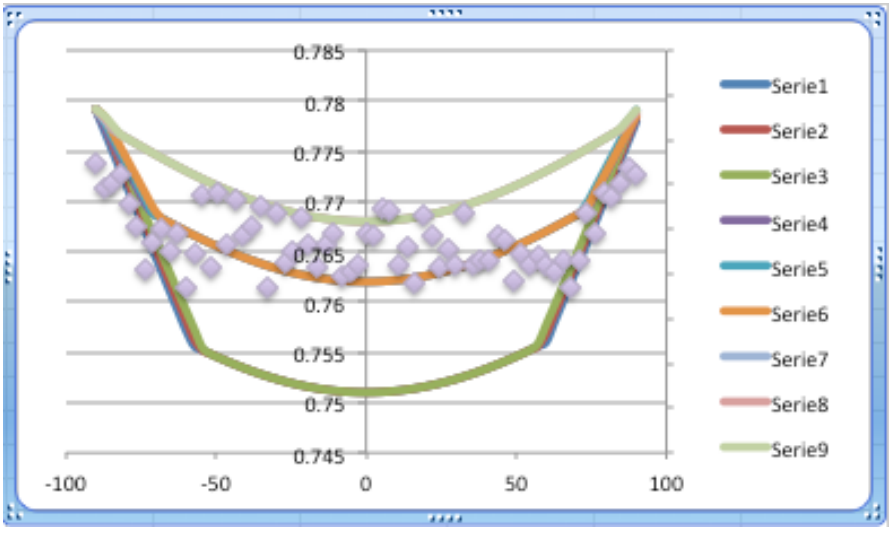

Fig.6.9 *9 curve create per cercare quella che approssimasse meglio i dati di HAT-P-12b. Le serie 1,2 e 3 sono state fatte con* $R_p = 0{,}52$ *raggi di Giove e* T_t *rispettivamente 7961, 7861 e 7761 secondi. Le serie 4, 5 e 6 sono state fatte con* $R_p = 1{,}31$ *raggi di Giove e* T_t *rispettivamente 7961, 7861 e 7761 secondi. Le serie 7,8 e 9 sono state fatte con* $R_p = 2{,}1$ *raggi di Giove e* T_t *rispettivamente 7961, 7861 e 7761 secondi. La curva che meglio approssima i dati è la serie 6.*

7. Conclusioni

I risultati ottenuti dalle osservazioni hanno confermato i dati ricavati da osservazioni precedenti effettuate da altri gruppi di lavoro e l'idoneità dell'osservatorio di Carona per quanto riguarda l'osservazione di esopianeti, per i pianeti extrasolari HAT-P-12b (Hartman et al., 2009), HAT-P-19b (Guillochon et al., 2011), HAT-P-36b (Bakos et al., 2012) e WASP-103b (Gillon et al.,2014).
Nelle analisi presentate non è stato applicato il limb darkening. Questa approssimazione non implica grandi differenze rispetto ai dati ufficiali: i nostri risultati appaiono ragionevoli, come si può osservare nella tabella seguente.

I dati ricavati (riassunti nella tabella che segue) ci permettono di comprendere che pianeti simili a Giove per di-mensione si trovano su orbite minori di quelle della Terra e viaggiano quindi a grandi velocità (dedotte dalla terza legge di Keplero).
HAT-P-12b ha dimensioni pari a 0,98 volte quelle di Giove e percorre la sua orbita, di semiasse maggiore 0,040 AU, in un periodo di 3,4 giorni. Mentre HAT-P-19b ha dimensioni pari a 1,21 volte quelle di Giove e percorre la sua orbita, di semiasse maggiore 0,044 AU, in un periodo di 3,69 giorni. Per quanto riguarda HAT-P-36b, esso ha dimensioni pari a 1,64 volte quelle di Giove e percorre la sua orbita, di semiasse maggiore 0,027 AU, in un periodo di 1,61 giorni. Infine WASP-103b ha dimensioni pari a 1,31 volte quelle di Giove e percorre la sua orbita, di semiasse maggiore 0,016 AU, in un periodo di 0,68 giorni.
Come visto nel capitolo delle combinazioni particolari (capitolo 3), la presenza di pianeti gassosi di queste dimensioni in orbite così piccole può essere dovuta a una migrazione, dalle zone periferiche del sistema stellare a zone più centrali (più vicine alla stella), di questi. Il motivo per il quale vengono presentati solo pianeti con queste caratteristiche è dovuto alle capacità dei telescopi utilizzati di osservare delle magnitudini apparenti delle stelle, minori o uguali a 14 mag e dei cali di luminosità dovuti al transito del pianeta, maggiori o uguali a 15 mmag. Inoltre dalla Terra si possono osservare soltanto casi di pianeti con periodi molto corti. Questo perché si può osservare soltanto durante la notte e quindi un transito, per essere osservato per intero deve durare meno di una notte.
La dispersione dei punti (specialmente dopo il transito) e la tendenza della magnitudine a diminuire ipotiz-ziamo siano dovute all'assorbimento maggiore dell'atmosfera terrestre oppure da fattori ambientali non mi-surabili precisamente. Per quanto riguarda la dispersione dei punti sul grafico, si presume che le condizioni meteorologiche abbiano influito maggiormente la luminosità della stella. Mentre la stella scende sull'orizzonte nell'arco della notte, i fotoni vengono maggiormente influenzati dalle condizioni atmosferiche differenti poiché attraversano maggiore quantità d'aria. Invece la tendenza a diminuire della magnitudine, o meglio, la tendenza della luminosità ad aumentare potrebbe essere dovuta all'assorbimento spettrale differenziale causato dalla variazione della massa d'aria.

Parametri orbitali di HAT-P-12b		
Parametri	Dati ottenuti all'osservatorio di Carona	Dati della letteratura
R_{pianeta}	0,98 ± 0,19 raggi di Giove	0,959 ± 0,029 raggi di Giove
P	3,4 ± 1,64 giorni	3,2130598 ± 0,0000021 giorni
a	0,040 ± 0.012 AU	0,0284 ± 0,0003 AU
i	88,65 ° ± 2,80°	89,0° ± 0,4 °
b	0,29 ± 0,69	0,211 ± 0,07
Parametri orbitali di HAT-P-19b		
Parametri	Dati ottenuti all'osservatorio di St-Bartelemy	Dati della letteratura
R_{pianeta}	1,21 ± 0,16 raggi di Giove	1,132 ± 0,072 raggi di Giove
P	3,69 ± 1,88 giorni	4,008778 ± 0,000006 giorni
a	0,044 ± 0,015 AU	0,0466 ± 0,0008 AU
i	87,3 ° ± 5,88°	88,2° ± 0,4°
b	0,54 ± 1,36	0,404 +0,061/-0,088
Parametri orbitali di HAT-P-36b		
Parametri	Dati ottenuti all'osservatorio di Carona	Dati della letteratura
R_{pianeta}	1,64 ± 0,34 raggi di Giove	1,264 ± 0,071 raggi di Giove
P	1,61 ± 1,77 giorni	1,327347 ± 0,000003 giorni
a	0,027 ± 0,002 AU	0,0238 ± 0,0004 AU
i	82,5°± 18,16°	86,0° ± 1,3°
b	0,693 ± 1,75	0,31 ± 0,105
Parametri orbitali di WASP-103b		
Parametri	Dati ottenuti all'osservatorio di Carona	Dati della letteratura
R_{pianeta}	1,31 ± 0,79 raggi di Giove	1,528 ± 0,073 raggi di Giove
P	0,68 ± 0,14giorni	0,925542 ± 0,000019 giorni
a	0,016 ± 0,002 AU	0,01985± 0,00021 AU
i	80,3°± 26,9°	86,3° ± 2,7 °
b	0,41 ± 1,16	0,19 ± 0,13

Ringraziamenti

Si ringrazia per la collaborazione, l'aiuto e il supporto: Cretton Nicolas, Fumagalli Franceso, Mastropietro Chiara, Cenadelli Davide, Venzi Mattias, Gaspani Adriano, Giuliani Gianluca e Vicenzi Vania che ci hanno accompagnato alla conclusione del documento presentato.

Appendice 1 Condizioni per la vita evoluta

Pamela Conrad, una ricercatrice della NASA, ha cercato di elencare quali siano le caratteristiche necessarie perché un pianeta possa ospitare vita evoluta. La distinzione tra possibilità di ospitare vita e possibilità di ospitare vita evolutaè necessaria, poiché molti organismi semplici hanno la capacità di sopravvivere in condizioni estreme, basti pensare agli archeobatteri, tra i quali alcuni riescono a vivere a temperature superiori ai 100°C (i termofili) o inferiori ai -10°C (gli psicrofili), temperature che non permetterebbero all'acqua di essere liquida, ma anche in ambienti estremamente acidi o alcalini (come gli acidofili o gli alcalofili).
La Conrad afferma che: "Ci sono tanti elementi che sono indispensabili alla vita evoluta così come la conosciamo noi e devono esserci tutti assieme", qui di seguito ne citeremo solo alcuni:

- Il pianeta deve essere roccioso.
- La presenza di elementi chimici essenziali come il carbonio, l'azoto e il solfuro.
- Si potrebbe teorizzare la presenza di vita complessa anche dalla presenza di altri elementi come l'ossigeno (prodotto sulla Terra dal processo biologico della fotosintesi), il metano (che sulla Terra è prodotto dagli organismi viventi) oppure la presenza di biossido d'azoto (che sulla Terra prodotto dall'attività di una civiltà al nostro grado di evoluzione). Ciononostante la presenza di queste sostanze non implica per forza l'esistenza di vita complessa, poiché la presenza di ossigeno può essere dovuta alla scissione di ossigeno e idrogeno nel vapore acqueo presente nell'atmosfera a causa del bombardamento di raggi ultravioletti. Il metano può essere prodotto anche dalla reazione di rocce vulcaniche con acqua marina. Mentre il biossido d'azoto può essere il risultato di un'intensa attività vulcanica.
- La presenza di un campo magnetico che protegga il pianeta dalle radiazioni cosmiche, le quali distruggerebbero anche le forme di vita più semplici.
- La presenza di un livello atmosferico che riesca a bloccare i raggi ultravioletti che anche essi distruggerebbero la vita anch'essi (per esempio sulla Terra esiste lo strato di ozono che blocca questi raggi).
- La temperatura media del pianeta è estremamente importante, periodi di freddo o di caldo estremo oppure la mancanza di venti rendono difficile l'insorgere della vita.
- Per concludere, la caratteristica più intuitiva, è la presenza d'acqua liquida, questo fatto implica che la temperatura del pianeta sia tra 0°C e 100°C, definendo così una fascia entro la quale si ha questo intervallo di temperatura.

(Bignani, 2015)

Appendice 2 Utilizzo del telescopio di Carona passo per passo

1. Ricerca dei casi possibili di pianeti osservabili da Carona a una certa data

- Per prima cosa collegarsi al sito:
  http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu
- Accedere a *Transit and Ephemeris Service* nella sezione *Tools & Services*

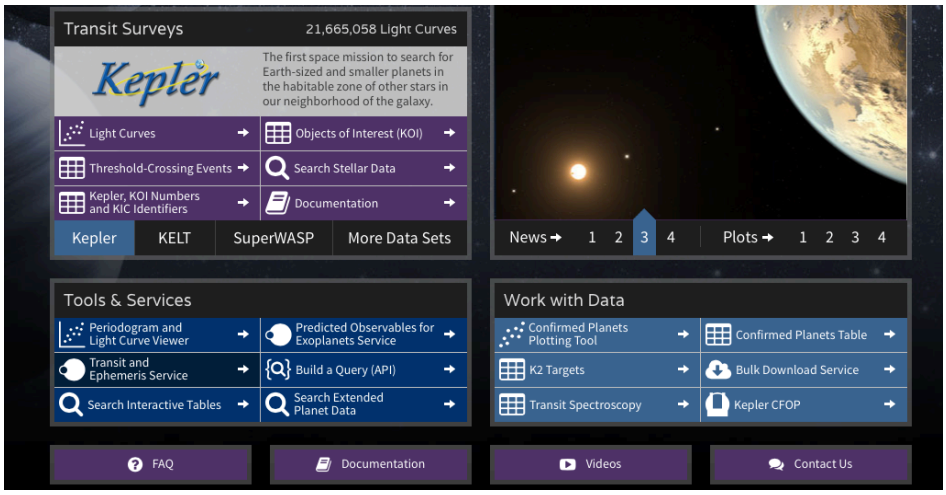

Fig.A1.1 *Pagina iniziale dell'archivio.*

- In *Timespan* impostare la durata di un giorno, in *Location* inserire le coordinate terrestri del luogo di osservazione (nel nostro caso latitudine 46 e longitudine 9) e in *Phases* scegliere il transito primario. A questo punto premere *Run*

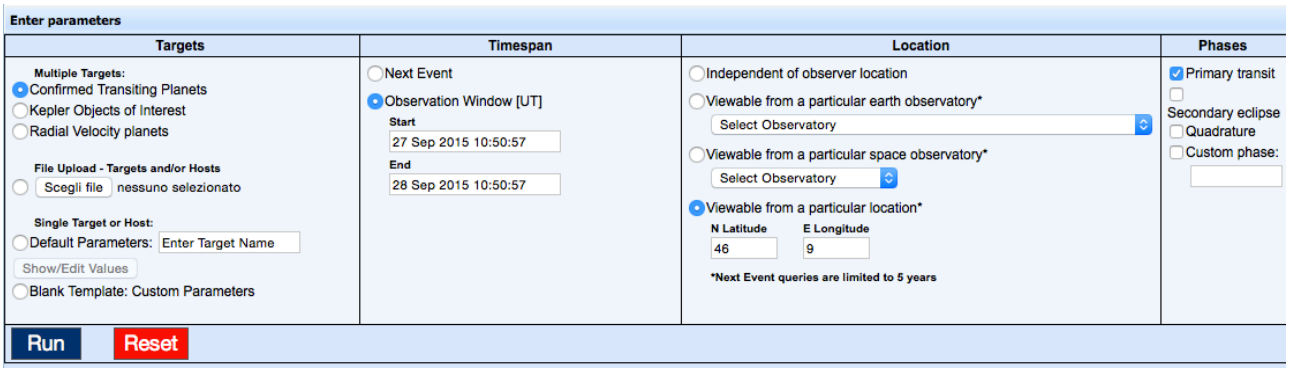

Fig.A1.2 *Scelta dei parametri.*

- A questo punto l'archivio presenta una lista di pianeti osservabili, che va confrontata con la lista creata in precedenza grazie ai fattori di osservabilità

NASA EXOPLANET ARCHIVE
NASA EXOPLANET SCIENCE INSTITUTE

Home | About the Archive | Data | Tools | User Guides & Helpdesk

Transit Service Query Form | Results | Result Log | About the Transit Service

Predicted transit events occuring between 27 Sep 2015 10:50:57 and 28 Sep 2015 10:50:57 for all Confirmed Transiting Planets which are viewable from lat:46/lon:9

Select Columns | Download Table

Transits

Row ID	User Name	Planet Name	Source Table	RA [decimal degrees]	Dec [decimal degrees]	Phase	Period [days]	Transit Duration [hours]	TTV flag	
1		Kepler-398 c	Confirmed Planets	291.468658	40.343853	0.00	11.41941200	3.3408	0	T
2		Kepler-285 b	Confirmed Planets	291.390900	48.065609	0.00	2.63386700	2.0616	0	T
3		Kepler-311 b	Confirmed Planets	282.061279	47.085491	0.00	9.17609200	4.3416	0	T
4		Kepler-398 b	Confirmed Planets	291.468658	40.343853	0.00	4.08142300	2.2872	0	T
5		Kepler-141 b	Confirmed Planets	297.970886	47.731678	0.00	3.10767500	2.2176	0	T
6		Kepler-224 b	Confirmed Planets	290.934296	47.357601	0.00	3.13292400	2.0328	0	T
7		WASP-21 b	Confirmed Planets	347.492706	18.396086	0.00	4.32248200	3.3552	0	T
8		Kepler-14 b	Confirmed Planets	287.708801	47.333050	0.00	6.79012300	6.2184	0	T
9		Kepler-183 b	Confirmed Planets	293.530853	39.315899	0.00	5.68794500	2.2128	0	T
10		Kepler-341 b	Confirmed Planets	289.861572	43.472775	0.00	5.19552800	3.8160	0	T
11		Kepler-41 b	Confirmed Planets	294.513214	45.981644	0.00	1.85555820	2.4336	0	T
12		CoRoT-25 b	Confirmed Planets	280.629669	6.513829	0.00	4.86069000	1.9200	0	T
13		Kepler-202 c	Confirmed Planets	282.973419	41.322006	0.00	16.28249300	2.8536	0	T
14		Kepler-121 b	Confirmed Planets	286.162079	39.677994	0.00	3.17742200	1.4760	0	T
15		WASP-32 b	Confirmed Planets	3.961682	1.200451	0.00	2.71865900	2.4240	0	T

Showing records 1 to 15 of 37 (37 total) Clear Checked Check All Reset Filters

Fig.A1.3 *Lista dei pianeti fornita dall'archivio.*

2. Conversione della classificazione

- accedere al sito: cdsweb.u-strasbg.fr.webloc

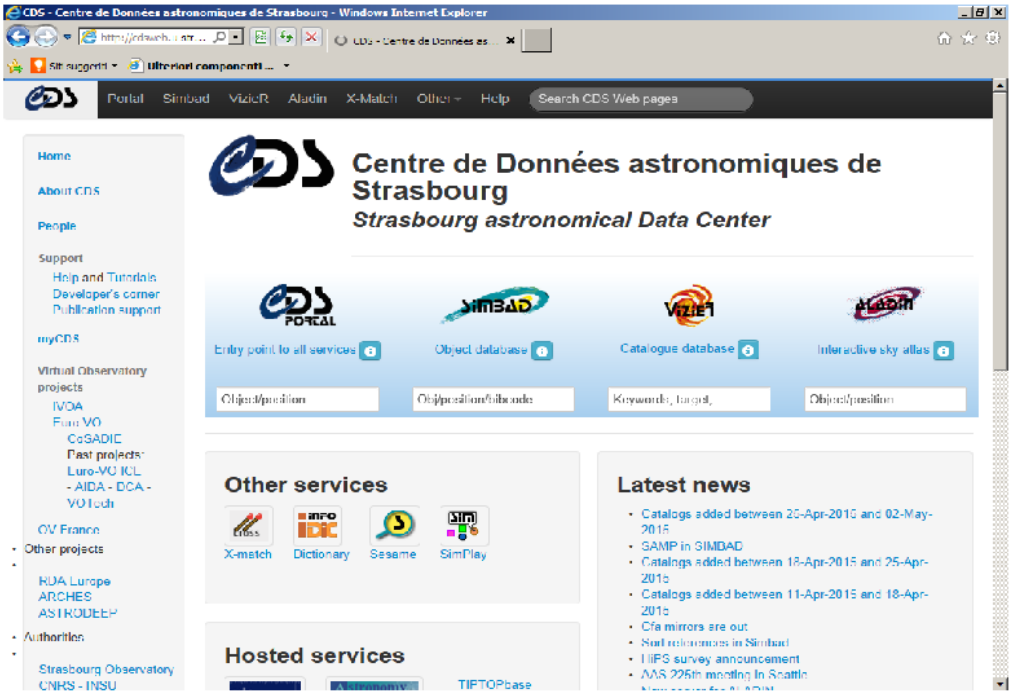

Fig.A1.4 *Pagina iniziale di cds Strasburgo.*

- scegliere SIMBAD
- A questo punto premere su *By identifier* in *Queries*

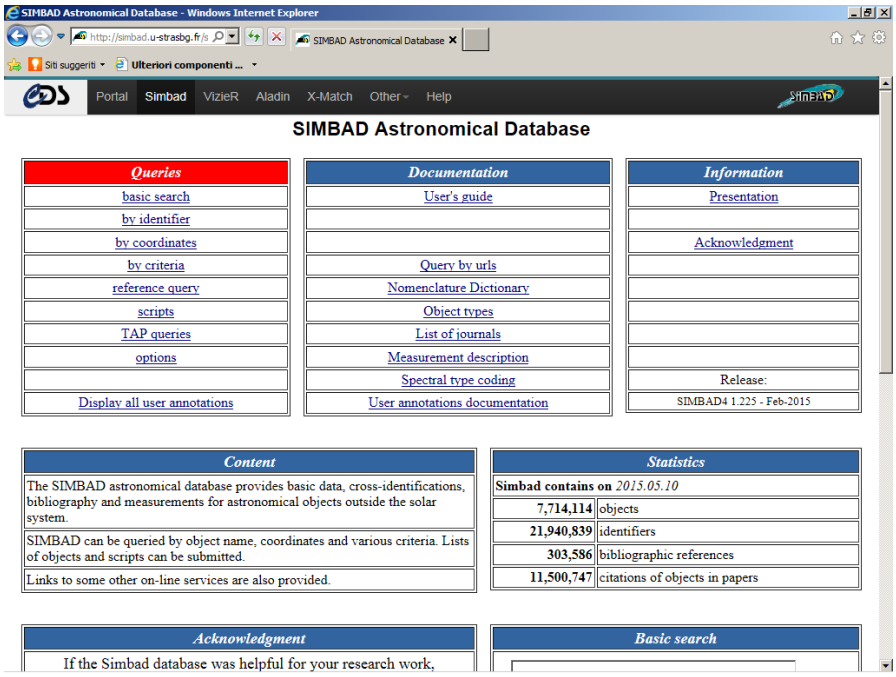

Fig.A1.5 *Pagina iniziale di SIMBAD.*

- In *Identifier* scrivere il nome del pianeta scelto tralasciando la b (nel nostro caso HAT-P-12)

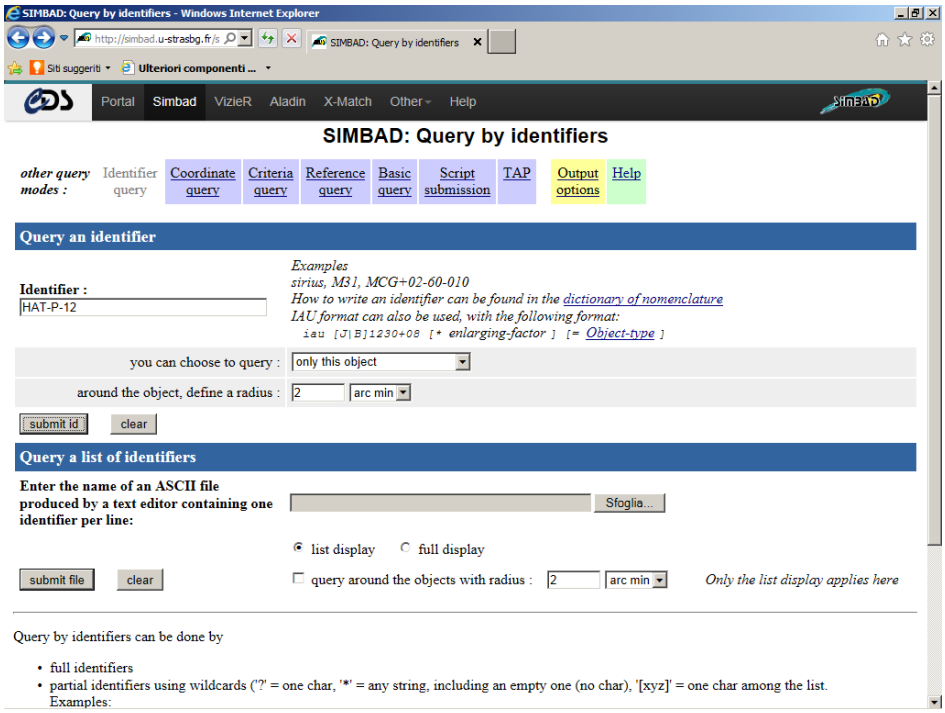

Fig.A1.6 *Nome del pianeta scritto in Identifier.*

- Il dato necessario è il primo scritto in grassetto (nel nostro caso GSC 03033-00706)

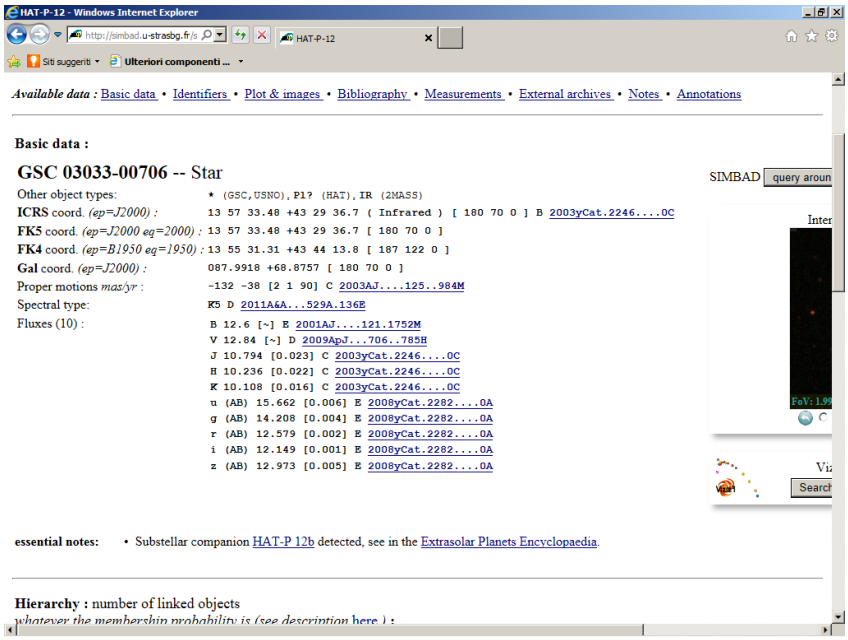

Fig.A1.7 *dati convertiti del pianeta.*

3. Impostazione del telescopio

- Accedere al programma *Sky 6*
- Premere *Edit* e nello spazio *Find* inserire i dati ottenuti nella parte 2
- Premere *Find*

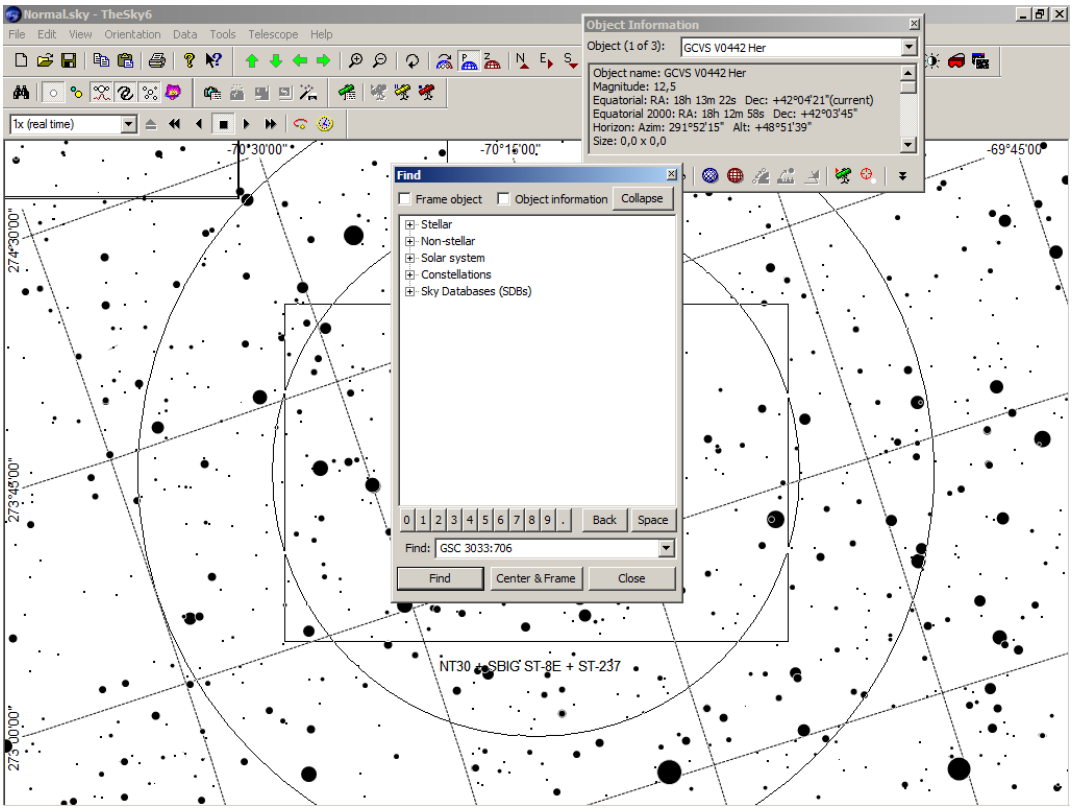

Fig.A1.8 *Spazio Find dove sono stati inseriti i dati.*

- Premere il simbolo del telescopio

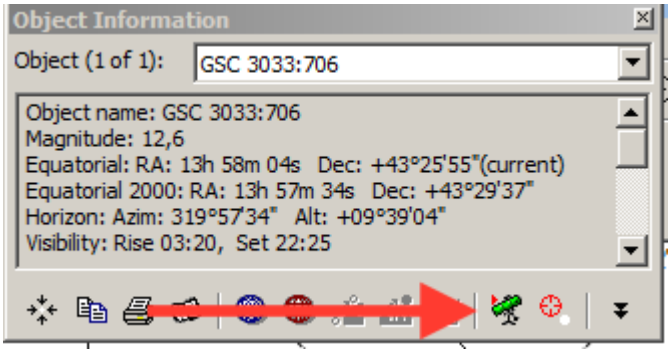

Fig.A1.9 *Simbolo del telescopio.*

- Premere sulla stella al centro per controllare che sia quella corretta

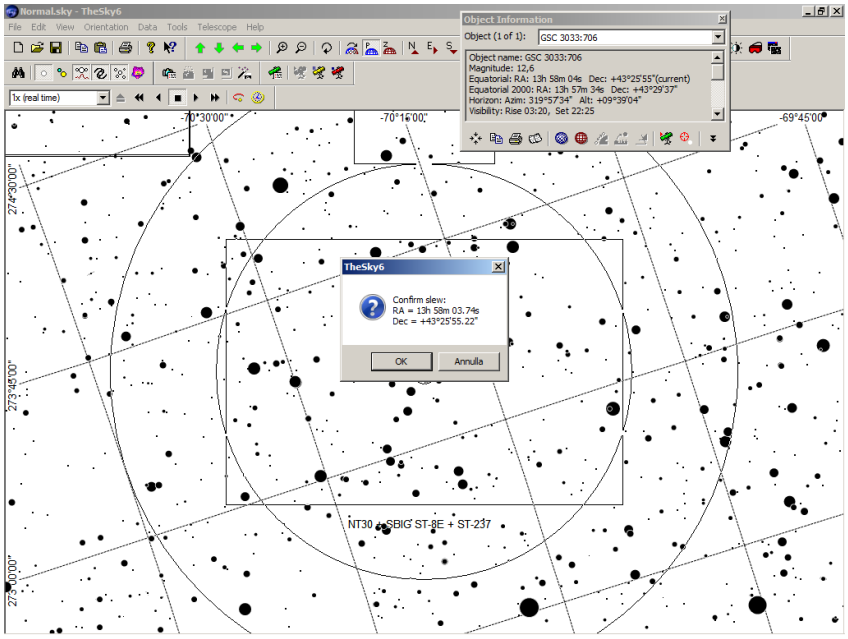

Fig.A1.10 *Controllo della stella.*

- Accedere ora al programma *MaxIm DL Pro 5*
- Premere *Continuous* (impostare 50%) e premere *Start*

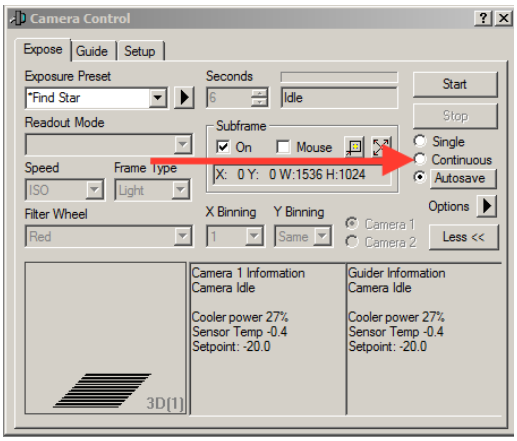

Fig.A1.11 *MaxIm DL Pro 5.*

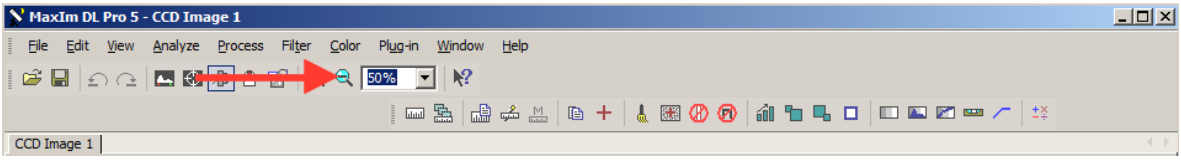

Fig.A1.12 *impostazione del 50%.*

- Cercare la stella confrontando la mappa di *MaxIm DL Pro 5* con la cartina di *Sky 6*
- Quando è stata trovata la stella premere *stop* e poi *autosave*
- Salvare il nome in una cartella dove si inserisce anche la data
- Premere *Start*
- A questo punto il telescopio comincia a lavorare

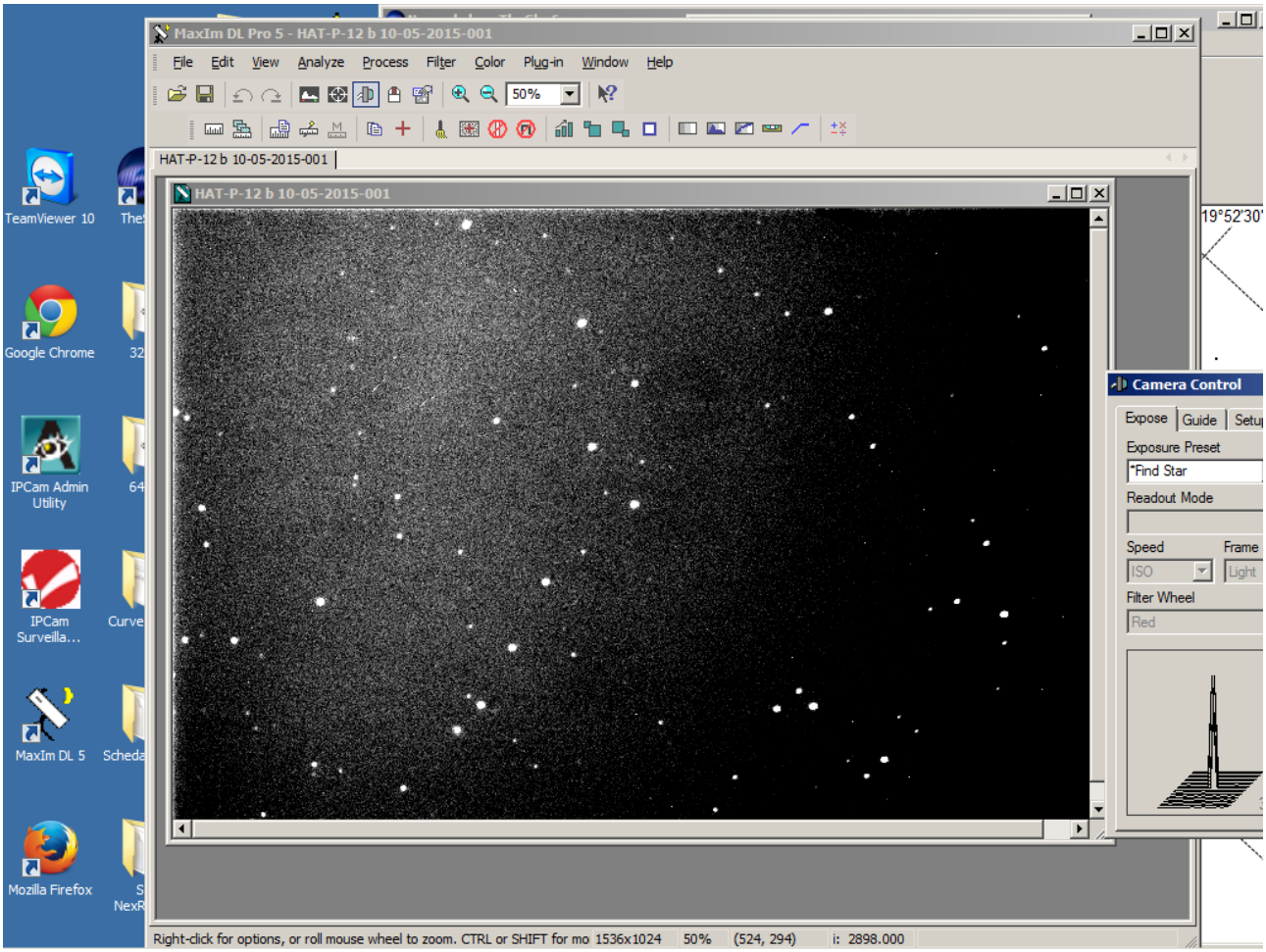

Fig.A1.13 *Prima immagine presa dal telescopio della nostra osservazione di HAT-P-12.*

Appendice 3 Lista dei pianeti che rispettano i parametri dell'osservatorio Calina

Pianeta	**RA**	**DE**	**V(mag)**	**Depth (mmag)**
CoRoT-1 b	06 48 19.17	-03 06 07.78	13,6	24,7
CoRoT-18 b	06 32 41.36	-00 01 53.71	15	21,5
CoRoT-2 b	19 27 06.52	+01 23 01.7	12,57	32,2
CoRoT-6 b	18 44 17.42	+06 39 47.95	13,9	15,1
CoRoT-9 b	18 43 08.81	+06 12 15.19	13,7	16,7
GJ1214 b	17 15 18.94	+04 57 49.7	14,67	16,7
HAT-P-1 b	22 57 47	+38 40 30	10,4	17,1
HAT-P-10/WASP-11 b	03 09 28.54	+30 40 26.0	11,89	25,4
HAT-P-12 b	13 57 33.68	+43 29 37.35	12,8	20,4
HAT-P-17 b	21 38 08.87	+30 29 22.2	10,54	15,1
HAT-P-18 b	17 05 23.13	+33 00 46.8	12,759	18,3
HAT-P-19 b	00 38 04.07	+34 42 42.2	12,9	21,5
HAT-P-20 b	07 27 39.89	+24 20 14.7	11,34	20,4
HAT-P-25 b	03 13 44.48	+25 11 51.2	13,19	20,4
HAT-P-28 b	00 52 00.27	+34 43 42.9	13,03	16,2
HAT-P-32 b	02 04 10.24	+46 41 16.8	11,29	24,4
HAT-P-36 b	12 33 03.96	+44 54 55.3	12,262	20,4
HAT-P-37 b	18 47 11.16	+51 16 08.9	13,23	20,4
HAT-P-43 b	08 35 42.18	+10 12 24.0	13,356	16,5
HAT-P-44 b	14 12 34.56	+47 00 52.9	13,21	19,4
HAT-P-51 b	01 24 15.466	+32 48 38.8	13,44	17,6
HAT-P-54 b	06 39 35.53	+25 28 57.1	13,505	26,5
HATS-1 b	11 42 06.12	-23 21 17.4	12,053	16,2
HATS-6 b	05 52 35.22	-19 01 54.0	15,16	34,2
HD189733b	20 00 43.713	+22 42 39.07	7,67	28,2
HD209458 b	22 03 10	+18 53 04	7,65	16,2
OGLE-TR-113 b	10 52 24	-61 26 48	14,42	24,5
Quatar-1 b	20 13 32	+65 09 43	12,84	20,4
Quatar-2 b	13 50 37.41	-06 48 14.4	13,3	37,4
TrES-1 b	19 04 09.844	+36 37 57.54	12,19	20,8
TrES-2 b	19 07 14	+49 18 59	11,41	16,9
TrES-3 b	17 52 07	+37 32 46	12,04	29,1
TrES-5 b	20 20 53	+59 32 46	13,07	21,5
WASP-1 b	00 20 40	+31 59 24	11,79	16,6
WASP-10 b	23 15 58.23	+31 59 24	12,7	39,4
WASP-104 b	10 42 24.61	+07 36 06.3	11,12	15,8
WASP-110 b	20 23 29.55	-44 03 30.3	12,3	22,5
WASP-112 b	22 37 57.43	-35 09 13.9	13,3	16,1
WASP-12 b	06 30 32.79	+29 40 20.4	11,69	15,1
WASP-17 b	15 59 50.88	-28 03 41.4	11,6	19,4
WASP-19 b	09 53 40.077	-45 39 33.06	12,3	21,5

WASP-2 b	20 30 54	+06 25 46	11,98	21,6
WASP-23 b	06 44 30.50	-42 45 41.2	12,68	21,5
WASP-25 b	13.01 26.46	-27 31 18.9	11,88	20,4
WASP-31 b	11 17 45.35	-19 03 17.3	11,7	16,7
WASP-33 b	02 26 51.08	+37 33 02.5	8,3	15,1
WASP-35 b	05 04 19.56	-06 13 47.2	10,95	19,4
WASP-36 b	08 46 19.30	-08 01 36.7	12,7	21,5
WASP-37 b	14 47 46.62	+01 03 53.4	12,7	19,4
WASP-39 b	14 29 18.43	-03 26 40.20	12,1	21,5
WASP-4 b	23 34 15.06	-42 03 41.1	12,5	19,4
WASP-41 b	12 42 28.49	-30 38 22.8	11,6	21,5
WASP-42 b	12 51 55.62	-42 04 25.2	12,57	17,8
WASP-43 b	10 19 38.01	-09 48 21.9	12,4	28,9
WASP-44 b	00 15 36.76	-11 56 17.4	12,9	18,3
WASP-46 b	21 14 56.86	-55 52 18.1	12,9	20,4
WASP-50 b	02 54 45.14	-10 53 52.93	11,55	21,5
WASP-52 b	23 13 58.76	+08 45 40.6	12	29
WASP-55 b	13 35 01.94	-17 30 12.7	11,8	17
WASP-58 b	18 18 48.25	+45 10 19.1	11,6	15,6
WASP-59 b	23 18 29.54	24 53 21.4	13	18,2
WASP-6 b	23 12 37.75	-22 40 26.1	11,9	23,6
WASP-61 b	05 01 11.91	-26 03 14.9	12,5	15,3
WASP-64 b	06 44 27.61	-32 51 30.25	12,29	16,4
WASP-67 b	19 42 58.51	-19 56 58.4	12,5	19,5
WASP-69 b	21 00 06.19	-05 05 40.1	9,87	19,3
WASP-77 b	02 28 37.22	-07 03 38.45	10,29	18,2
WASP-8 b	23 59 36.07	-35 01 52.9	9,79	15
WASP-80 b	20 12 40.178	-02 08 39.15	11,881	31
WASP-84 b	08 44 25.71	01 51 36.0	10,83	18,1
WASP-85A b	11 43 38.01	06 33 49.4	11.,2	28,4
WASP-89 b	20 55 35.98	-18 58 16.1	13,1	16,1
WASP-98 b	03 53 42.9	-34 19 41.7	13	27,6
XO-1 b	16 02 12	+28 10 11	11,3	17,1

Tabella A.1 La seguente tabella è stata realizzata con Giuliani Gianluca e Vicenzi Vania, che hanno fatto un' analisi degli esopianeti QATAR-1b e HAT-P-19b (Giuliani; Vicenzi, 2016).

Appendice 4 Dimostrazione dell'approssimabilità dell'angolo α e β

Questo appendice serve a mostrare che gli angoli α e β (fig. A2.1) possono essere considerati equivalenti, essendo il parametro *b* molto minore rispetto al parametro *a* e dunque trascurabile.

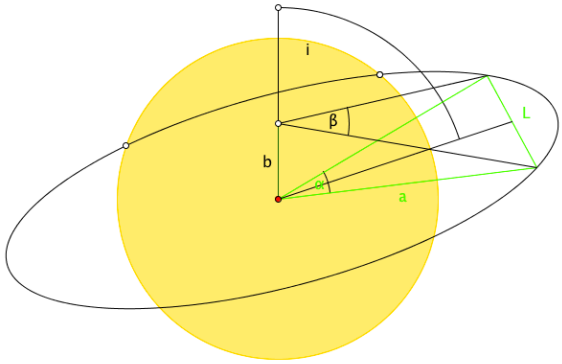

Fig.A2.1 *Triangolo 1(in verde).*

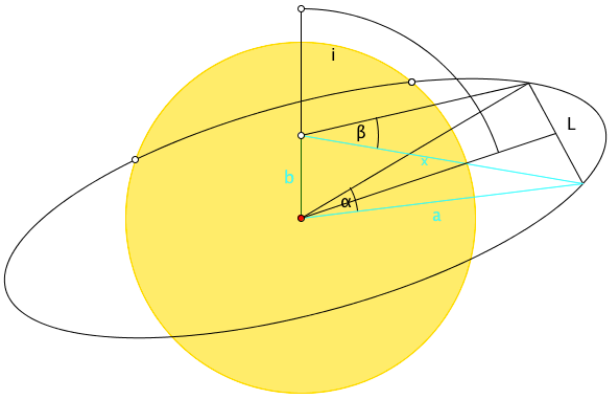

Fig.A2.2 *Triangolo 2 (in azzurro).*

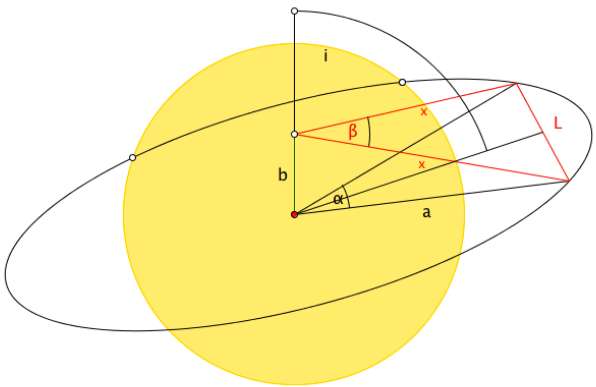

Fig.A2.3 *Triangolo 3 (in rosso).*

Utilizzando il triangolo 1 per ricavare l'angolo α si ottiene l'equazione (teorema del coseno):

$$L^2 = 2a^2 - 2a^2\cos\alpha \qquad \text{[eq.A2.1a]}$$

Si trova dunque α:

$$\alpha = \cos\left(1 - \frac{L^2}{2a^2}\right) \qquad \text{[eq.A2.1b]}$$

Utilizzando il triangolo 2 si ricava x (teorema di Pitagora):

$$x = \sqrt{a^2 - b^2} \qquad \text{[eq.A2.2]}$$

Si può ora ricavare l'angolo β attraverso il triangolo 3 (teorema del coseno):

$$L^2 = 2(a^2 - b^2) - 2(a^2 - b^2)\cos\beta \qquad \text{[eq.A2.3a]}$$

Si trova dunque β:

$$\beta = \cos\left(1 - \frac{L^2}{2(a^2-b^2)}\right) \qquad \text{[eq.A2.3b]}$$

Essendo $a \gg b$, b è trascurabile nell'equazione A2.3b. Si ottiene dunque $\beta = \alpha$.

Appendice 5 Programma Muniwin per l'analisi dei dati

Per analizzare le immagini riprese dal telescopio è stato utilizzato il programma Muniwin.

Creare dark, flat, masterdark e masterflat

Per correggere le immagini prese dal telescopio è necessario tenere conto del Flat fields e del Dark flames.
Il Flat viene usato per eliminare il rumore dovuto all'ottica (es. parti danneggiate o polvere sul telescopio). Per misurarlo si scattano delle foto facendo in modo che il telescopio riceva luce omogenea in ogni suo punto (es. puntando al cielo durante l'alba o al tramonto). Le foto che si ottengono se non sono omogenee mostrano gli errori dovuti all'ottica e con queste si possono correggere i dati.
Il Dark serve invece a correggere il rumore dovuto all'elettronica. Infatti con il tempo alcuni pixel del CCD tendono a danneggiarsi e quindi a portare degli errori nelle immagini.
Per eliminare questo tipo di errore vengono prese alcune fotografie con il telescopio chiuso. In queste immagini si vedono i pixel danneggiati e si può quindi procedere a correggere i dati.
Dark e Flat devono essere sempre misurati dal telescopio alla stessa temperatura a cui sono effettuate le osservazioni e con lo stesso tempo di esposizione.
Per correggere i dati non viene utilizzata una sola fotografia ma si fa una media di di tutte le fotografie prese. Queste medie si chiamano masterdark e masterflat.

Per creare il Masterdark con Muniwin inserire per prima cosa le misurazioni del Dark e convertirle cliccando il visto verde.

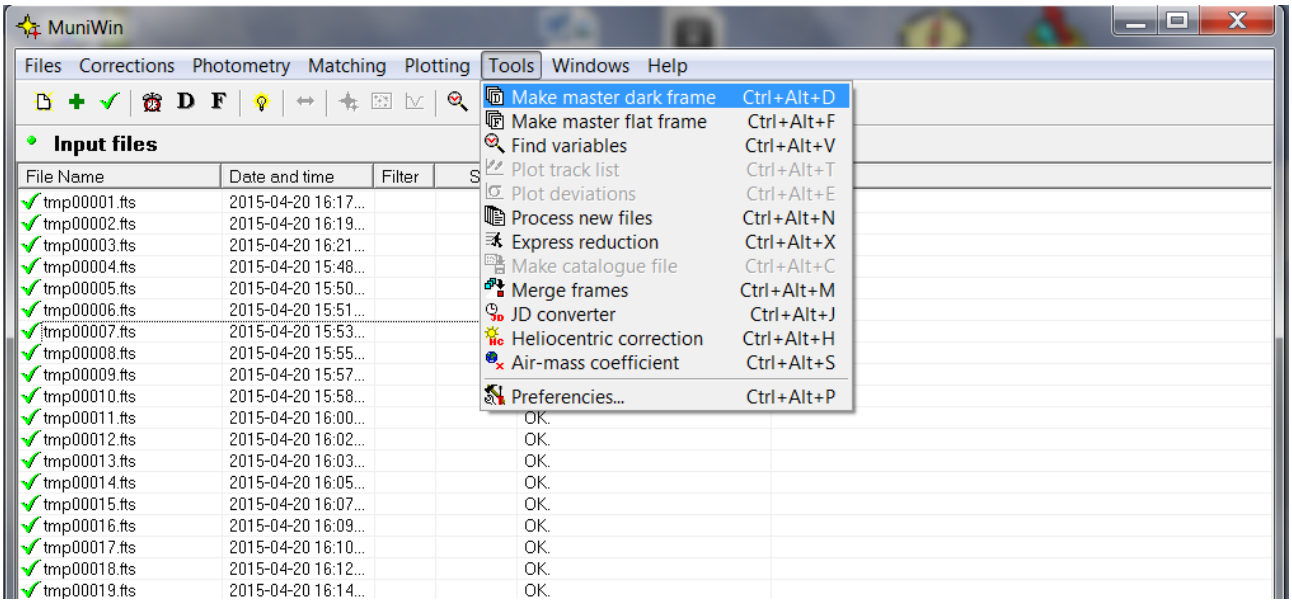

Fig.A4.1 *Tasto per fare il masterflat.*

A questo punto cliccare *Tools* e poi *Make master dark frame* per creare il masterdark.
Fare la stessa cosa anche per il masterflat.

Analisi dei dati

- Inserire i dati di osservazione della stella nel programma
- Premere il visto verde per convertire i dati
- Premere *D* per correggere i dati con il Dark ed *F* per correggerli con il Flat (utilizzare masterdark e masterflat)
- Premere la lampada gialla per compiere la fotometria dei dati
- Premere la doppia freccia verde per allineare tutti i dati

Ricerca della stella

Per trovare la stella variabile osservata nella cartina di *Muniwin*(fig.4), confrontarla con la cartina di http://cdsweb.u-strasbg.fr.
Nella cartina di Muniwin est e ovest sono invertiti rispetto alla cartina del cds, per questo si vedono a specchio.

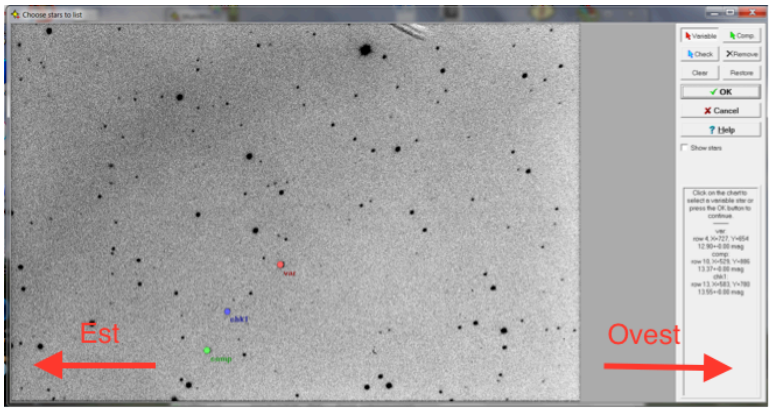

Fig. A4.2 *Cartina di Muniwin.*

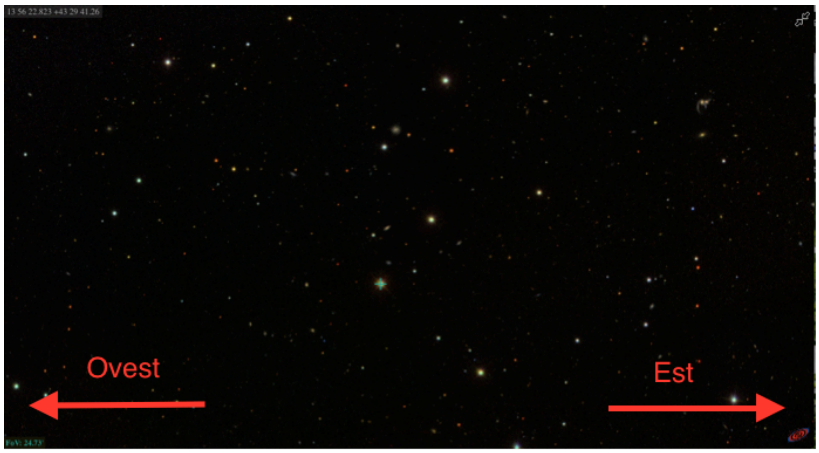

Fig. A4.3 *cartina di http://cdsweb.u-strasbg.fr .*

A questo punto impostare la stella variabile ed una stella di confronto (controllare che non sia una stella variabile). In più impostare una stella check, che serve a controllare che la stella di confronto non vari. Il risultato del confronto con la stella è mostrato nella figura 6.6.

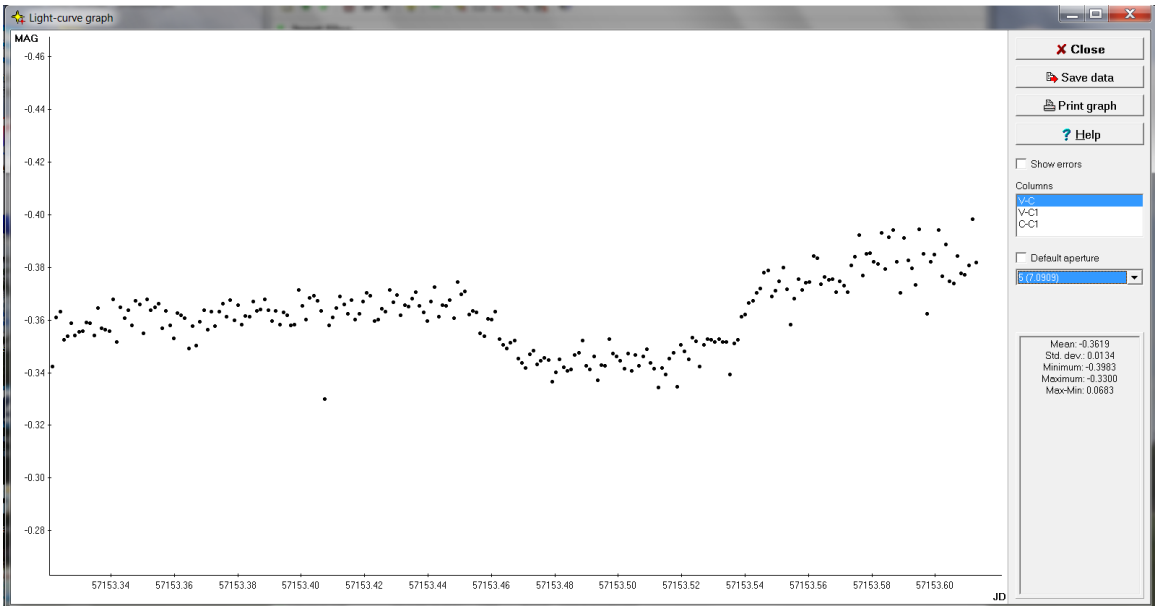

Fig. A4.4 *Grafico V-C.*

A questo punto si possono vedere i tre grafici: V-C (differenza tra la variabile e la confronto), V-C1 (differenza tra la variabile e la check) e C-C1 (differenza tra la confronto e la check). Questo ultimo grafico dovrebbe risultare piatto.
Quando si è soddisfatti del grafico ottenuto premere *Save data* e il programma creerà automaticamente un file contenente tutti i dati sotto forma di lista.

Fonti

Bibliografia

1. Bakos, G., et al. 2012, in "HAT-P-34b–HAT-P-37b: four transiting planets more massive than Jupiter orbiting moderately bright stars.", *The Astronomical Journal*, 144, 14.
2. Bignani, L. 2015, in "Kepler 452b: trovato un pianeta gemello alla Terra?", *Nuovo Orione*, 281, 26.
3. Bond, I., et al. 2004, in "OGLE 2003–BLG–235/MOA 2003–BLG–53: A planetary microlensing event." Ricerca Scientifica, OGLE e MOA, 13.
4. Callejas, J., Salazar, J., Cuartas-Restrepo, P., and Poveda, G. 2014, in "The Habitable Zone of Inhabited Planets.", Ricerca Scientifica.
5. Charbonneau, D., Brown, T., Latham, D., Mayor, M. 1999, in "Detection of Planetary Transits Across a Sun-like Star.", *The Astrophysical Journal Letters,* 529, L45.
6. Chauvin, G., et al. 2004, in "A giant planet candidate near a young brown dwarf - Direct VLT/NACO observations using IR wavefront sensing.", *Astronomy and Astrophysics* 425, L29.
7. Espinoza, N., Jordan, A. 2015, in "Limb darkening and exoplanets: testing stellar model atmospheres and identifying biases in transit parameters", MNRAS ,450, 1879-189
8. Gaudi, B. Scott. 2010, in "Exoplanetary Microlensing." Ricerca Scientifica, Ohio State University.
9. Gillon, M., et al. 2014, in "WASP-103 b: a new planet at the edge of tidal disruption.", *Astronomy & Astrophysics,* 562, 4.
10. Giuliani G., Vicenzi V. 2016, in Lavoro di maturità sotto la supervisione del professor Cretton N.
11. Guillochon, J., Ramirez-Ruiz, E., Lin, D. 2011, in "Consequences of the ejection and disruption of giant planets.", *The Astrophysical Journal* 732, 18.
12. Hadhazy, A. 2015, in "Worlds of pure imagination.", *New Scientist*.
13. Hartman, J., et al. 2009, in "HAT-P-12b: A low-density sub-saturn mass planet transiting a metal-poor K dwarf.", *The Astrophysical Journal* 706,785.
14. Hébrard, G. 2003, in "Evaporation rate of hot Jupiters and formation of Chthonian planets.", eds J.-P. Beaulieu, A. Lecavelier des Étangs, C. Terquem, Extrasolar Planets: Today and Tomorrow, ASP Conference Proceedings, 321, Institut d'astrophysique de Paris, France, 2003.
15. Konacki, M., Torres, G., Jha, S., Sasselov, D. 2003, in "An extrasolar planet that transits the disk of its parent star.", *Nature,* 421, 507.
16. *Mayor; et al. 2003, in "*Setting New Standards With HARPS.", *ESO Messenger,* 114, 20.
17. Mayor, M., Queloz D. 1995, in "A jupiter-mass companion to a solar-type star.*",* Nature, 378, 355.
18. Muterspaugh, M., et al. 2010, in "The PHASES differential astrometry data archive. V. Candidate substellar companions to binary systems." *The Astronomical Journal,* 140, 1657.
19. Odunlade, A. 2010, in "Treansiting exoplanets:characterisation in the presence of stellar activity", tesi di dottorato, detection and characterisation of exoplanets under the supervision of Dr Suzanne Airgrain, University of Exeter.
20. Otto Struve, 1952, in "Proposal for a project of high-precision stellar radial velocity work*",* The Observatory, 72, 199.
21. Papaloizou, J., Terquem, C. 2005, in "Planet formation and migration*",* Rept.Prog.Phys, 69, 119.
22. R.J. Vanderbei, R., Kasdin, N., Cady, E. 2007, in "Optimal Occulter Design for Finding Extrasolar Planets.", Astrophysical journal 665, 794. Quintana, E.; et al. 2014, in "An Earth-sized Planet in the Habitable Zone of a Cool Star.", *Science* 344, 277.
23. Rudy, P., Greskovic, P. 2004, in *eso.org*. https://www.eso.org/public/outreach/eduoff/cas/cas2004/casreports-2004/rep-228/ (consultato il giorno 14.07.2015).
24. Sackett, P. 1999, in "*Searching for Unseen Planets via Occultation and Microlensing*, Planets Outside the Solar System: Theory and Observations", Boston: Kluwer Academic Publishers, 189.

25. Seager, S. 2010, in "Exoplanets.", The Arizona Board of Regents.
26. Seager, S., Mallén-Ornelas, G. 2003, in "A Unique Solution of Planet and Star Parameters from an Extrasolar Planet Transit Light Curve.", The Astrophysical Journal 585,1038.
27. Traub, W., Oppenheimer, B. 2010, in "Direct Imaging of Exoplanets." eds S. Seager, in "Exoplanets", 111-136.

Sitografia

i. http://www.planetary.org/blogs/guest-blogs/2014/0701-the-habitable-zone-of-inhabited-planets.html
ii. http://www.markelowitz.com/HZ.html
iii. kepler.nasa.gov/.webloc
iv. http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/cgi-bin/DisplayOverview/nph-DisplayOverview?objname=Kepler-186+f&type=PLANET+HOST
v. http://www.eso.org/public/archives/presskits/pdf/presskit_0005.pdf
vi. http://kepler.nasa.gov/Mission/QuickGuide/
vii. http://lasp.colorado.edu/education/outerplanets/exoplanets.php
viii. http://kepler.nasa.gov/science/about/RelatedScience/capabilitiesOfVariousPlanetDetectionMethods/
ix. http://strangenewworlds.jimdo.com/pianeti-extrasolari/metodi-di-detezione/
x. http://exoplanet.eu/catalog/
xi. http://exep.jpl.nasa.gov/stdt/Exo-S_Starshade_Probe_Class_Final_Report_150312_URS250118.pdf
xii. http://planetquest.jpl.nasa.gov/video/15
xiii. http://sci.esa.int/darwin/29719-how-nulling-interferometry-works/
xiv. http://www.planetary.org/explore/space-topics/exoplanets/direct-imaging.html?referrer=https://www.google.ch/
xv. http://www.daviddarling.info/encyclopedia/R/radial_velocity_method.html
xvi. http://w.astro.berkeley.edu/~kclubb/pdf/RV_Derivation.pdf
xvii. http://www.planetary.org/explore/space-topics/exoplanets/radial-velocity.html
xviii. http://sci.esa.int/darwin/29719-how-nulling-interferometry-works/
xix. http://zuserver2.star.ucl.ac.uk/~ingo/Lecture_Notes_files/lect10.pdf
xx. http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Gaia/Gaia_overview
xxi. https://www.eso.org/public/outreach/eduoff/cas/cas2004/casreports-2004/rep-228/
xxii. http://www.planetary.org/explore/space-topics/exoplanets/microlensing.html
xxiii. https://www.cfa.harvard.edu/news/archive/pr0301.html
xxiv. http://www.staff.science.uu.nl/~gent0113/venus/venus_text17.htm#1639
xxv. http://www.tls-tautenburg.de/research/artie/lectures/transits_SS12.pdf
xxvi. http://astro.ukho.gov.uk/nao/transit/V_1631/
xxvii. http://cheops.unibe.ch/cheops-mission/executive-summary/
xxviii. http://paroledilettere.com/l/la-massa-daria-meteorologia-climatologia-astronomia.php
xxix. http://exoplanet.eu/catalog/hat-p-12_b/
xxx. http://exoplanet.eu/catalog/hat-p-19_b/
xxxi. http://exoplanet.eu/catalog/hat-p-36_b/
xxxii. http://exoplanet.eu/catalog/wasp-103_b/
xxxiii. https://it.wikipedia.org/wiki/Telescopio_riflettore

Immagini

Immagine di copertina: http://odkrywcy.pl/query,Kepler,szukaj.html?smg4sticaid=6162f9
Fig.1.1a: http://www.markelowitz.com/HZ-Page4.png
Fig.1.1b: http://www.markelowitz.com/HZ-Page4.png
Fig.1.2, 1.3, 1.4: http://kepler.nasa.gov

Fig. 1.5: https://www.newscientist.com/article/mg22730390-600-5-alien-worlds-weirder-than-any-we-have-found-so-far/
Fig.2.1a: http://inspirehep.net/record/817467?ln=it
Fig.2.1b: http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu
Fig. 2.2: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/05/2M1207b_-_First_image_of_an_exoplanet.jpg/540px-2M1207b_-_First_image_of_an_exoplanet.jpg
Fig.2.3a: http://nexsci.caltech.edu/workshop/2015/talks/Sagan_Meadows_direct_imaging.pdf
Fig2.3b: http://sci.esa.int/darwin/29719-how-nulling-interferometry-works/
Fig.2.4:http://planetquest.jpl.nasa.gov/system/media_files/binaries/89/original/Queloz_and_Mayor_s.jpg?1438272218
Fig.2.5:https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/ee/51_Peg_b_rv.jpg/220px-51_Peg_b_rv.jpg
Fig.2.6:http://thefutureofthings.com/upload/items_images/radial-velocity-method_11537.jpg
Fig.2.7: http://star-www.st-and.ac.uk/~kdh1/esp/esp02c.pdf
Fig.2.8:http://www.ezizka.net/astronomy/lessons/topicslesson15/graphics/extrasolar_planet_detection_astrometric.gif
Fig.2.9:http://www.astrobio.net/images/galleryimages_images/Gallery_Image_11206.jpg
Fig.2.10a:https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/63/Warszawskie_Obserwatorium_Południowe.jpg/220px-Warszawskie_Obserwatorium_Południowe.jpg
Fig.2.10b: http://www.phys.canterbury.ac.nz/moa/
Fig.2.11: https://www.eso.org/sci/activities/santiago/projects/PlanetaryGroup/science.html
Fig.2.12:http://www.sun.org/encyclopedia/exoplanets
Fig.3.1: www.giocomania.org/pagin#220B7D
Fig.3.2:https://it.wikipedia.org/wiki/Ascensione_retta
Fig.3.3:http://www.lightfrominfinity.org/Astronomia%20pratica%20per%20neofiti/Astronomia%20pratica%20per%20neofiti.htm
Fig.5.6: Alapini Odunlade, *Treansiting exoplanets:characterisation in the presence of stellar activity*, tesi di dottorato, detection and characterisation of exoplanets under the supervision of Dr Suzanne Airgrain, University of Exeter, 2010.