

Caccia agli esopianeti tramite il metodo del transito

V. Vicenzi¹, G. Giuliani¹

sotto la supervisione di N. Cretton² e F. Fumagalli³

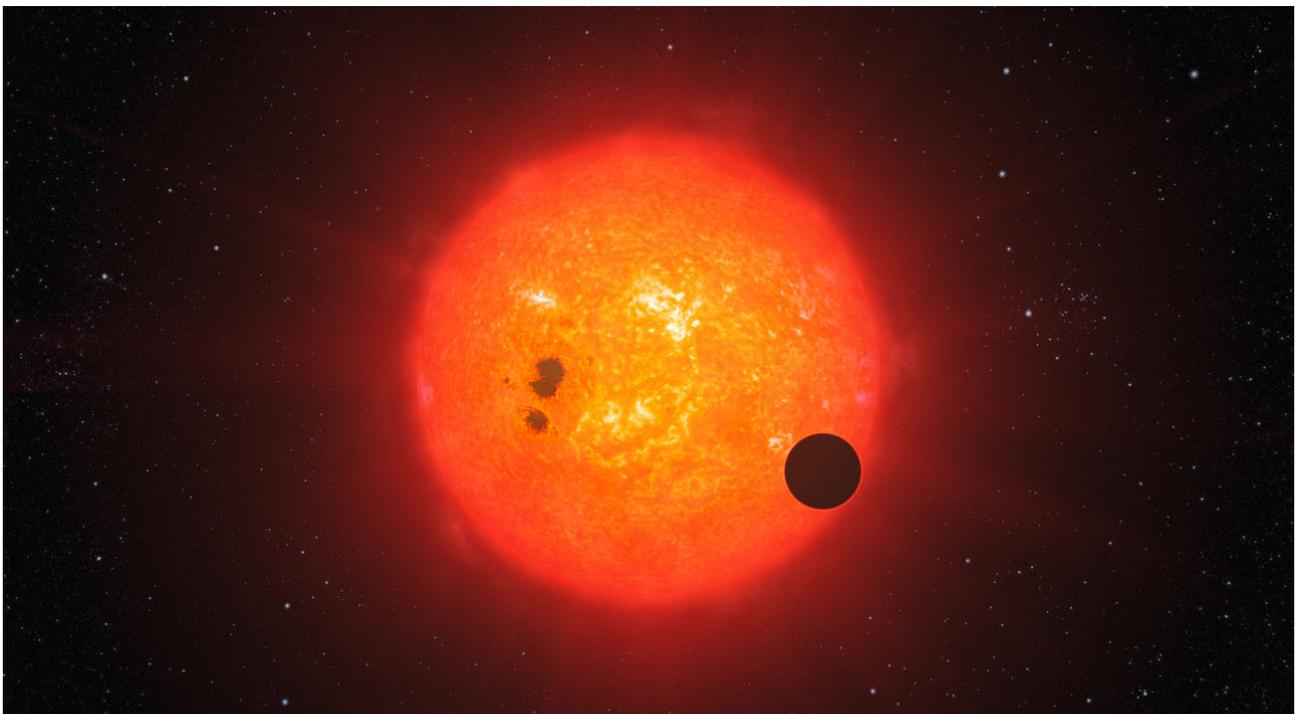
con la collaborazione di D. Cenadelli⁴.

¹. Studente al LiLu2, indirizzo scientifico, Savosa

². Insegnante al LiLu2, laureato in astrofisica/astronomia, Università di Ginevra

³. Osservatorio Calina, 6914 Carona, Svizzera

⁴. Osservatorio astronomico della regione autonoma della Val d'Aosta, 11020 Nus (Aosta), Italia



Abstract

In questo lavoro verrà trattata la ricerca degli esopianeti, cioè di pianeti che si trovano al di fuori del nostro sistema solare. Si è pervenuti ad una ricerca in questo ambito per il forte interesse in astronomia e per il fermento della ricerca nell'ambiente astronomico in questo campo, essendo di interesse per più branche della fisica, e non solo (geologia, biologia in particolar modo). Il gruppo di lavoro ha lavorato su questo tema utilizzando il metodo di determinazione di esopianeti del transito primario, questo negli ultimi anni ha ottenuto buonissimi risultati anche e soprattutto grazie al telescopio spaziale Kepler. Le osservazioni effettuate hanno permesso di analizzare HAT-P-19b e QATAR-1b. Oltre alla parte di analisi dei due esopianeti saranno trattati anche aspetti storici (storia della ricerca di esopianeti, ricerca attuale) e aspetti teorici (presentazione degli altri metodi, struttura del lavoro e delle osservazioni).

“Siamo tutti nel fango, ma alcuni di noi guardano le stelle”

Oscar Wilde, Lord Darlington, atto terzo

Sommario

Introduzione	5
I. Storia delle ricerche degli esopianeti.....	6
2. Metodi usati per scoprire gli esopianeti.....	7
2.1 Metodo diretto	7
2.2 Metodo delle velocità radiali	8
2.3 Metodo della lente gravitazionale	10
2.4 Metodo dell'astrometria	11
2.5 Metodo del transito	12
3. Pianeti abitabili.....	13
3.1 Zona di Goldilocks	13
3.2 Esiste la vita nell'universo?	14
3.2.1 L'equazione di Drake.....	15
3.2.2 Messaggio di Arecibo.....	15
3.3 Kepler.....	16
4. Tassonomia degli esopianeti.....	17
5. Telescopio.....	18
5.1 Telescopi rifrattori.....	18
5.2 Telescopi riflettori.....	19
6. Osservazione.....	20
6.1 Clima e airmass.....	20
6.2 Consultazione delle liste dei transiti	21
6.2.1 Giorni giuliani	22
6.3 Ubicazione della stella	22
6.3.1 Coordinate equatoriali.....	22
6.3.2 Posizionamento del telescopio.....	25
6.4 Il lavoro del telescopio	25
6.4.1 Osservatorio Calina.....	25
6.4.2 Avvio dell'osservazione.....	26
6.4.3 Magnitudine e flusso.....	27
6.5 Analisi dei dati tramite fotometria.....	28
6.5.1 Fotometria	29
6.5.2 Calibrazioni: dark frames e flat fields	29
6.5.3 Coordinamento	31
7. Derivazione parametri orbitali e dimostrazione pratica	32
7.1 Prologo	32
7.1.1 Calcolo generale dell'incertezza assoluta	32
7.1.2 Limb darkening.....	32
7.2 Massa e raggio stellare	34
7.2.1 Calcolo generale della massa e del raggio stellare.....	34
7.2.2 Massa e Raggio stellare di Qatar-1	35
7.3 Profondità del transito	36
7.3.1 Calcolo generale della profondità del transito	36
7.3.2 Profondità del transito di Qatar-1b.....	36
7.4 Raggio dell'esopianeta.....	38
7.4.1 Calcolo generale del raggio dell'esopianeta	38
7.4.2 Il raggio dell'esopianeta di Qatar-1b	39
7.4.3 Calcolo generale del raggio dell'esopianeta tramite il limb darkening	40
7.4.4 Raggio dell'esopianeta di Qatar-1b tramite il limb darkening	40
7.5 Parametro d'impatto	41
7.5.1 Calcolo generale del parametro d'impatto.....	41
7.5.2 Parametro d'impatto di Qatar-1b	45
7.6 Raggio, periodo e angolo orbitale.....	46
7.6.1 Calcolo generale del raggio, del periodo e dell'angolo orbitale	46
7.6.2 Raggio orbitale, periodo e angolo orbitale di Qatar-1b.....	48

8. Analisi di Qatar-1b	50
8.1 Parametri orbitali di Qatar-1b	50
9. Analisi di HAT-P-36b	51
9.1 Parametri orbitali di HAT-P-36b	51
10. Analisi di HAT-P-19b	53
10.1 Osservatorio Astronomico della Regione Autonoma Valle d'Aosta	53
10.2 Parametri orbitali di HAT-P-19b	53
Conclusioni	56
11.1 Ringraziamenti	57
Fonti	58
12.1 Sitografia	58
12.2 Bibliografia	58
12.2.1 Libri	58
12.2.2 Articoli	59
12.3 Immagini	59
12.4 Equazioni	60

Introduzione

L'oggetto di studio del nostro lavoro sono gli esopianeti, ovvero quei pianeti che orbitano attorno a stelle differenti dalla nostra. Il nostro obiettivo è quello di capire come possono essere scoperti e studiati per ricavarne le loro caratteristiche, come la distanza dalla propria stella, le dimensioni ecc. Questo è un importantte soggetto per l'astronomia e per la scienza in generale. Nel corso degli anni l'uomo ha osservato il cielo, l'ha studiato e ogni volta capiva sempre di più quanto quest'universo fosse immenso, forse addirittura infinito. L'uomo, se prima pensava di avere una posizione di predominio nel proprio universo, ora sa di essere solamente una piccolissima parte di questo grande cosmo in cui egli vive. Da qui sorge una delle più affascinanti questioni dell'umanità, siamo soli nell'universo? Attraverso gli studi che si sono fatti soprattutto nel corso degli ultimi secoli abbiamo compreso che noi facciamo parte di un sistema, formato da più pianeti. Abbiamo scoperto anche che questo sistema non è l'unico ad esistere, ma ce ne sono centinaia di miliardi simili al nostro, molti di loro con pianeti orbitanti alla propria stella e tutti contenuti nella nostra galassia, la Via Lattea. Sappiamo anche che di galassie, con le loro stelle e i loro pianeti, ce ne sono miliardi nel nostro universo. Quant'è probabile che noi siamo gli unici esseri a viverci? Davvero poco, ormai è quasi certo il fatto che altre forme di vita ospitino il cosmo, ci mancano solo le prove effettive. La ricerca degli esopianeti vuole proprio dare queste prove. Siamo alla ricerca di pianeti simili alla nostra Terra o che comunque possano ospitare la vita così come la conosciamo, e per ora siamo anche riusciti a trovarne alcuni che potrebbero rispettare le condizioni minime per viverci. Il problema di questo tipo di ricerca è che c'è bisogno della strumentazione adatta e di molto tempo a disposizione per eseguire tutti gli studi necessari. Per questo nel nostro lavoro ci limitiamo a studiare solamente casi di pianeti già conosciuti, di cui sappiamo già le loro caratteristiche cercando di confermarle. Questo ci introduce comunque alla vera ricerca degli esopianeti, abbiamo infatti utilizzato uno dei metodi più usati e più efficaci per la scoperta di altri pianeti, ovvero il metodo del transito. Grazie al nostro lavoro abbiamo capito come funziona questo tipo di esperienze e a quali difficoltà si va incontro in quest'ambito della ricerca scientifica. Siamo riusciti a studiare il transito di due pianeti, HAT-P-19b e Qatar-1b, riuscendo ad ottenere risultati soddisfacenti, confermando l'idoneità dell'osservatorio di Carona per questo tipo di ricerca.

Il nostro lavoro è strutturato principalmente in due parti, teoria e pratica. Nella teoria ci siamo occupati di argomenti generali sugli esopianeti, come la storia della loro ricerca, i vari metodi utilizzati per la scoperta, la loro tassonomia ecc. Nella parte pratica ci siamo occupati dell'osservazione del transito, delle varie problematiche legate ad essa, della derivazione delle formule necessarie all'analisi dei dati da noi ricavati durante le osservazioni e infine del calcolo dei parametri orbitali degli esopianeti osservati.

I. Storia delle ricerche degli esopianeti

“Esistono tanti mondi, o c'è un singolo mondo? Questa è una delle più nobili ed esaltanti domande nello studio della Natura.”

Alberto Magno (I.)

Nel corso della sua storia l'uomo si è sempre chiesto se fosse l'unico essere vivente ad abitare questo universo, se si trovassero, da qualche altra parte, luoghi simili alla nostra Terra dove poter vivere. Oggi, con le nostre tecnologie e la nostra conoscenza, possiamo dare una risposta a queste domande, grazie soprattutto alla ricerca degli esopianeti, ovvero quei pianeti che orbitano attorno ad una stella che non sia il nostro sole. Le prime vere scoperte di esopianeti risalgono solamente ad una ventina di anni fa, ma da sempre c'è stato qualcuno che ha immaginato l'esistenza di altri pianeti al di fuori del nostro. Uno dei primi fu appunto il filosofo dell'antica Grecia Epicuro, che visse all'incirca nel 300 a.C. Egli affermò: *“Ci sono infiniti mondi simili e diversi dal nostro . . . Dobbiamo credere che in tutti i mondi ci siano creature viventi e piante e altre cose che vediamo in questo mondo.”*

Un altro filosofo del XVI secolo, Giordano Bruno, disse: *“Ci sono innumerevoli soli e innumerevoli Terre tutte ruotanti attorno ai loro soli, esattamente allo stesso modo dei sette pianeti del nostro sistema. Noi vediamo solo i soli perché sono i corpi più grandi e luminosi e i loro pianeti rimangono a noi invisibili perché sono più piccoli e non luminosi. Gli innumerevoli mondi nell'universo non sono né peggio né meno abitati della nostra Terra.”* Con questa affermazione Giordano Bruno si avvicinò moltissimo a ciò che sappiamo noi oggi.

Negli anni '80 però, attraverso osservazioni con l'infrarosso, gli astronomi Bradford A. Smith e Richard J. Terrile trovarono un disco di polvere attorno alla stella Beta Pictoris. Finalmente ci si avvicinava alla scoperta dei primi esopianeti (Smith e Terrile, 1984).

Così nel 1992, gli astronomi Alexander Wolszczan e Dale A. Frail, trovarono quelle che sembravano delle prove di sistemi extrasolari (Wolszczan e Frail, 1992). Più precisamente, i due scoprirono 3 possibili pianeti attorno alla pulsar (stella molto densa che ruota molto velocemente derivante da una supernova) PSR1257+12. Questo fenomeno fu rivelato osservando le variazioni delle pulsazioni radio della stella, che indicavano la presenza di effetti gravitazionali. Era la prima vera scoperta di esopianeti. Essendo pianeti orbitanti ad una pulsar, essi ricevono un'immensa quantità di radiazioni ad alta energia pertanto risultarono inospitali per la vita.

Nel 1995 gli svizzeri Michel Mayor e Didier Queloz dell'Università di Ginevra (immagine 1) annunciarono di avere trovato un pianeta che orbita attorno ad una stella simile alla nostra (Mayor e Queloz, 1995). Il metodo usato per farlo è stato quello della velocità radiale. Tre mesi dopo l'annuncio, la scoperta fu confermata da un team americano guidato da Geoffrey W. Marcy e Paul Butler (che trovarono inoltre altri due pianeti). Il pianeta venne nominato 51 Pegasi b, la sua massa corrisponde a circa metà di quella di Giove e la distanza dalla stella è quasi otto volte più piccola della distanza che troviamo tra Mercurio e il Sole. È un pianeta che orbita molto velocemente, infatti il suo periodo di rivoluzione è di poco più di quattro giorni terrestri.

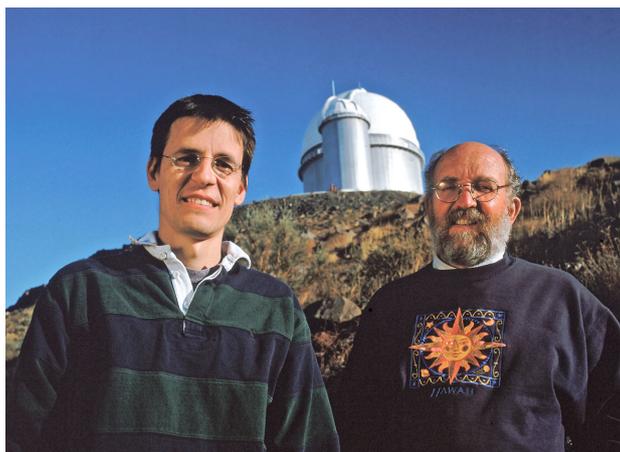


Immagine 1. Didier Queloz e Michel Mayor.

La missione francese CoRoT, è stata lanciata nel 2006 ed è stata la prima missione spaziale dedicata alla ricerca degli esopianeti, la sonda cerca pianeti che passino davanti alle loro stelle, utilizzando quindi il metodo del transito. La prima missione sul campo degli esopianeti fatta dalla NASA è quella di Kepler, lanciata nel 2009. Kepler fece varie scoperte importanti, ad esempio come nella nostra galassia siano più frequenti pianeti di piccole dimensioni. Ha trovato anche molti pianeti simili a Giove, ma caldi e di bassissima densità. Kepler, al momento, è il progetto spaziale che ha trovato più esopianeti; tra i 1887 pianeti confermati ben 1033 gli appartengono (II.). Un'altra importante missione è la missione HARPS, dell'ESO (European Southern Observatory). È stata fondata grazie anche alla collaborazione con la Swiss National Science Foundation il cui capo è Michel Mayor. Il telescopio, di 3,6 metri, si trova a La Silla, in Cile. È lo strumento più accurato per quanto riguarda la misurazione delle velocità radiali, il suo obiettivo è infatti quello di trovare nuovi pianeti con questo metodo (III.). Il Telescopio Nazionale Galileo (TNG) è il più importante telescopio italiano ed è situato nell'osservatorio del Roque de Los Muchachos (La Palma, Isole Canarie). Sul TNG è montato una copia dello spettrografo HARPS, che si chiama HARPS-nord, e studia i pianeti extrasolari (IV.). Inoltre nel 2018 è previsto il lancio del James Webb Space Telescope, successore dell'Hubble Telescope, che studierà per la prima volta piccoli pianeti cercando in essi elementi gassosi presenti nell'atmosfera che potrebbe rendere possibile la vita, in modo da avvicinarci sempre di più alla scoperta di altri esseri viventi al di fuori del nostro pianeta (V.).

2. Metodi usati per scoprire gli esopianeti

È molto difficile individuare un pianeta con un'osservazione diretta. Infatti i pianeti non emanano luce propria come fanno le stelle, ma si limitano soltanto a riflettere la luce della propria stella. Per esempio il nostro Sole è 10^9 volte più luminoso di Giove e 10^{10} volte più luminoso della Terra. In aggiunta, il segnale luminoso di un ipotetico pianeta, lontano sostanzialmente dalla stella e 10 volte più largo di Giove, sarebbe in ogni modo offuscato dal bagliore della stella come si è visto usando uno dei più grandi telescopi del mondo. Per questo motivo vengono usati principalmente i metodi indiretti per la scoperta di pianeti extrasolari.

2.1 Metodo diretto

Intuitivamente il metodo diretto consiste nel cercare di ottenere l'immagine dell'esopianeta. In una giornata luminosa possiamo usare gli occhiali da Sole, il vetro oscurato dell'auto o solamente

posizionare la mano in modo da evitare il riverbero del Sole per vedere altre cose che, in caso contrario, apparirebbero confuse a causa dell'abbagliare del Sole. Gli strumenti usati per osservare direttamente l'esopianeta seguono lo stesso principio. Essi usano varie tecniche per bloccare la luce della stella allo scopo di visualizzare il pianeta (immagine 2).

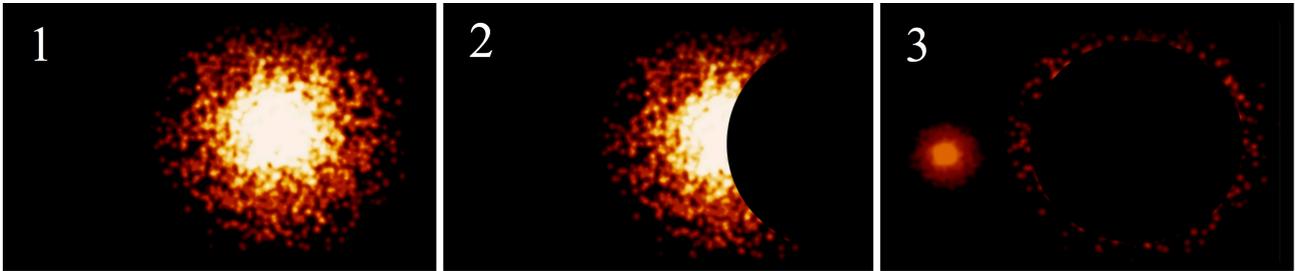


Immagine 2. Alla stella (1) viene applicato un ostacolo in modo da schermare unicamente la luce della stella (2). Bloccando l'arrivo dei raggi della stella è possibile ricevere il segnale luminoso dell'esopianeta, ottenendo una vera e propria immagine dell'astro (3).

L'unico metodo utilizzabile viene chiamato coronografia, viene usato un oggetto all'interno del telescopio dedito al bloccaggio di raggi specifici, esso ferma la luce della stella prima che arrivi allo sviluppatore del telescopio. Il coronografo è quindi inserito all'interno del telescopio e viene usato principalmente per i telescopi terrestri. Un altro metodo è un progetto in via di sviluppo che prevede uno strumento, chiamato Starshade (Ombra di stella), posizionato all'esterno, che va a coprire la zona desiderata, per un telescopio spaziale esso potrebbe essere un'astronave separata, posizionata alla giusta distanza e angolatura per bloccare la luce della stella (VI).

2.2 Metodo delle velocità radiali

Usando questo metodo il criterio d'osservazione non è la magnitudine della stella, bensì il moto della stella che l'osservatore prende in questione. Le stelle possiedono una velocità, chiamata velocità radiale. Se la stella osservata ha una velocità radiale uniforme e regolare, quindi procede su una traiettoria rettilinea (almeno su piccole scale temporali) a velocità costante, nel suo sistema non possiede pianeti; non è presente alcun corpo celeste che vari il centro di massa del sistema e vari la velocità della stella. Infatti, se il movimento analizzato della stella presenterà una variazione periodica (immagine 3), ci indicherà la presenza di pianeti che ruotano attorno ad essa.

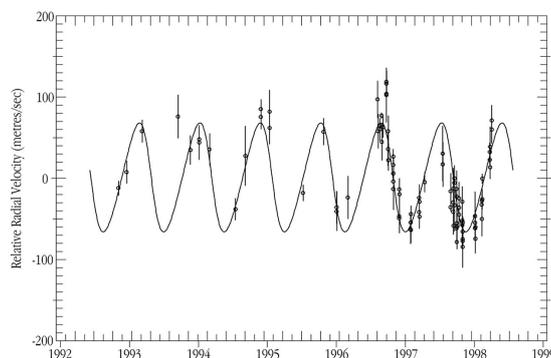


Immagine 3. La velocità radiale di Iota Hor risulta periodica negli anni a causa della presenza di un esopianeta (Iota Hor b).

Nell'immagine 5 possiamo vedere una rappresentazione grezza di ciò che avviene, il pianeta orbita attorno alla propria stella, a causa della sua massa varia il centro di massa del sistema, esso non corrisponde più al centro della stella.

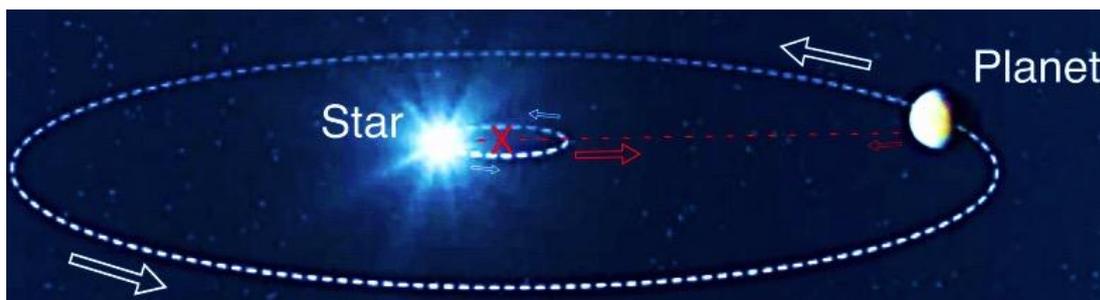


Immagine 4. La massa del pianeta determina un centro di massa che diverge da quello della stella.

La stella orbita attorno al centro di massa come l'esopianeta; questa velocità si somma con il moto naturale dell'astro nello spazio. L'uomo riesce a individuare questo particolare movimento stellare per mezzo dell'effetto Doppler, il quale si manifesta nello spettro dell'astro. L'effetto Doppler avviene proprio quando l'osservatore è in moto rispetto all'oggetto analizzato o viceversa (Bergamaschini, Marazzini e Mazzoni, 2000) e grazie all'ausilio di osservatori molto potenti come La Silla (Cile), possiamo notare questo minuscolo moto analizzando l'oscillazione dello spettro in funzione del tempo. Se la stella si allontana dal nostro punto di vista, lo spettro tende nel tempo a spostarsi verso il rosso, se si avvicina verso il blu (immagine 5).



Immagine 5. Se nello spettrometro il rosso è maggiore rispetto la norma l'astro si allontana da noi, viceversa il corpo celeste si avvicina a noi.

Visto che la stella, durante il suo ciclo, si allontanerà e si avvicinerà avremo un'oscillazione dello spettro in funzione del tempo. In questo modo possiamo dedurre la presenza di un centro di massa differente da quello stellare e di conseguenza la presenza di un corpo celeste: un pianeta extrasolare. Nell'immagine 6 è rappresentato uno schema della misurazione spettroscopica del movimento della stella, causa della presenza del pianeta.

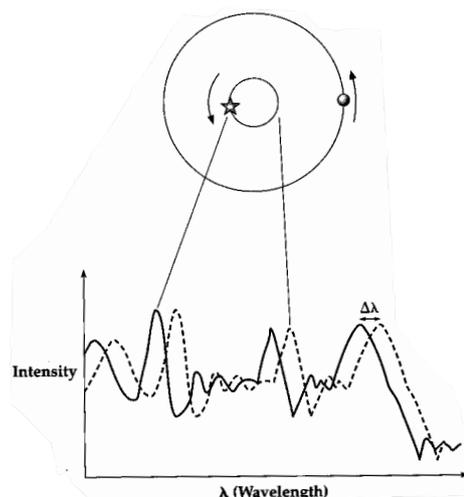


Immagine 6. La lunghezza d'onda della stella quando si avvicina a noi è diversa da quella della stella quando si allontana da noi, tale differenza ($\Delta\lambda$) viene registrata per calcolare la velocità radiale.

Con gli apparecchi più sofisticati si può calcolare dall'osservazione degli spettri della stella la variazione dello spettro ($\Delta\lambda$) e quindi la velocità radiale V (Scharf, 2009). Questo metodo di ricerca consente anche di conoscere la massa dell'esopianeta. La velocità radiale V è legata ad una

funzione sinusoidale $f(T)$ che varia periodicamente nel tempo T in cui la stella compie la sua orbita, ed ad una costante K , che è legata alla massa del corpo celeste il quale orbita attorno alla stella: $V = Kf(T)$. L'equazione 1.1 mostra la formula della costante K , dove G è la costante gravitazionale, T il periodo orbitale, M_* la massa della stella, M_p la massa del pianeta ed e l'eccentricità dell'orbita.

$$K = \sqrt[3]{\frac{2\pi G}{T}} \frac{M_p \sin i}{\sqrt{(M_p + M_*)^2}} \frac{1}{\sqrt{1 - e^2}} \quad (1.1)$$

La massa dell'esopianeta (equazione 1.2) è calcolata in base all'angolo i , l'angolo che si crea fra la linea di vista e il piano orbitale del pianeta.

$$M_p \sin i = \sqrt[3]{\frac{M_*^2 T}{2\pi G}} K \sqrt{1 - e^2} \quad (1.2)$$

Omettendo dalla somma tra le due masse quella del pianeta, perché approssimativamente risulta assai inferiore alla massa della stella e poco influente al calcolo, possiamo isolare e calcolare la massa dell'esopianeta (Papaloizou e Terquem, 2000).

2.3 Metodo della lente gravitazionale

Nel 2004 gli astronomi iniziarono a usare la teoria generale della relatività di Albert Einstein per scoprire l'esistenza di nuovi pianeti. La teoria di Einstein spiega che la gravità di una stella può deviare il cammino della luce di altre fonti luminose come analogamente può deviare il tragitto di qualsiasi oggetto come un pianeta o un astronave. Nell'immagine 7 si osserva come la stella devia la luce di una sua simile tramite la propria massa.

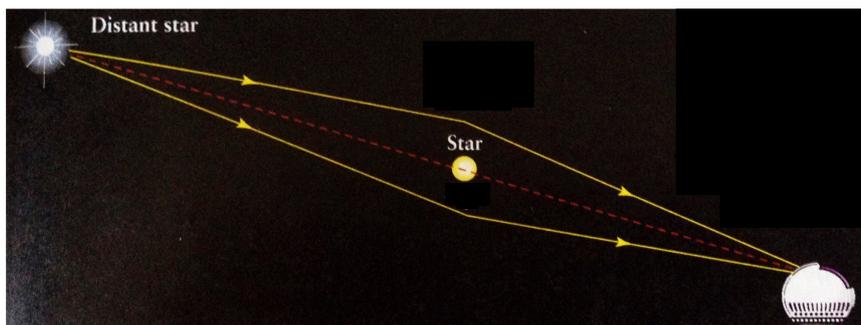


Immagine 7. Se la stella si frappone fra un osservatore della Terra e una stella, ha luogo il fenomeno della lente gravitazionale, un numero maggiore di raggi della stella distante arriva all'osservatore.

Gli astronomi non possono prevedere quando e dove questi fenomeni si possono verificare, di conseguenza essi osservano una larga porzione di cielo per un lungo periodo. Quando registrano una stella, la cui luminosità aumenta, si apprestano ad analizzare i dati per ottenere il massimo delle informazioni che si possano ricavare, ad esempio la dimensione della stella.

Durante il fenomeno, che può durare un mese o più, viene registrato l'aumento della luminosità della stella più distante in funzione del tempo. Se il grafico presenta un'unica cunetta lineare, teoricamente, non possiede alcun tipo di astro orbitante. Ma nel caso fosse presente un esopianeta dal grafico risulterebbe una leggera irregolarità, una protuberanza come si può vedere nell'immagine 8.

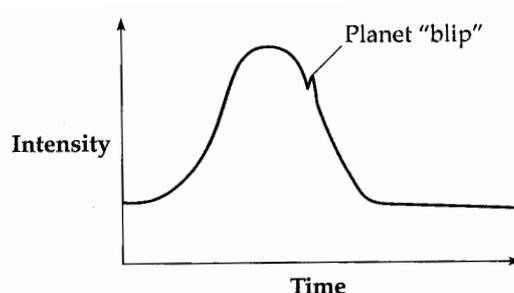


Immagine 8. Il grafico indica il cambiamento di luminosità della stella distante. L'irregolarità del grafico, dovuto alla presenza del blip, dimostra la presenza di un altro oggetto (esopianeta) oltre a quello principale (stella).

Il pianeta contribuisce all'accrescimento della luminosità esattamente allo stesso modo della stella, solamente che esso è limitato dalla sua relativa carenza di massa, infatti la sua influenza è praticamente inconsistente se paragonato alla propria stella. È necessario possedere potenti strumenti d'osservazione e avere pazienza per individuare un tale avvenimento. Per questo motivo sono solo 18 i pianeti scoperti finora con il metodo della lente gravitazionale (VI.).

2.4 Metodo dell'astrometria

Come abbiamo visto nel metodo delle velocità radiali, il pianeta influenza il movimento della stella facendola ruotare attorno ad un centro di massa comune. Nel metodo dell'astrometria gli scienziati cercano direttamente di visualizzare questo determinato moto stellare. Per individuare la presenza di un esopianeta e quindi del movimento della stella, gli studiosi scattano una serie di foto della stella in questione e di altre stelle che le sono vicine. In ogni foto confrontano le distanze fra queste stelle di riferimento e la stella nella quale cercano l'esopianeta. Se la stella analizzata si muove in relazione delle sue vicine in un moto circolare, gli astronomi identificano tale movimento come causa dovuta alla presenza di un pianeta (immagine 10).

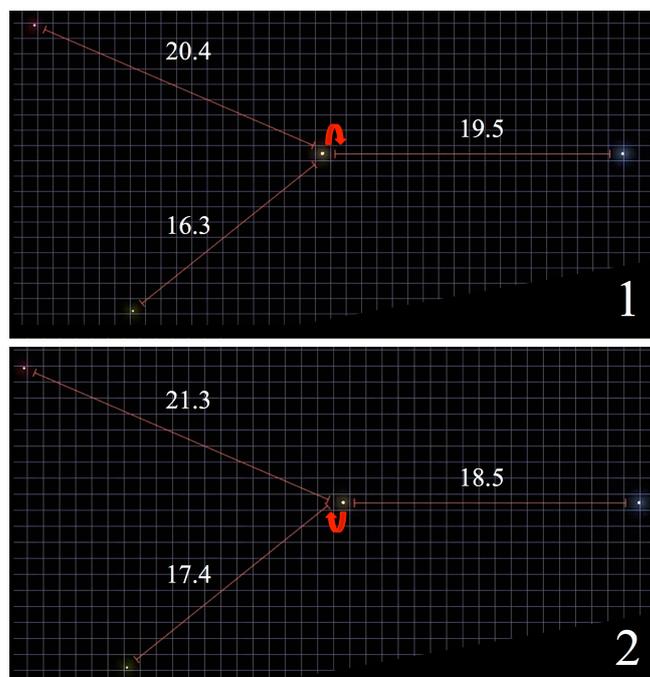


Immagine 9. In un primo momento la stella è stata individuata ad una determinata distanza rispetto le altre tre stelle (1), misurando costantemente si nota un moto circolare (freccie rosse) compiuto dall'astro. Dopo un lasso di tempo la stella si ritrova all'antipodo del punto in cui era partita della sua orbita (2).

L'astrometria è uno dei metodi più difficili, per tale motivo sono stati trovati unicamente due esopianeti con questo metodo. La difficoltà sta nell'individuare la minuscola distanza che la stella percorre (VI.).

2.5 Metodo del transito

Una lampadina necessita, per funzionare bene, deve avere un vetro pulito. Se risulta sporco la luminosità cala dal suo livello massimale. Il metodo del transito sfrutta l'analogia situazione per individuare l'esopianeta. Infatti quando il pianeta si frappone fra la stella e il nostro punto d'osservazione, una porzione di luminosità della stella viene bloccata, proprio come fanno i sedimenti di sporco sul vetro della lampadina. L'osservatore deve misurare la luminosità apparente della stella in funzione del tempo. Se durante l'osservazione essa non resta costante, ovvero la luminosità diminuisce fino ad un certo livello, a dipendenza del volume del pianeta, e dopo un lasso di tempo ritorna al livello di prima (immagine 10), molto probabilmente la stella presenta un esopianeta.

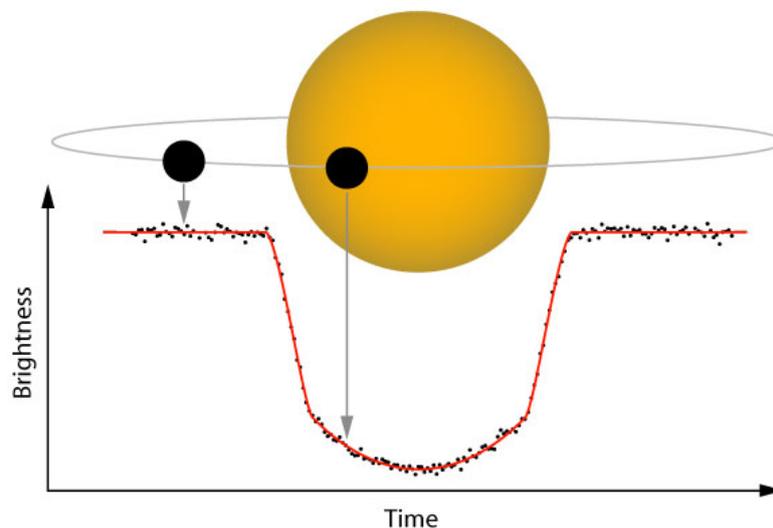


Immagine 10. La luminosità della stella diminuisce a causa del transito dell'esopianeta.

Il grande limite del metodo del transito è che può essere applicato solo per i pianeti con un angolo i prossimo ai 90 gradi. L'esopianeta deve transitare fra la propria stella e l'osservatore, altrimenti non potremmo vedere alcuna diminuzione di luminosità apparente della stella dovuto dal pianeta (immagine 12).

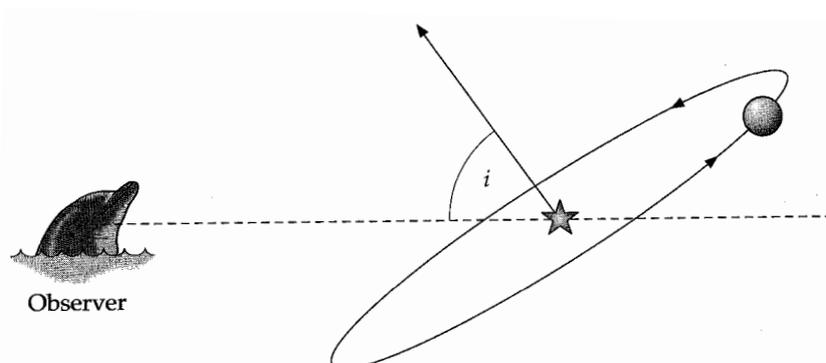


Immagine 11. Per vedere il transito il piano orbitale dell'esopianeta deve stare fra la sua stella e l'osservatore, un angolo i non prossimo ai 90 gradi non rende possibile la visione del transito.

Questo metodo ci permette di conoscere la grandezza del pianeta (diametro) e del periodo orbitale; la distanza fra la stella e il pianeta può essere calcolata tramite la durata del periodo applicando la terza legge di Keplero. Un altro vantaggio è la possibilità di ricavare informazioni circa la composizione, l'atmosfera e la temperatura dell'esopianeta. Quando un pianeta transita davanti alla stella, qualche raggio di luce della stella passa attraverso la sua atmosfera. In questo modo gli scienziati possono analizzare il colore di questa luce ricavando informazioni sulla sua composizione chimica (VI.).

3. Pianeti abitabili

Il motore principale che spinge scienziati di tutto il mondo nella ricerca di esopianeti, è la ricerca di vita al di fuori della nostra biosfera. Finora non si è giunti ad una risposta diretta, i ricercatori hanno formulato ipotesi circa le condizioni ideali per la vita nell'universo. Gli esopianeti sono gli unici potenziali luoghi in cui esseri viventi possano prosperare, ma ci sono molti fattori che il pianeta deve avere affinché la vita si sviluppi, come nell'unico caso conosciuto: la Terra. Una di queste caratteristiche fondamentali è la distanza fra il pianeta e la propria stella, distanza che contraddistingue la zona Goldilocks, nota anche come zona abitabile.

3.1 Zona di Goldilocks

Letteralmente il nome Goldilocks significa Riccioli d'Oro e si ispira alla celebre fiaba in cui la bambina protagonista, Riccioli d'Oro, si infiltra clandestinamente nella casa dei tre orsi e si delizia con la zuppa di Piccolo Orso che non è né troppo calda né troppo fredda (Southey, 1837). Similmente la stessa logica viene applicata alla zona di abitabilità di un'esopianeta. Non deve trovarsi né troppo lontano né troppo vicino dalla stella, in modo da ricevere la giusta energia luminosa e ottenere un pianeta con una temperatura favorevole a mantenere l'acqua nello stato liquido. Il mattoncino fondamentale della vita è l'acqua, grazie ad essa la combinazione di componenti chimici avviene rapidamente ed efficientemente, questa sostanza li scompone, li sparge e li ricombina formando nuovi mattoni biologici, quali proteine e acidi nucleici. Senza l'acqua sembra improbabile esserci vita. Di conseguenza è necessario avere un pianeta che sia alla giusta distanza dalla stella affinché abbia la giusta temperatura che permetta l'acqua di essere liquida e abbia la possibilità di ospitare la vita (Hawking, 2009). Inoltre lo stato dell'acqua dipende anche dalla pressione, perciò la temperatura per l'acqua liquida non è sempre la stessa che noi conosciamo negli altri esopianeti, è probabile che in queste biosfere la pressione dovuta dall'atmosfera o da altri fattori sia maggiore o minore della nostra pressione atmosferica.

Se noi partiamo con il presupposto che la pressione presente sugli esopianeti sia all'incirca identica alla nostra, cioè 1 atm, questo implica per natura che se vogliamo trovare presenza d'acqua liquida la superficie planetaria deve avere una temperatura T_p fra i 273 e i 373 Kelvin. Considerando il pianeta come fosse un corpo nero si può calcolare la distanza ideale per la vita fra il pianeta e la stella (a) in funzione della luminosità intrinseca della stella (L_*) e la temperatura della superficie del pianeta (T_p) (equazione 2).

$$a = \left(\frac{(1 - A)L_*}{16\pi\sigma T_p^4} \right)^{1/2} \quad (2)$$

dove A è l'albedo del corpo celeste e indica il potere riflettente della superficie dell'esopianeta. Dato che la temperatura per l'acqua liquida ha un intervallo di 100 Kelvin, la zona di Goldilocks è delineata da un minimo e da un massimo formando una fascia circostellare abitabile (Scharf, 2009). La distanza ideale dipende dall'irraggiamento della stella, ragione per cui ogni stella avrà la sua determinata zona abitabile. Nell'immagine 12 viene messo in rapporto la fascia abitabile di due sistemi solari, il nostro e quello di Gliese 581 (Bonfils, 2005).

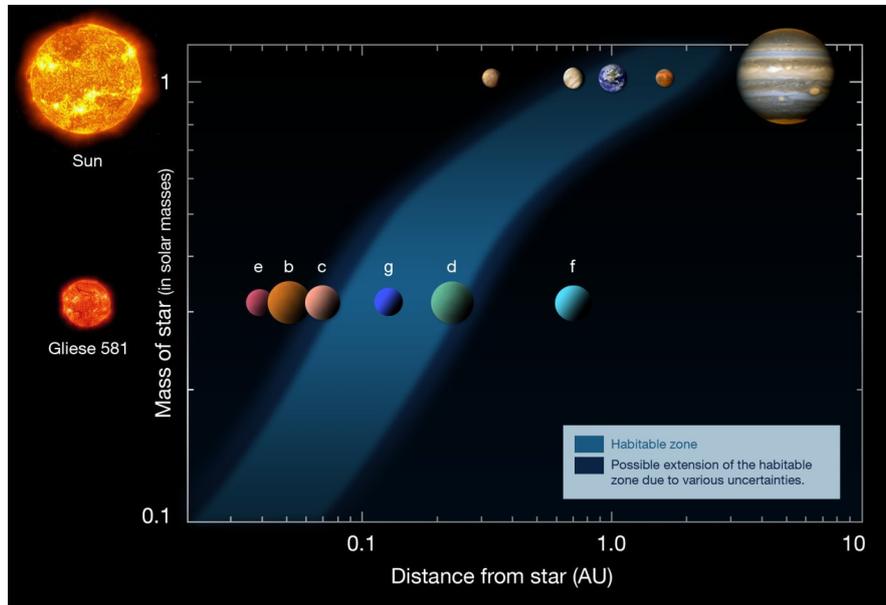


Immagine 12. Il grafico della distanza della zona abitabile in funzione della massa della stella mostra come questo tratto possa variare a dipendenza della stella.

L'immagine mostra anche la disposizione del nostro sistema solare, oltre a noi, anche Marte si trova nella zona di Goldilocks. Allora perchè troviamo la vita rigogliosa solo sulla Terra e non sul pianeta rosso? Il raggio dell'orbita non è l'unico fattore che possa determinare l'esistenza della vita, ci sono molteplici condizioni che un pianeta deve rispettare insieme (Bignami, 2015).

- Blocco dei raggi ultravioletti: di grande importanza è la presenza di un atmosfera in grado di bloccare questi raggi pericolose per la vita.
- Campo magnetico: protegge dalle radiazioni cosmiche, senza di esso è difficile che sopravvivano anche le forme più semplici.
- Temperatura media: periodi troppo freddi o troppo caldi porterebbero all'insorgere della vita, si avrebbe ancora il problema sul mantenimento dell'acqua allo stato liquido.

3.2 Esiste la vita nell'universo?

Fin dalla civiltà più lontana l'uomo si è sempre posto l'interrogativo circa la presenza di altri esseri viventi nell'universo. Una questione che non trova ancora una risposta oggi, ma che lo scibile umano si avvicina sempre di più a trovarla. Grazie allo studio scientifico degli esopianeti siamo in grado di calcolare non solo la media della quantità di pianeti esistenti al di fuori del nostro sistema solare ma anche la probabilità che ci sia vita intelligente nell'universo. Frank Drake era un scienziato impegnato nel campo della ricerca della vita nell'universo tramite la trasmissione o la possibile ricezione di dati per via di onde radio. Il suo lavoro prese in considerazione una moltitudine di ambiti nel campo scientifico, infatti lavorò con chimici, biologi e ingegneri allo scopo di comprendere quale potrebbe essere la via più diretta per scoprire la presenza di vita intelligente nell'universo. Le onde radio risultarono essere il mezzo più rapido, semplice ed efficace

per comunicare con altri possibili esseri viventi. Il frutto di questi studi fu la formulazione di un'importante equazione seguita dal tentativo di comunicare con altre vite intelligenti nell'universo (Lemonick, 2014).

3.2.1 L'equazione di Drake

Nel 1961 Drake scrisse uno scarabocchio sulla lavagna allo scopo di dare una risposta alla domanda quante civiltà potrebbero esserci oltre a noi? Questo scarabocchio, ora conosciuto come l'equazione di Drake, determina il numero di civiltà presenti nella nostra galassia con le quali si possa realizzare un contatto (equazione 3).

$$N = R^* \cdot f_p \cdot N_e \cdot f_l \cdot f_i \cdot f_c \cdot L \quad (3)$$

Si inizia con il tasso di formazione di stelle simili al Sole nella Via Lattea (R^*), si moltiplica con la frazione di stelle che detengono un sistema solare (f_p). Questo risultato viene moltiplicato per il numero di pianeti favorevoli alla vita in media presenti in ogni sistema (N_e), principalmente dei pianeti presenti nella zona di Goldilocks e aventi le dimensioni simili a quelle della Terra. Consecutivamente il tutto viene moltiplicato per la frazione dei pianeti dove la vita esiste, in ogni sua forma (f_l). Poi si moltiplica il risultato con la frazione dei pianeti in cui si sono evolute forme di vita di intelligenza (f_i). Il penultimo passaggio è moltiplicare questo risultato con la frazione di tali forme di intelligenza che hanno sviluppato una conoscenza della tecnologia al punto che sia in grado di trasmettere segnali radio che noi potremmo rivelare (f_c). L'ultimo passo fondamentale è la moltiplicazione con la durata media di vita di tali civiltà tecnologiche (L). Ad esempio se una società avanzata cade in un olocausto nucleare che porta l'estinzione di tale specie, appena pochi decenni dopo lo sviluppo della tecnologia radio, non ci sarebbe più la possibilità di comunicare con essi.

L'equazione è sensata e corretta ma ha un grosso problema: nessuno è a conoscenza del valore di tutte queste frazioni e di tutti questi dati citati precedentemente. Finora gli scienziati hanno potuto stimare con buona precisione i primi tre parametri, prevalentemente tramite la moltitudine di dati ottenuti dal telescopio Kepler. Il resto dei parametri è da definire ancora, sono informazioni che dipendono da molti fattori, alcuni dei quali non verificabili direttamente. Secondo Drake e altri scienziati il risultato finale potrebbe essere compreso tra 50 mila e un milione. Da ricordare che tale previsione si estende solo per la nostra galassia, la Via Lattea, ciò significa che ipoteticamente potrebbero esistere altre civiltà nell'universo da quello che risulterebbe dall'equazione di Drake (Lemonick, 2014).

3.2.2 Messaggio di Arecibo

Vista la buona probabilità di poter comunicare con altre forme di intelligenza, Drake volle rendere pratici i propri studi. Nel 1974 diede inizio alla sua caccia della vita nella nostra galassia usando il radiotelescopio National Astronomy and Ionosphere Center (NAIC), noto anche come Arecibo. Questo telescopio si trova in Puerto Rico ed è il più grande del suo genere. Il progetto era semplice, inviare un messaggio tramite le onde radio; le uniche due questioni che affiorano evidentemente sono afferenti alla scelta della destinazione del messaggio, la quale deve avere buone probabilità che la vita esista, e sulla compitazione di un messaggio ricco di informazioni utili e facilmente comprensibile da esseri totalmente diversi da noi.

Sul primo punto il team di Drake scelse di trasmettere il messaggio in direzione dell'ammasso globulare di Ercole, noto anche come M13; in modo da avere maggiori possibilità di destinare il messaggio a forme di vita intelligenti è stato scelto questo raggruppamento perché è costituito da un numero elevatissimo di stelle. Per la seconda questione Drake creò con il suo team di ricerca un messaggio che possa essere decifrato il più semplicemente possibile, sia in fatto di segnali che di raffigurazioni. Il messaggio di Arecibo è costituito da 1679 bits, questi sono disposti in modo da formare un rettangolo a griglia con 73 righe e 23 colonne, entrambi sono numeri primi e sono gli unici che se moltiplicati fra loro danno come risultato 1679. Questo schema dovrebbe essere comprensibile per le probabili civiltà ultraterrene che potrebbero captare tale messaggio. Un bit può risultare uno o zero e vengono trasmessi alla velocità di 10 bits al secondo, la durata del messaggio vale circa tre minuti. I bit che valgono uno corrispondono alle figure del messaggio.



Immagine 13. Messaggio di Arecibo.

Il messaggio di Arecibo (immagine 13), illustra delle figure, ognuna con un significato. Ad esempio la sequenza di rettangoli e quadrati colorati per comodità in giallo rappresenta il sistema solare ed evidentemente la figura rossa mostra le nostre sembianze (VII.).

Il lavoro svolto dall'equipe di Drake assume una connotazione simbolica: il messaggio che in questo istante sta viaggiando verso l'ammasso globulare di Ercole raggiungerà la destinazione fra all'incirca 21'000 anni. Infatti l'ammasso dista dalla Terra approssimativamente 21'000 anni luce. Inoltre questo lasso di tempo comprende solo il viaggio di andata, quindi se volessimo ricevere una possibile risposta da degli esseri intelligenti dovremo aspettare 42'000 anni, l'equivalente di circa 525 generazioni, oltre a sperare che il genere umano sopravviva così a lungo.

3.3 Kepler

“(...) i modi in cui gli uomini arrivano a conoscenza delle cose non sono affatto meno meravigliosi della natura delle cose stesse.”

Giovanni Keplero (VIII.)

La missione Kepler della NASA fu avviata debitamente per la scoperta di esopianeti simili alla Terra, essa è stata specificamente progettata per individuare pianeti della taglia della Terra o più piccoli, nella zona abitabile o nelle sue vicinanze, oltre a stabilire la statistica di quanti pianeti ci sono e che dimensione hanno. Il telescopio spaziale fu lanciato in orbita il 6 marzo del 2009, fu la decima missione del progetto di ricerca spaziale della NASA *“Discovery”*. Il metodo utilizzato da questo telescopio, tecnologicamente avanzato, è quello del transito.

Gli obiettivi della missione Kepler sono i seguenti:

- determinare la percentuale di pianeti che sono nella zona abitabile di una vasta gamma di stelle
- determinare la distribuzione di dimensioni e forme delle orbite di questi pianeti
- stimare quanti pianeti sono presenti nei sistemi multipli (sistemi solari composti da due o più stelle)
- determinare la varietà dei riflessi, delle dimensioni, delle masse e delle densità degli esopianeti
- identificare e confermare gli esopianeti individuati con altre tecniche di ricerca
- determinare le proprietà di quelle stelle che ospitano sistemi planetari

Poiché la durata dei transiti equivale ad una frazione di un giorno, tutte le stelle devono essere monitorate continuamente: la loro luminosità è monitorata da Kepler regolarmente. Il campo visivo (FOV: field of view) non deve essere mai ostacolato in qualsiasi momento dell'osservazione. Pertanto il FOV deve essere fuori dal piano dell'eclittica per evitare l'influenza del sole, il quale altererebbe i risultati. Il secondo requisito è che il campo visivo deve essere puntato su una regione spaziale avente il maggior numero di stelle possibili, in modo da avere più opportunità di scoprire un esopianeta (VIII).



Immagine 14. Telescopio spaziale Kepler, dedito alla ricerca di altri sistemi solari.

Fino ad ora Kepler ha individuato 4'696 possibili esopianeti, tuttavia questi dati iniziali sono da confermare. In alcuni di essi si è già proceduto a delle verifiche circa la presenza effettiva del pianeta, in modo da eliminare i casi in cui la variazione di luce registrata è dovuta ad altri fenomeni al di fuori del transito dei pianeti. Finora i pianeti confermati sono 1'033. Tra questi solo 12 sono pianeti di piccole dimensioni che orbitano nella zona abitabile (IX.).

4. Tassonomia degli esopianeti

Il processo di denominazione degli esopianeti è amministrato dall'Unione Astronomica Internazionale (IAU, International Astronomical Union). La prima desinenza nella quale ci imbattiamo quando leggiamo il nome di un esopianeta, può derivare da varie fonti. In alcuni casi è il nome del catalogo astronomico, in altri il pianeta viene denominato con l'identikit della propria stella scoperta in precedenza. In alternativa, molti pianeti vengono spesso identificati con il nome dello strumento scientifico, che è stato usato per rivelarli, o del progetto a cui si lega l'esopianeta. Possiamo verificare quanto detto esaminando alcuni esempi di esopianeti. 51 Pegasi b è un pianeta

che orbita attorno alla stella denominata 51 Pegasi nella costellazione di Pegaso. I pianeti kepleriani derivano dal progetto spaziale della NASA “*Kepler space telescope*”. Un altro esempio sono gli esopianeti CoRoT, la cui desinenza deriva dal lavoro di ricerca europeo svolto dalla French Space Agency's (CNES) insieme all'ESA: “*CO*nvection *RO*tation and *pl*anetary *Tr*ansits”. Abbiamo quindi pianeti come Kepler-186f e, rispettivamente, CoRoT-7b. Il numero che segue la desinenza principale è riferito all'ordine cronologico di scoperta. I pianeti conosciuti HAT provengono dal progetto astronomico ungherese “*Hungarian Automated Telescope Network*” e i pianeti WASP dal “*SuperWASP Project*”, entrambi sono progetti eseguiti da Terra. La nazione del Qatar fondò nel 2010 un programma per individuare pianeti extrasolari. I pianeti scoperti legati a questo progetto hanno la desinenza di Qatar. La lettera, che segue il numero, indica l'ordine della scoperta del pianeta intorno alla sua stella ospite. Il primo esopianeta scoperto in un altro sistema solare viene designato con la lettera b, il secondo con la lettera c, il terzo con la d e così via. In questo modo la lettera non indica la posizione orbitale del pianeta attorno alla stella, quindi un pianeta con la c potrebbe essere più vicino o più lontano alla propria stella rispetto al pianeta con la lettera b. Vengono aggiunte ulteriori lettere al nome nel caso si trattasse di un sistema binario e di un sistema con multiple stelle. La prima stella che viene scoperta del sistema è designata con la lettera maiuscola A. Le sue compagne vengono catalogate con la B, con la C, e così via. Gliese 667, un sistema planetario lontano 22.7 anni luce dal nostro pianeta (X.), dimostra questa nomenclatura. Gliese 667 è costituito da tre stelle la cui terza è chiamata Gliese 667 C, essa possiede diversi esopianeti che gli orbitano attorno. Il primo ad essere scoperto venne denominato Gliese 667 C b (Schilling, 2014). Se il pianeta orbita attorno ad entrambe due stelle, le lettere delle due stelle appariranno fra parentesi, come ad esempio Kepler-34 (AB) b (XI.).

5. Telescopio

Lo scopo del telescopio è quello di catturare più luce possibile e di ingrandire l'immagine che ne viene formata. L'obiettivo (o lo specchio) concentra la luce in un punto chiamato fuoco. Più è grande lo specchio primario del telescopio, più luce riesce a catturare. Inoltre aumentando il diametro aumentano direttamente anche i dettagli dell'immagine, per esempio un telescopio con il diametro di 20 cm rivelerà dettagli due volte più piccoli rispetto ad uno di 10 cm. La distanza che troviamo tra l'obiettivo e il fuoco è la lunghezza focale, la quale determina la dimensione dell'immagine. Sovente sono necessari grandi lunghezze focali in telescopi di piccole dimensioni, per questo la luce raccolta viene piegata da degli specchi all'interno dello strumento. L'immagine formata nel fuoco viene poi proiettata in uno strumento per la realizzazione di immagine oppure su un oculare per l'osservazione diretta.

5.1 Telescopi rifrattori

I telescopi rifrattori sono conosciuti semplicemente come cannocchiali e sono divisi principalmente in tre categorie: acromatici, semi-apocromatici e apocromatici. I rifrattori acromatici hanno un obiettivo formato da due lenti separate da uno strato d'aria; una è in vetro crown, ovvero a base di calcio, che disperde molto nel verde, l'altra è in flint, un cristallo a base di piombo, molto rifrattivo nel violetto. Ciò rende leggermente alterata l'immagine osservata. I cannocchiali semi-apocromatici hanno dei vetri speciali che riducono l'alterazione dell'immagine, quelli apocromatici hanno invece da una a tre lenti più un'altra lente in bifluoruro di calcio o in vetro a bassa dispersione, inoltre lo spazio d'aria può essere riempito con dell'olio. In questi telescopi l'aberrazione cromatica è corretta per il rosso, il blu e il giallo, sono quindi privi di difetti e rendono l'immagine più nitide.

5.2 Telescopi riflettori

Al contrario dei rifrattori che hanno l'obiettivo, i telescopi riflettori hanno uno specchio concavo, posizionato in fondo allo strumento che possiede la forma di un tubo. L'altra estremità, aperta, punta verso l'oggetto da osservare. Con questo telescopio la luce non passa attraverso il vetro, ma viene riflessa dallo specchio, e grazie a questo si evita l'aberrazione cromatica. L'immagine resa dallo specchio viene poi riflessa in un oculare da un altro piccolo specchietto. Il più semplice tipo di telescopio riflettore è quello di Newton, il suo specchietto secondario è inclinato di 45° , l'immagine viene quindi mandata perpendicolarmente al lato del tubo, dove si trova l'oculare. Il telescopio usato da noi per le nostre osservazioni è un telescopio Newton, con un rapporto focale $f/5$. Il rapporto focale non è altro che il rapporto della lunghezza focale e del diametro del telescopio, 150 cm e 30 cm rispettivamente per quello dell'osservatorio Calina a Carona. Il telescopio Cassegrain cerca di migliorare il Newton sostituendo lo specchio secondario con uno specchio convesso, che riesce a ridurre la lunghezza del tubo e allo stesso tempo aumentare la focale. Il telescopio spaziale Hubble è una variante del Cassegrain, ovvero il Ritchey-Chrétien, con un rapporto $f/8$ o $f/9$. Nel 1932 Schmidt volle utilizzare uno specchio sferico al posto dello specchio primario parabolico, ma i raggi che arrivavano al centro della sfera non si incontravano con quelli che finivano ai bordi. Schmidt mise allora una lastra che deviava i raggi luminosi correggendo così l'immagine. In questo tipo di telescopio il fuoco si trova però all'interno di esso, l'osservazione diretta non è possibile, ed è quindi uno strumento unicamente fotografico (Bourge, Lacroux e Dupont-Bloch, 2007).

6. Osservazione

Il nostro scopo è osservare una stella dove si verificherà un transito, usiamo il metodo del transito per via della sua semplicità: per registrare questo fenomeno non sono necessari strumenti costosi e i calcoli di questo metodo non sono estremamente complicati, come, per esempio, servirebbero per il metodo delle velocità radiali. Inoltre seguiamo casi già conosciuti visto che, per trovarne di nuovi, è necessario molto tempo e la probabilità di scoprirne è molto bassa. Per l'osservazione di un transito abbiamo un programma da svolgere, la quale comporta l'esecuzione di alcuni compiti che variano tra verifiche, controlli, consultazione di alcuni siti internet e l'uso di sofisticati programmi, oltre al chiaro utilizzo del telescopio.

6.1 Clima e airmass

Per riuscire a fare una buona osservazione di una stella bisogna tener conto di vari fattori che potrebbero disturbare il nostro lavoro. Prima di tutto il telescopio che si utilizza deve essere abbastanza isolato da agglomerati di fonti luminose, quali le città, perché l'inquinamento luminoso schiarisce il cielo rendendo l'osservazione difficoltosa, a volte quasi impossibile da eseguire. Lo stesso problema lo possiamo riscontrare anche con la Luna, difatti se siamo in presenza di una Luna piena, o quasi piena, anch'essa illuminerebbe gran parte del cielo come le città. È necessario scegliere una notte priva di nuvole, in quanto esse non farebbero passare la luce dell'oggetto osservato.

L'atmosfera può variare significativamente il flusso dell'oggetto osservato. L'atmosfera è composta da fazioni d'aria con temperature diverse e in continuo mutamento. Al variare della temperatura cambia anche l'indice di rifrazione, di conseguenza i raggi vengono deviati a dipendenza degli indici che sono in un continuo casuale movimento. Inoltre, a dipendenza dell'intensità del vento, la turbolenza dell'aria aumenta l'eterogeneità dell'aria, deviando ulteriormente il flusso della luce dell'oggetto osservato. È molto importante calcolare la massa d'aria che la luce di un corpo osservato attraversa per raggiungere il telescopio. Essa infatti, grazie ai suoi atomi e alle sue molecole, può provocare la dispersione dei fotoni in arrivo, i quali possono anche venire assorbiti, e quindi distrutti, da altri oggetti. In più l'aria provoca la rifrazione della luce, che viene quindi deviata dando l'impressione che la stella si trovi in un altro punto invece che in quello dove si trova realmente. Nell'equazione 4.1 si deriva la massa d'aria che deve attraversare la luce di un oggetto osservato.

$$X = \frac{\text{one airmass}}{\cos(z)} \quad (4.1)$$

Il valore X è la quantità di massa d'aria attraversata, one airmass è invece la massa d'aria che troviamo osservando lo Zenith dalla superficie del mare e z è l'angolo che si forma tra lo Zenith e la linea di osservazione. Una volta ricavata la massa d'aria possiamo calcolare la magnitudine apparente che vedremmo in assenza dell'atmosfera (equazione 4.2).

$$m(X) = m_0 + kX \quad (4.2)$$

La magnitudine $m(X)$ viene osservata dal telescopio, m_0 è la magnitudine senza atmosfera, X è la massa d'aria attraversata e k è un coefficiente che dipende dai tipi di filtro utilizzati dal telescopio. Nel nostro caso, non utilizzando nessun filtro, per comodità abbiamo utilizzato k come la media dei tre filtri visibili (rosso, blu e verde), che vale 0.23 (XII.).

Nel nostro lavoro utilizziamo uno stratagemma che rende il problema della massa d'aria trascurabile e influente ai dati finali. Noi non adoperiamo i valori di luminosità della stella variabile per individuare il transito e calcolarne i parametri orbitali, ma bensì utilizziamo la differenza fra la stella variabile e una stella vicina di comparazione (V-C). Quest'ultima non deve variare la propria luminosità a differenza della variabile. Tramite quest'operazione la massa d'aria che la luce di queste stelle attraversa è la stessa (essendo appunto tutte e due all'incirca nella stessa posizione). Quindi la differenza causata si annulla insieme al problema della quantità d'atmosfera che i fotoni attraversano: se la massa d'aria diminuisse il flusso di fotoni della stella variabile, avremo praticamente la stessa diminuzione per la stella di comparazione, quindi facendo la differenza tra questi due valori elimineremo il problema dovuto al variare dei dati a causa di effetti meteorologici. Ci possono essere infine molti altri piccoli problemi, per esempio durante la nostra esperienza ci è capitato di puntare ad una stella che non siamo riusciti ad osservare a causa di un albero posto tra il telescopio e la stella in questione.

6.2 Consultazione delle liste dei transiti

All'inizio del nostro lavoro abbiamo creato insieme all'aiuto di due nostri colleghi, T. Boila e C. Magnoli, una lista di esopianeti specifica che adempisse i parametri del telescopio Calina. Questo strumento, di un diametro di 30 cm, che gentilmente ci è stato messo a disposizione, si trova in un luogo dove la qualità dell'aria impone dei limiti d'osservazione. Non potrà osservare stelle con magnitudine maggiore ai 14 mag e non potrà misurare variazioni di luminosità inferiore ai 0.015 mag. Pianeti come quelli individuati da Kepler, non potranno essere osservati dal telescopio Calina visto che possiedono una profondità che gira attorno all'1 mmag. Urgeva quindi creare una lista nella quale fossero racchiusi tutti i casi di transiti che rispettassero i parametri sufficienti per essere visti dal nostro telescopio. Il risultato è la creazione dell'OLECT (*Opportune List of Exoplanets for the Calina Telescope*) (XIII.), in questa lista troviamo i nomi degli esopianeti seguiti dalle coordinate, la magnitudine della stella e la profondità del transito. Il sito internet ceco ETD (*Exoplanet Transit Database*) (XIV.) ci ha fornito i casi di transito osservabili con i relativi dati. Il nostro lavoro è stato quello di selezionare gli esopianeti che rispettassero le nostre condizioni.

Serve poi sapere quando tali transiti avverranno, a questo punto ci serviremo del *Transit and Ephemeris Predictor Service* (immagine 15). Questo servizio è uno strumento per gli astronomi che vogliono sapere quando i transiti di esopianeti accadranno e quando possono essere osservati. Le previsioni sono basate su informazioni della *NASA Exoplanet Archive* (XV.). Inserendo nei campi di ricerca il periodo nel quale vogliamo sapere se sono presenti dei transiti e le coordinate geografiche del luogo in cui si osserva (nel nostro caso 45.9 latitudine Nord, 8.9 longitudine Est), avviamo il programma che in seguito ci riporta la lista completa degli esopianeti osservabili a Calina.

Immagine 15. Schermata principale del programma Transit and Ephemeris Predictor Service della NASA.

In seguito confrontiamo essa con l'OLECT, se il nome di un esopianeta risulterà in entrambe le liste potremmo avviare l'osservazione su tale caso. Inoltre dobbiamo essere certi che il transito avvenga nel momento giusto in modo da essere osservato adeguatamente. Infatti controlliamo l'orario e la durata dell'evento: si devono escludere i casi che iniziano prima del tramonto e quelli che finiscono dopo l'alba, evitando la luce del sole che disturba significativamente l'osservazione.

6.2.1 Giorni giuliani

In genere in ogni almanacco ed ogni ricerca astronomica la variabile temporale t è espressa uniformemente in giorno giuliano indicato con JD (Julian Day). Il calendario gregoriano non è stato adottato perché di fronte ai problemi di cronologia a lungo periodo questo metodo prevede correzioni precise e complesse rendendolo non uniforme e discontinuo. Per questo motivo il periodo adottato è il calendario giuliano, questo sistema ha la caratteristica di essere continuo senza alcun tipo di interruzione a causa di una correzione. Il sistema è costituito da una durata fissa e da un punto di partenza. Il periodo utilizzato è il giorno che corrisponde alla durata della rotazione completa della terra sul proprio asse. Il punto di partenza corrisponde all'anno 4712 avanti Cristo. Ad esempio l'osservazione di Qatar-1b svolta da noi si è svolta al 2457286.3 JD, che corrisponde al 20 settembre 2015 (De La Cotardière, 1987).

6.3 Ubicazione della stella

Una volta deciso il transito da osservare dobbiamo puntare il telescopio sull'obbiettivo richiesto per poi seguirlo per tutta la durata dell'evento. Il telescopio, come ogni altro strumento dedito all'osservazione, non è configurato ad usare le coordinate geografiche usuali ma le coordinate equatoriali.

6.3.1 Coordinate equatoriali

Il sistema delle coordinate equatoriali, conosciute anche come coordinate celesti, presuppone che il cielo sia una sfera, detta sfera celeste, che circonda la Terra e che ha come centro il centro della Terra (Ranzini 2007). In questo scenario è necessario avere un punto di riferimento base: l'asse terrestre. Da esso ricaviamo l'equatore celeste, ovvero l'intersecazione fra il piano perpendicolare all'asse terrestre, passante per il centro della Terra, e la sfera celeste. Infatti l'equatore celeste è la proiezione dell'equatore terrestre sulla sfera celeste. Inoltre deriviamo anche i punti estremi dell'asse terrestre i quali vengono riconosciuti rispettivamente con il polo celeste Nord e il polo celeste Sud (immagine 16).

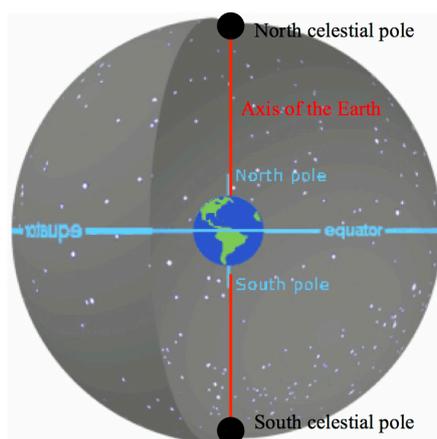


Immagine 16. Dall'asse terrestre ricaviamo l'equatore celeste e i due poli celesti nella sfera celeste.

Come la Terra è divisa con i meridiani ed i paralleli, così l'intera sfera celeste è suddivisa in cerchi. I cerchi che passano per i poli celesti, chiamati anche massimi cerchi e cerchi orari, suddividono la sfera celeste in 24 settori, ognuno di un'ora ed equivale ad un'ampiezza di 15 gradi. In egual modo la sfera viene suddivisa in 190 settori paralleli. In questo modo otteniamo un dettagliato sistema a griglia nella quale possiamo classificare l'ubicazione di ogni corpo celeste (immagine 17).

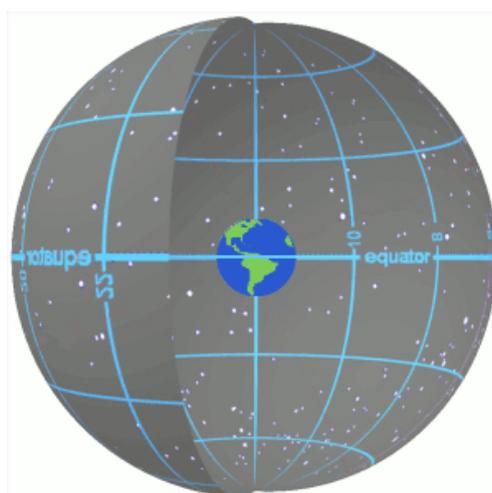


Immagine 17. Il sistema di coordinate equatoriali.

Le coordinate equatoriali vengono definite con l'ascensione retta (RA o α) e con la declinazione (Dec o δ). Per quanto riguarda l'ascensione retta bisogna fissare convenzionalmente un meridiano come punto di partenza; per esempio nelle coordinate geografiche si è scelto il meridiano di Greenwich. Il primo meridiano nelle coordinate equatoriali è quello passante per uno dei due punti d'intersezione tra l'equatore celeste e l'eclittica, quest'ultima è il piano su cui giace il moto apparente dei pianeti e del Sole rispetto la Terra. Dei due è stato scelto il punto nel quale il Sole passa nel suo moto apparente da declinazioni negative a quelle positive ed è denominato Punto Gamma (γ), Punto d'Ariete o Punto Vernale (immagine 18).

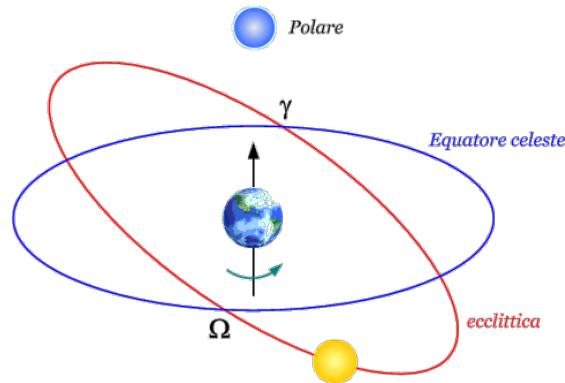


Immagine 18. L'intersezione fra l'ecclittica e l'equatore celeste forma il punto γ (Punto d'Ariete) e il punto Ω .

Predisponendo di un sistema completo come questo è possibile determinare la posizione di qualsiasi oggetto celeste. Infatti ogni astro ha due numeri che indicano in modo ben preciso l'ubicazione: l'ascensione retta (RA), l'angolo fra il meridiano zero e la proiezione della distanza dell'astro sull'equatore celeste, e la declinazione (Dec), l'angolo fra la proiezione della distanza dell'astro sull'equatore celeste e la distanza dell'astro (immagine 19) (XVI. e XVII.).

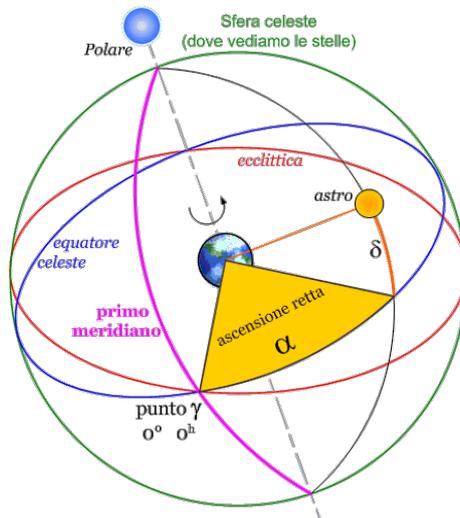


Immagine 19. Un corpo celeste viene catalogato secondo il sistema di coordinate equatoriali con i valori α e δ .

Il telescopio viene attrezzato con un supporto specifico che lo inclina allo scopo di adeguarsi al sistema delle coordinate equatoriali, di rendere il suo movimento il più liscio possibile. L'inclinazione permette di seguire ogni punto del cielo semplicemente ruotando la base inclinata del telescopio da sinistra a destra in modo da seguire il moto apparente della volta celeste. Il valore dell'inclinazione è dato dalla latitudine del luogo, questo angolo è lo stesso che si crea fra l'orizzonte in direzione del polo nord terrestre (la tangente rispetto la terra in direzione del polo) e l'asse dell'ascensione retta. Di conseguenza l'inclinazione dipende dall'ubicazione del telescopio. Ad esempio al Polo Nord (latitudine 90°) avremo un telescopio con un RA di 90° rispetto all'orizzonte: quindi perpendicolare. Invece all'equatore (latitudine 0°) l'orizzonte corrisponderebbe con l'asse dell'ascensione retta: quindi parallelo (XVIII.). Nel nostro caso abbiamo il telescopio che si trova ad una latitudine di 45.9° , l'ascensione retta del telescopio Calina sarà quindi a 45.9° dall'orizzonte.

6.3.2 Posizionamento del telescopio

Cerchiamo le coordinate equatoriali della stella dell'esopianeta nel database della SIMBAD, esso fornisce dati di base, cross-identificazioni, coordinate e misure di oggetti astronomici esterni al sistema solare (XIX.). Immettiamo le informazioni sull'ubicazione nel programma *The Sky 6*, esso rappresenta digitalmente la mappatura completa della volta celeste, e nel programma *MaxIm DL Pro 5* che ha il controllo del telescopio ed è basato sul sistema di coordinate equatoriali. Nel primo otteniamo un'inquadratura teorica del frammento di cielo in cui avverrà il transito e nel secondo un'inquadratura pratica del telescopio stesso. L'inquadratura del telescopio potrebbe essere falsata da diversi fattori, come ad esempio la limitazione di precisione del motore di puntamento del telescopio o una leggera imprecisione circa il posizionamento del telescopio. Per questo motivo utilizziamo la foto teorica tratta dal programma *The Sky 6* allo scopo di porre un confronto e correggere manualmente il puntamento del telescopio seguendo la conformazione delle stelle che vediamo nella foto (immagine 20). Dopo questa correzione il telescopio è pronto per l'osservazione.

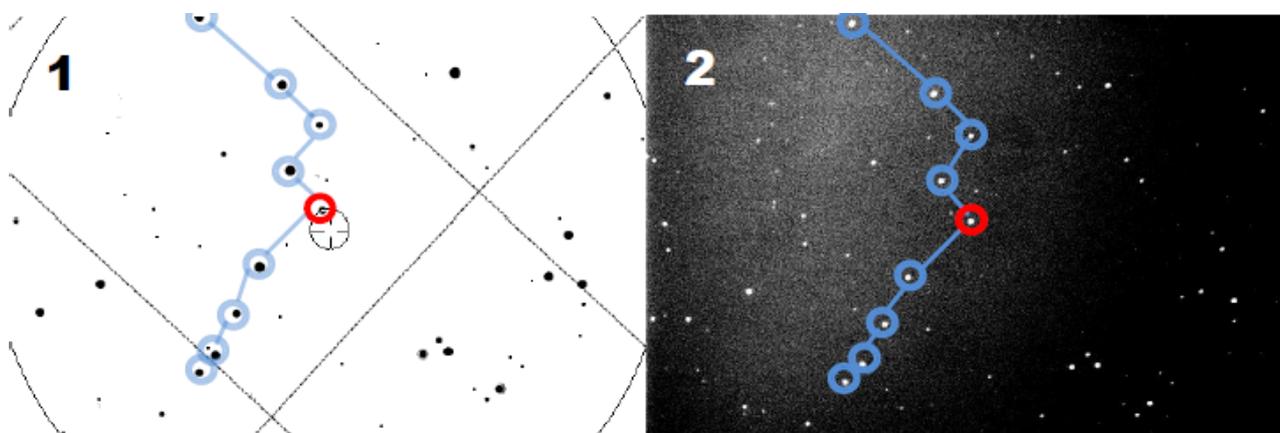


Immagine 20. La rappresentazione digitale dell'obiettivo (1) permette di migliorare il puntamento in diretta del telescopio. La conformazione delle stelle circostanti (cerchi e linee blu) permette di individuare l'obiettivo (cerchio rosso).

6.4 Il lavoro del telescopio

A questo punto entra al lavoro come massimo protagonista l'omonimo telescopio, fulcro del nostro lavoro. Per il nostro progetto ci è stato gentilmente concesso l'utilizzo dell'osservatorio Calina, situato a Carona, e l'assistenza di Francesco Fumagalli, responsabile dell'osservatorio Calina.

6.4.1 Osservatorio Calina

L'osservatorio fu fondato dalla signora Lina Senn nel 1960, amante delle stelle creò la sua casa di vacanze astronomiche a Carona. Fu installato un telescopio da 30 cm con f/5 che a tutt'oggi utilizziamo per le osservazioni di esopianeti. Naturalmente dal '60 ad oggi è stato modernizzato opportunamente. Fin dall'inizio la bellezza del posto e la passione dell'astronomia hanno attirato appassionati da tutta l'Europa. Alla morte della signora Senn il telescopio ereditato venne acquistato dal Municipio di Carona con l'appoggio della Società Astronomica Ticinese. La specola si tramutò da privato a pubblico e da allora, grazie al fondamentale lavoro svolto da Fausto De Lucchi e Francesco Fumagalli, viene impiegato sia a scopo di ricerca sia a scopo divulgativo: giornate e serate osservative e corsi, i quali vengono frequentati da persone di ogni età. Recentemente il telescopio Newton da 30 cm di diametro (NT-30) è stato dotato di un'elettronica più moderna in grado di permettere puntamenti automatici e il controllo da remoto. Inoltre è stata

rimodernata la meccanica dell'Ascensione Retta che ha portato maggiore precisione nei movimenti e nei puntamenti del telescopio (XX.).

6.4.2 Avvio dell'osservazione

Una volta sicuri del puntamento del telescopio avviamo l'osservazione che sostanzialmente consiste nello scattare fotografie consecutive del settore del cielo interessato. Il telescopio viene attivato un'ora prima dell'evento in modo da osservare la luminosità apparente e solita della stella, ciò ci sarà utile per identificare il transito.

Il telescopio raccoglie i fotoni; è questa in sintesi l'operazione dello strumento. I fotoni sono emessi dalle stelle, dopo aver viaggiato per milioni e milioni di chilometri raggiungono la nostra Terra per poi essere registrate dal telescopio. È necessario avere un'apparecchio che sia in grado di accumulare questi raggi provenienti dai più remoti angoli dell'universo.

Ogni singolo individuo della Terra possiede uno di questi "apparecchi" ed accompagna l'umanità da sempre: si tratta dell'organo visivo, l'occhio umano. Questo fantastico strumento naturale è il motore principale dell'astronomia, infatti va ricordata l'espressione *osservazione* che permea tutto il nostro lavoro. Nonostante sia un organo eccezionale presenta alcuni limiti che causarono nella storia dell'astronomia l'uso di strumentazioni sempre più potenti allo scopo di aiutare l'occhio umano a vedere ciò che non può vedere da solo. Il telescopio è un'imitazione dell'occhio umano solo più preciso e, può accumulare molta più luce rispetto a quello della vista umana.

Gli apparecchi che usano i telescopi moderni sono esclusivamente digitali, quelli analogici usati inizialmente presentavano problemi e imprecisioni significative. Essi accumulano i fotoni che sono incidenti al rilevatore (Romanishin, 2006). Generalmente i telescopi usano il CCD (Charge Coupled Devices); un equivalente elettronico della pellicola. Questo apparecchio è un sensore di luminosità, se esposto, lo strumento registra le fonti di luminosità nel seguente modo: il flusso di fotoni proveniente dalla stella raggiunge la superficie del CCD interagendo con gli elettroni che si trovano su di essa, tale reazione crea a sua volta un flusso di elettroni che genera ovviamente corrente. Il CCD è di fatto un insieme di colonne di pixel, principalmente quadrati, a volte rettangolari, adiacenti in settori. L'informazione, ovvero la carica elettrica, che si crea in ognuno di questi settori a causa della radiazione dei fotoni, associa ad ogni pixel univocamente un numero che costituisce l'immagine digitale. In questo modo otteniamo la quantificazione dell'oggetto luminoso che si osserva (Bernieri, 2012).

La durata dell'esposizione dell'obbiettivo del telescopio è di cento secondi. L'esposizione prolungata è un modo efficace per accumulare in uno scatto più luce possibile, più tempo passa più fotoni vengono registrati dall'obbiettivo. È un buon metodo per registrare gli oggetti deboli, come una stella con un'elevata magnitudine. La singola posa non deve essere troppo lunga perché si vuole registrare cambiamenti di magnitudine. Per stelle di 12 mag, la durata di cento secondi si è confermata ideale per essere adoperata all'osservatorio Calina.

Dato che realmente la Terra ruota ma dal nostro punto di vista apparentemente sembra il cielo a compiere una rotazione, è necessario seguire l'obbiettivo con un'alta precisione e ciò è possibile grazie all'ausilio di un motore. Questo motore consente al telescopio di compiere un'uniforme rotazione dell'ascensione retta seguendo il corpo celeste desiderato, ha la stessa velocità con cui la Terra ruota sul proprio asse, la differenza è che gira in senso contrario al moto del pianeta, proprio per compensare il movimento che apparentemente compie la sfera celeste. Durante l'osservazione

ogni immagine viene registrata dal computer. Il processo viene bloccato idealmente dopo un'ora dalla fine del transito per lo stesso motivo citato precedentemente.

6.4.3 Magnitudine e flusso

Avere una certa luminosità per una stella è fondamentale per il lavoro che abbiamo svolto, ma è importante definire cos'è la luminosità. In ambito astronomico una stella ha due tipi di luminosità, quella intrinseca e quella apparente. La prima è la luminosità reale, effettiva della stella, che indica quanta luce emette in un certo intervallo di tempo (ovvero energia sotto forma di radiazione elettromagnetica) e viene indicata con la lettera L . La luminosità è solitamente misurata in watt (W). Nell'equazione 5.1 viene riportato la luminosità del Sole.

$$L_{\odot} = 3.86 \cdot 10^{26} \text{ W} \quad (5.1)$$

La luminosità apparente è invece l'energia ricevuta dall'osservatore (energia su una superficie perpendicolare ai raggi). Viene chiamato flusso f (equazione 5.2), dipende dalla luminosità intrinseca e dalla distanza della stella, di conseguenza viene misurata in watt per metro quadro (W/m^2).

$$f = \frac{L}{4\pi d^2} \quad (5.2)$$

Per fare un esempio pratico possiamo nuovamente riprendere il sole per calcolare il suo flusso (equazione 5.3).

$$f = \frac{3.86 \cdot 10^{26} \text{ W}}{4\pi(1.496 \cdot 10^{11} \text{ m})^2} = 1370 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad (5.3)$$

Ovviamente il dato che si riesce ad misurare in astronomia è quello del flusso. Viene quindi calcolata la distanza della stella, tramite la parallasse ad esempio, e viene infine misurata la luminosità intrinseca della stella tramite le due misure precedenti. Le stelle che a noi sembrano le più brillanti non sono per forza quelle più luminose, una stella può sembrarci più luminosa di un'altra semplicemente per la minore distanza che ci separa da essa. Viceversa non possiamo concludere che una stella sia molto lontana da noi per la poca luce che riceviamo.

A partire dal II secolo a.C. le stelle furono categorizzate in base al loro flusso con il sistema della magnitudine. Le stelle apparentemente più luminose erano le stelle di prima magnitudine, quelle successive di seconda magnitudine e così via fino alla sesta. Con l'invenzione del telescopio e le sue migliorie si passò alla 7^a, all'8^a fino a raggiungere oggi la 30^a magnitudine e addirittura le magnitudini frazionarie. Attraverso formalizzazioni matematiche gli astronomi si sono resi conto che se due stelle hanno una differenza di 5 magnitudini, allora il flusso di una sarà 100 volte più alto dell'altra. Poniamolo in termini matematici: prendiamo due stelle, la stella 1 di magnitudine m_1 e la stella 2 di magnitudine m_2 , con un differenza di 5 magnitudini.

$$m_2 - m_1 = 5 \quad (5.4)$$

Con questa differenza possiamo quindi ricavare il rapporto dei flussi delle due stelle.

$$\frac{f_1}{f_2} = 100 \quad (5.5)$$

Poniamo invece $m_2 - m_1 = 1$, e vediamo in che modo cambia il rapporto dei flussi.

$$\frac{f_1}{f_2} = 100^{\frac{1}{5}} = 10^{0.4} \cong 2.512 \quad (5.6)$$

Con questi calcoli possiamo quindi derivare la relazione generale tra i flussi e le magnitudini di due stelle.

$$\frac{f_1}{f_2} = 100^{\left(\frac{m_2 - m_1}{5}\right)} = 10^{0.4(m_1 - m_2)} \quad (5.7)$$

$$m_2 - m_1 = 2.5 \log \left(\frac{f_1}{f_2} \right) \quad (5.8)$$

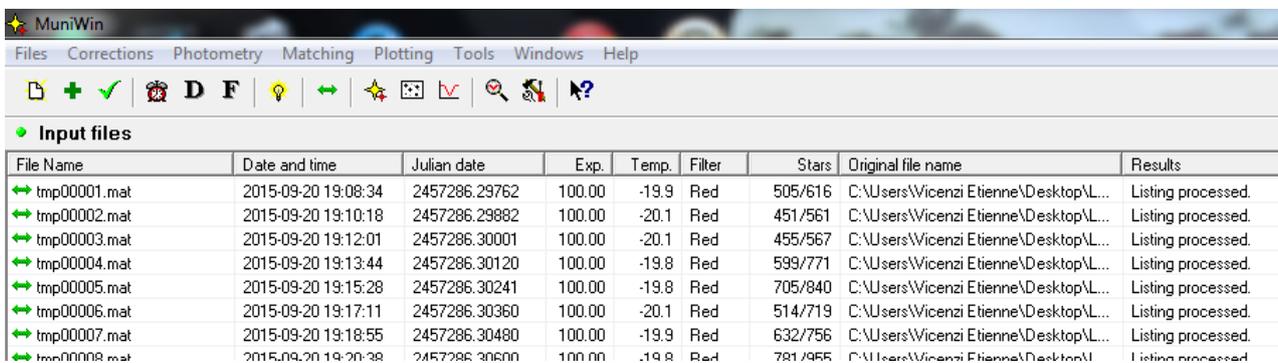
Queste due formule però hanno bisogno dei parametri di due stelle differenti. Per avere una relazione tra la magnitudine e il flusso di una singola stella si utilizza invece un'altra formula.

$$m = C - 2.5 \log f \quad (5.9)$$

In questa formula C è una costante in modo che la magnitudine di Vega (la stella più brillante nel cielo) sia 0. Ne consegue che $C = 2.5 \log f_{Vega}$ (Ryden, 2002).

6.5 Analisi dei dati tramite fotometria

Come il minatore ricava le rocce ferrose dalla sua miniera e in un secondo tempo le lavora per ottenere la materia desiderata, così noi abbiamo attinto i file grezzi dal telescopio e adesso ci apprestiamo a desumere da essi i file specifici che ci porteranno alle misurazioni sperate. A questo proposito lavoriamo con un pratico e sofisticato programma chiamato *MuniWin* della *C-Munipack project* (immagine 21). È un software che offre la completa riduzione di immagini dedite all'osservazione di stelle variabili (XXI.). Il primo passo è la conversione dei file allo scopo di essere letti dal programma, dopodichè vengono effettuate alcune elaborazioni tra cui l'aggiunta di filtri, l'analisi fotometrica e la correzione della posizione di ogni singola foto.



File Name	Date and time	Julian date	Exp.	Temp.	Filter	Stars	Original file name	Results
tmp00001.mat	2015-09-20 19:08:34	2457286.29762	100.00	-19.9	Red	505/616	C:\Users\Vicenzi Etienne\Desktop\...	Listing processed.
tmp00002.mat	2015-09-20 19:10:18	2457286.29882	100.00	-20.1	Red	451/561	C:\Users\Vicenzi Etienne\Desktop\...	Listing processed.
tmp00003.mat	2015-09-20 19:12:01	2457286.30001	100.00	-20.1	Red	455/567	C:\Users\Vicenzi Etienne\Desktop\...	Listing processed.
tmp00004.mat	2015-09-20 19:13:44	2457286.30120	100.00	-19.8	Red	599/771	C:\Users\Vicenzi Etienne\Desktop\...	Listing processed.
tmp00005.mat	2015-09-20 19:15:28	2457286.30241	100.00	-19.8	Red	705/840	C:\Users\Vicenzi Etienne\Desktop\...	Listing processed.
tmp00006.mat	2015-09-20 19:17:11	2457286.30360	100.00	-20.1	Red	514/719	C:\Users\Vicenzi Etienne\Desktop\...	Listing processed.
tmp00007.mat	2015-09-20 19:18:55	2457286.30480	100.00	-19.9	Red	632/756	C:\Users\Vicenzi Etienne\Desktop\...	Listing processed.
tmp00008.mat	2015-09-20 19:20:38	2457286.30600	100.00	-19.8	Red	781/955	C:\Users\Vicenzi Etienne\Desktop\...	Listing processed.

Immagine 21. Schermata di MuniWin.

6.5.1 Fotometria

La fotometria rappresenta la prima tecnica osservativa. Letteralmente “*misura della luce*”, essa permette di ottenere importanti informazioni. Come si potrà constatare alla fine, l’intero nostro lavoro poggia le proprie fondamenta sul calcolo preciso dell’intensità luminosa di determinati corpi celesti. Grazie al lavoro del telescopio, siamo riusciti a ricavare fotografie della sezione di cielo interessata, le quali possiedono informazioni circa sul flusso di radiazione di ogni stella all’interno dell’inquadramento scelto. Abbiamo così la quantità di energia che riceviamo da queste stelle che incide la superficie del CCD in un determinato intervallo di tempo. L’energia ricevuta deriva dai fotoni ed il valore si esprime in funzione della frequenza di oscillazione dell’onda associata al fotone e della sua lunghezza d’onda. Abbiamo quindi un flusso di energia per ogni stella definita come il rapporto tra potenza e unità di superficie ($\Phi = W m^{-2}$) (Riezzo, 2011).

Dopo la conversione degli scatti il programma MuniWin decifra le foto che precedentemente abbiamo ricavato dall’osservazione tramite il telescopio. Analizza le fotografie individuando i raggruppamenti di fotoni in ogni singola foto. Così facendo identifica digitalmente il flusso registrato dal CCD di tutte le stelle, durante questo procedimento il flusso delle stelle viene convertito in magnitudine. Otteniamo così una misurazione completa e precisa della parte di cielo osservata per ognuna delle stelle, soprattutto della stella interessata dove avviene il transito.

6.5.2 Calibrazioni: *dark frames* e *flat fields*

Per avere dati più precisi con *MuniWin* correggiamo le immagini ottenute dal telescopio con due altre immagini: *flat fields* e *dark frames*. Il primo lavora ai problemi che riguardano il sistema ottico e fa in modo che ogni pixel riceva lo stesso flusso di fotoni rispetto agli altri, in modo da eliminare errori dovuti alla polvere o a graffi sul telescopio. Per fare questo bisogna fotografare più volte (come minimo 10 volte) un oggetto molto illuminato, che come minimo deve essere circa 2/3 della luminosità massima che lo strumento può assorbire, fuori dalla messa a fuoco, oppure puntando al cielo durante il tramonto o all’alba (ci sono anche dei pannelli di luce artificiale che possono essere utilizzati in qualsiasi momento). In questo modo tutto ciò che viene assorbito deve essere uguale per ogni pixel, quindi grazie a questa operazione il sensore saprà in quali punti assorbirà di meno e riuscirà quindi a calibrarsi per assorbire poi la giusta quantità di fotoni in tutta l’immagine.

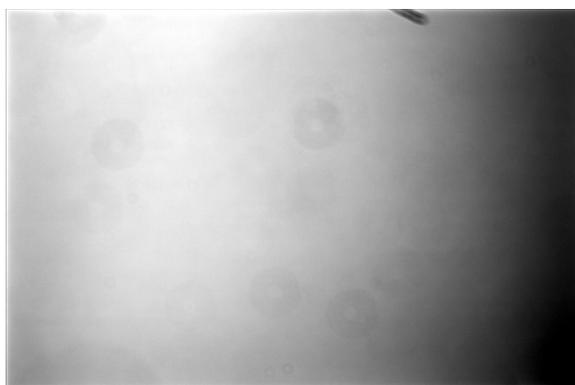


Immagine 22. Alcune macchie a forma di ciambella nel *Flat field* del telescopio Calinale, queste sono provocate da piccoli granelli di polvere che vengono amplificati a causa dell’estrema vicinanza alla lente del telescopio.

Nell’immagine 22 la correzione è dovuto da diversi elementi di disturbo come granelli di polvere, leggera differenza di sensibilità nella zona a destra dell’obbiettivo e altro. Tutto ciò viene

identificato dal programma, esso individua punti più e meno luminosi e di conseguenza li regola affinché la luminosità nel *flat* sia uniforme. La stessa correzione viene applicata ai diversi scatti dell'osservazione, la calibrazione porta immagini con una maggiore uniformità e precisione (immagine 23).

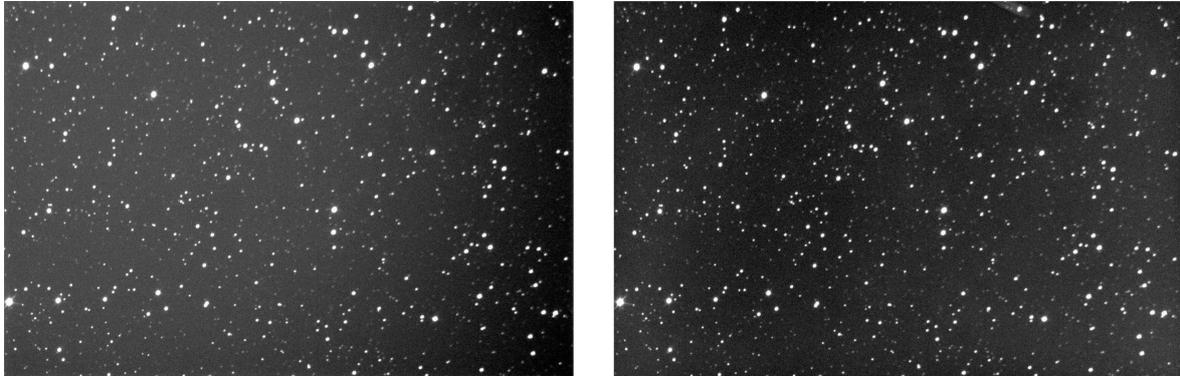


Immagine 23. Scatti tratti dall'osservazione di Qatar-1b prima e dopo la calibrazione con il *flat field*.

Quando un telescopio viene usato spesso o troppo a lungo, il CCD può surriscaldarsi e danneggiare i pixel e conseguentemente l'immagine riprodotta. I pixel danneggiati, appunto perché sono causati dal surriscaldamento del sensore, vengono chiamati *hot pixels*, e nell'immagine finale si possono benissimo notare perché solitamente sono luminosi come le stelle. Oltre a questi vi possono essere altre imperfezioni dovute ai vari circuiti del telescopio. Questo tipo di disturbi vengono chiamati come rumore dell'immagine, che generalmente rappresenta variazioni della luminosità o dei colori. Gli astronomi professionali raffreddano il loro CCD fino a temperature vicino al punto di ebollizione dell'azoto liquido (circa 77 K). Purtroppo sono necessarie tecnologie molto avanzate per garantire il mantenimento di questa temperatura, in molti casi si raggiungono solamente temperature tra i -40 °C e i -20 °C . Ciò non è assolutamente sufficiente per ridurre il rumore in modo da ottenere buoni risultati. Quindi per correggere l'immagine da questo tipo di problema ci serviamo dei *dark frames*, che eliminano appunto il rumore dell'immagine. I *dark frames* sono delle immagini riprodotte con la camera coperta, così si riesce a notare solamente il rumore dovuto al CCD, per poterlo poi sottrarre dai *light frames* (immagini riprese del cielo). I *dark* devono essere presi con le stesse condizioni dei *light frames*, ovvero con stessa durata d'esposizione e alla stessa temperatura del chip. L'immagine sottostante mostra gli *hot-pixels* del CCD del telescopio Calina. Il *dark frames* calibra poi tutti gli scatti (XXII., XXIII. e XXIV.).

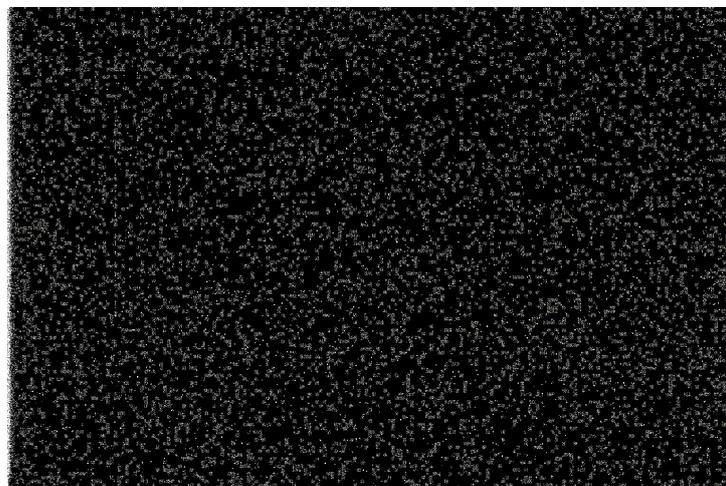


Immagine 24. *Dark frame* del telescopio Calina.

6.5.3 Coordinamento

L'ultimo passaggio che il programma *MuniWin* elabora è la correzione della posizione dell'immagine rispetto alle altre. Ad ogni foto scattata del telescopio è possibile che avvenga una piccola imprecisione del movimento del telescopio, se ciò accade non avremo una serie di foto perfettamente coordinate ma foto che risulterebbero apparentemente spostate un po' più a destra o a sinistra in rapporto con le altre. Il programma fortunatamente provvede a questa minuta imprecisione, scegliendo una foto da riferimento il software identifica la mappatura del cielo e la applica sulle altre allo scopo di inquadrarle come la foto modello selezionata. Se ipoteticamente al posto delle stelle ci fossero dei fori e noi potessimo impilare una foto sopra l'altra vedremmo dei buchi perfettamente allineati senza trovarne un intoppo a causa della mancata coordinazione di una o più fotografie.

A questo punto abbiamo lavorato la materia prima ricavando le misurazioni desiderate. Ottenuto questo possiamo passare al prossimo importante capitolo nella quale il nostro lavoro descrive l'esopianeta calcolando i dati orbitali.

7. Derivazione parametri orbitali e dimostrazione pratica

7.1 Prologo

7.1.1 Calcolo generale dell'incertezza assoluta

Dobbiamo calcolare l'errore che si genera a seguito dell'operazione che utilizziamo. L'incertezza che calcoliamo dipenderà dai valori di errore iniziali di ogni variabile e dalla funzione con cui operiamo. Ad esempio se lavoriamo con un'ipotetica funzione $f(x)$ l'errore Δf viene calcolato tramite la seguente equazione.

$$\Delta f = \sum_{k=1}^n \left| \frac{\partial f}{\partial x_k} \right|_{x_k=x_{k0}} \Delta x_k \quad (6)$$

dove x_k è il valore di una misura del calcolo e Δx_k è l'incertezza di questa misura. Si somma ogni prodotto fra la funzione derivata secondo ogni variabile e il valore dell'errore della variabile, il risultato che ricaviamo è l'errore che ci portiamo appresso dopo l'operazione che abbiamo scelto di utilizzare.

7.1.2 Limb darkening

L'immagine 37 mostra il Sole. Il disco solare non è uniforme: appare notevolmente più luminoso al centro e progressivamente meno luminoso verso il bordo della stella. Quando guardiamo il centro della stella ci giungono fotoni che hanno origine da una relativa profondità della fotosfera, dove la temperatura è relativamente alta. Mentre quando guardiamo i bordi, vediamo raggi che hanno un angolo basso per raggiungere la terra, essi hanno origine nel tratto superiore della fotosfera, dove la temperatura è leggermente inferiore (XXV.).

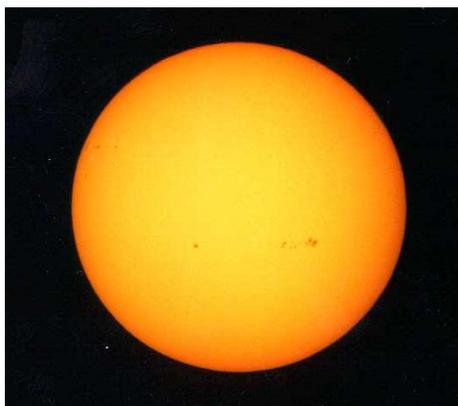


Immagine 25. La variazione di luminosità del Sole è definita dalla sfumatura del giallo al centro e dall'arancione ai bordi.

Questo non è un caso che riguarda unicamente il Sole, ma vale in generale per tutte le stelle. Il limb darkening ha un effetto identificabile sul metodo del transito: invece di ottenere una curva spigolosa e ben definita, ricaviamo una curva inarcata, dovuto al fatto che l'area della stella non è uniformemente luminosa (immagine 38).

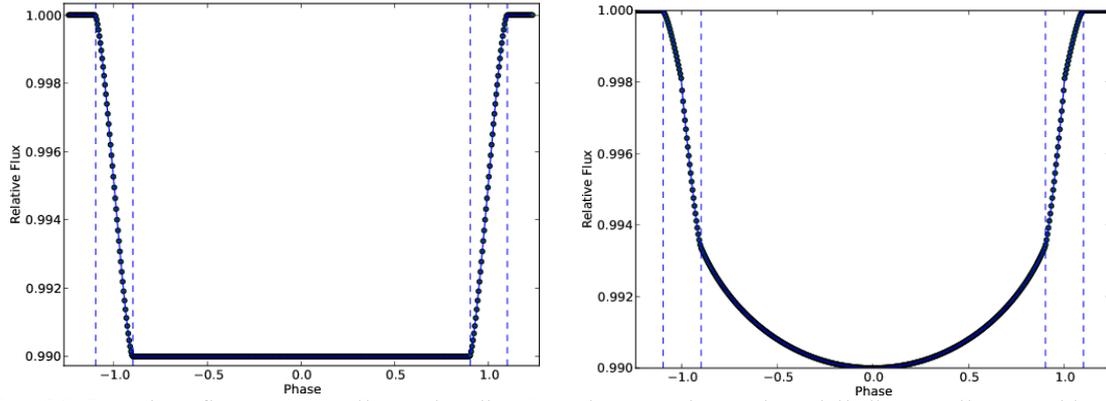
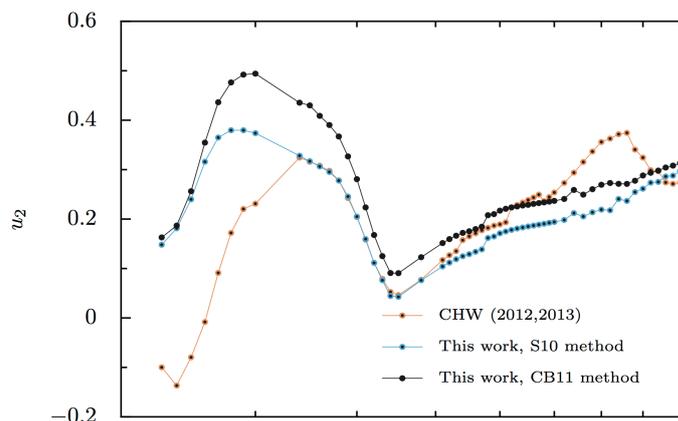


Immagine 26. La prima figura mostra il transito di un'esopianeta nel caso in cui il disco stellare sarebbe luminoso uniformemente. Nella seconda è raffigurato un transito reale, il limb darkening crea una curvatura pronunciata.

Il pianeta transitante occulta aree della stella con luminosità differenti durante il suo passaggio. Nel momento intermedio del transito, la luminosità raggiunge il suo minimo perché l'esopianeta è nel punto in cui è più vicino al centro della stella, bloccando raggi stellari più lucenti rispetto a qualsiasi altro punto durante il suo passaggio. Il Sole è l'unica stella per la quale noi possiamo calcolare direttamente e in dettaglio il limb darkening. L'esatta forma del limb darkening è in funzione dell'opacità e dell'emissione della stella per ogni profondità dell'atmosfera. Queste dipendono dalla lunghezza d'onda, dalla composizione e dalle proprietà termodinamiche dell'atmosfera in ogni punto. Anche nel caso del Sole è difficile ottenere un risultato definitivo. I ricercatori usano modelli computazionali come guida per le loro supposizioni, costruiscono tali modelli utilizzando la legge del limb darkening per definire con buona approssimazione l'ignoto profilo del limb darkening. L'equazione 15 mostra la relazione lineare del limb darkening, dove viene messo in rapporto la luminosità di un qualsiasi punto nel disco stellare $I(\mu)$ con la luminosità del centro $I(1)$.

$$\frac{I(\mu)}{I(1)} = 1 - u_1(1 - \mu) - u_2(1 - \mu)^2 \quad (7)$$

La μ calcola la luminosità di un raggio che non proviene dal centro, μ è in funzione dell'angolo γ che corrisponde all'angolo che si crea fra il vettore radiale della stella e il nostro punto di vista ($\mu = \cos \gamma$). u_1 e u_2 sono i coefficienti del limb darkening che regolano il calo di intensità tra il centro e il bordo del disco (Haswell, 2010). I coefficienti dipendono dalla temperatura di superficie della stella (immagine 27) (Espinoza e Jordán, 2015).



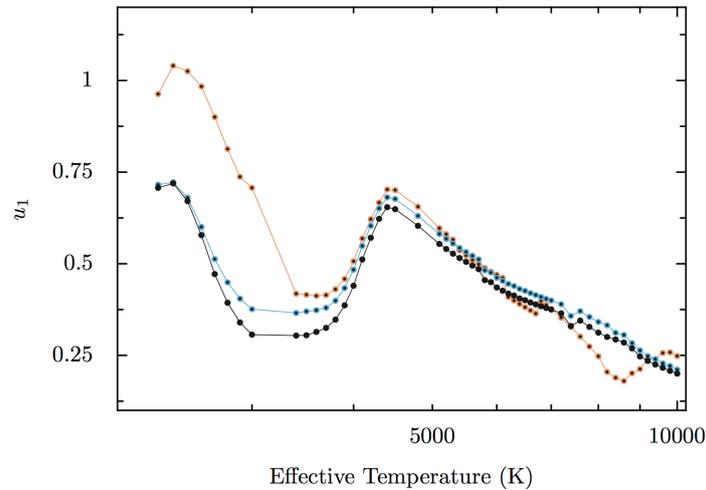


Immagine 27. Coefficienti del limb darkening u_1 e u_2 in relazione con la temperatura della superficie della stella T_{eff} .

7.2 Massa e raggio stellare

7.2.1 Calcolo generale della massa e del raggio stellare

La temperatura, che è legata strettamente al colore e questo al tipo spettrale, e la magnitudine della stella, che è l'indice dell'energia emessa, costituiscono il diagramma H-R, il nome deriva dagli scienziati che proposero questo modello all'inizio del ventesimo secolo, Ejnar Hertzsprung e Henry Norris (Hertzsprung e Ejnar, 1908).

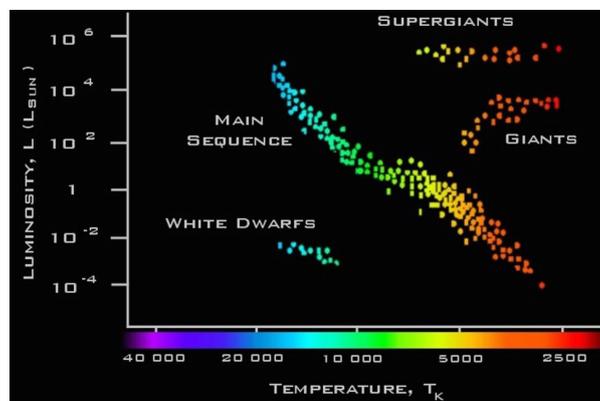


Immagine 28. Diagramma H-R, dove la luminosità delle stelle è indicata in funzione della temperatura. La sequenza principale è la diagonale che sovrasta il diagramma.

Questo diagramma (immagine 25) per essere costruito necessita la conoscenza di un certo campione di stelle: ad esempio, si possono scegliere quelle di cui si è nota la distanza, così che se ne possa conoscere la magnitudine intrinseca, tramite relazione $m - M = -5 + 5 \log(d)$, dove m è la magnitudine relativa, M la magnitudine intrinseca e d la distanza. Il diagramma H-R ha un'importanza enorme perché ci permette di ipotizzare la massa e il volume della stella con un'incertezza accettabile. La maggior parte delle stelle si posiziona lungo una diagonale del diagramma, quest'insieme è denominato sequenza principale. Le stelle di sequenza principale sono quelle che si trovano nella fase più stabile della loro vita, durante la quale, nei loro nuclei, avviene la fusione degli atomi di idrogeno. Il fatto che queste stelle formino una linea di tendenza è indice del delicato equilibrio che vi è nelle stelle tra la forza di gravità e la forza dovuta alle reazioni nucleari. Una stella di una determinata massa non potrà essere né meno né più brillante, perché altrimenti non

sarebbe in equilibrio. Grazie a questa proprietà per stimare il volume e la massa di una stella è necessario unicamente conoscere la sua temperatura e collocarla nel diagramma H-R in modo da ricavarne la magnitudine. Dall'energia emessa si può ricavare la forza repulsiva delle reazioni nucleari e quindi della forza di gravità del corpo celeste, ottenendo così la massa e il raggio della stella (Ranzini, 2007).

7.2.2 Massa e Raggio stellare di Qatar-1

Ricaviamo la temperatura di Qatar-1 dall'Exoplanets Data Explorer (XXVI.). La temperatura della stella equivale a $4'860 \pm 125$ kelvin. Nella seguente immagine la massa e il raggio di alcune stelle, che hanno una distanza conosciuta, sono messe in funzione della temperatura. Per mezzo di questo grafico possiamo calcolare la massa e il raggio della stella Qatar-1, che ci serviranno per calcolare i parametri dell'esopianeta.

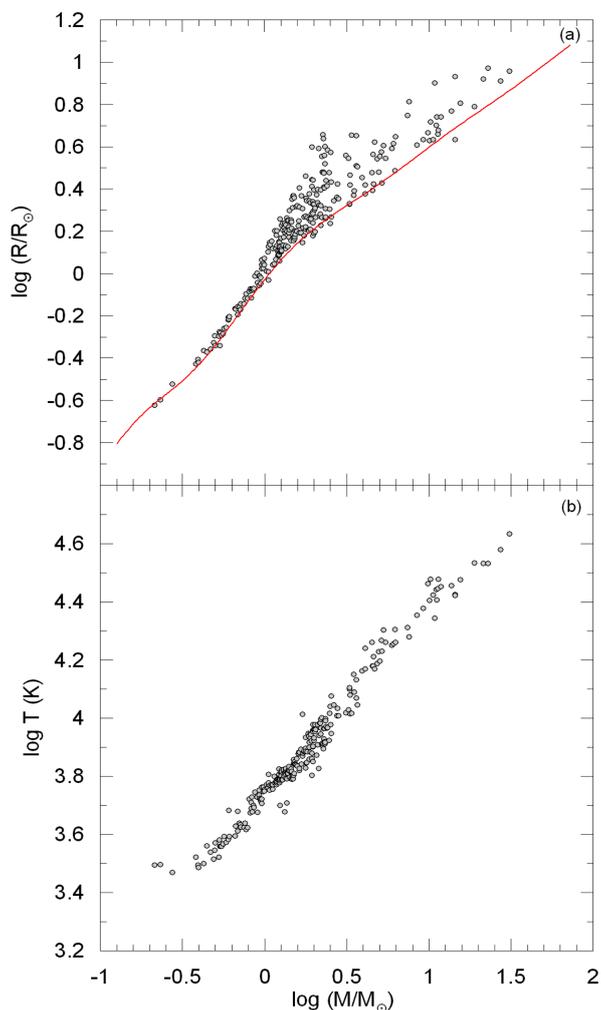


Immagine 29. Grafico della massa e del raggio delle stelle in funzione della temperatura. Le stelle del grafico appartengono alla sequenza principale e si conosce la loro distanza dalla Terra.

Facendo affidamento al grafico dell'immagine 26 otteniamo i seguenti valori.

T_{eff}	M_*	R_*
$4'860 \pm 125$ k	$0.82 \pm 0.06 m_{\odot}$	$0.84 \pm 0.03 r_{\odot}$

7.3 Profondità del transito

7.3.1 Calcolo generale della profondità del transito

Una volta lavorati i dati del telescopio tramite il programma MuniWin, possiamo trasportare queste informazioni in un foglio di lavoro Excel. MuniWin fornisce il momento dei singoli scatti in giorni giuliani JD e la differenza delle magnitudini fra la stella variabile V e la stella di confronto C in ogni singolo scatto: $V-C$. La differenza fra magnitudini è direttamente proporzionale al rapporto fra i flussi delle due stelle f_c/f_v (vedi equazione 6.3). Il programma di decifrazione dei dati converte direttamente questi in magnitudine ma i valori originali derivati dagli scatti sono i flussi. Il rapporto viene molto utile perché elimina il problema dei cambiamenti atmosferici, infatti se i movimenti dell'atmosfera o leggeri disturbi luminosi muteranno il conteggio di fotoni della stella variabile, lo stesso mutamento avverrà per la stella di confronto. Visto che entrambi i valori cambiano in modo uguale, avremo sempre lo stesso valore di rapporto fra questi due flussi. Messo questo valore in funzione del tempo creiamo un grafico che mostra l'andamento della luminosità. Se otteniamo la curva caratteristica del transito possiamo derivare la differenza fra la magnitudine della stella m_* e la magnitudine della stella con il pianeta transitante m_{*-p} . Possiamo calcolare la loro differenza che rappresenta la profondità del transito (equazione 9).

$$\Delta m = m_* - m_{*-p} \quad (8)$$

7.3.2 Profondità del transito di Qatar-1b

Costruiamo il grafico con la magnitudine in funzione del tempo: il valore della magnitudine calcolata in ogni foto scattata dal telescopio viene posizionato nel grafico in funzione del tempo. In questo modo costruiamo la curva del grafico che caratterizza il transito del pianeta, una curva che evidenzia l'avvenimento del transito, infatti quando il pianeta passa davanti alla stella la magnitudine è maggiore rispetto al momento in cui non transita il pianeta, ovvero la luminosità è minore, come si può vedere nell'immagine 27.

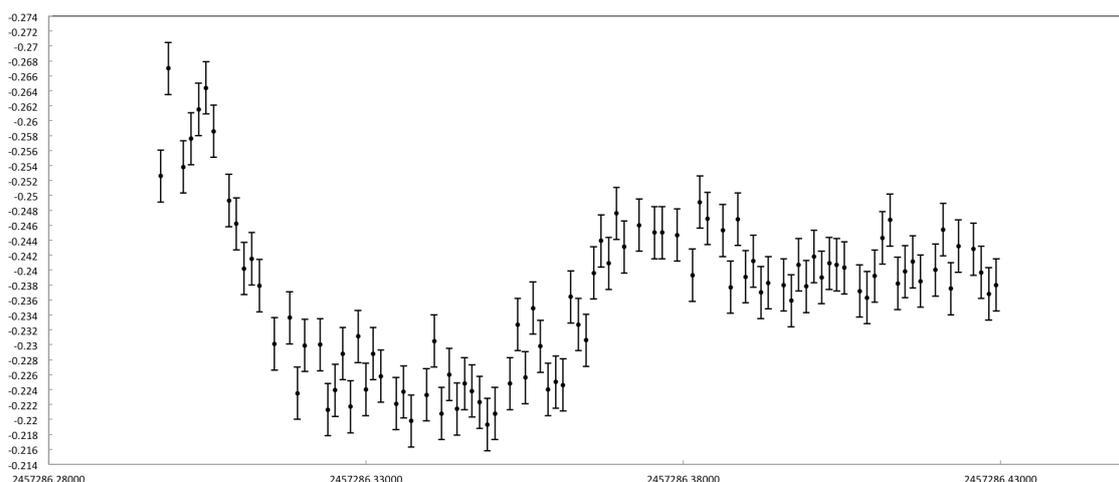


Immagine 30. Il grafico del tempo in funzione della magnitudine mostra il transito di Qatar-1b.

Dal grafico possiamo calcolare la magnitudine della stella e la magnitudine della stella mentre l'esopianeta transita. Per ricavare questi dati con più precisione possibile, calcoliamo la media dei dati tramite Excel durante il transito e in secondo luogo la media dei dati della magnitudine della stella. Quest'operazione è necessaria a causa degli sbalzi di valore della magnitudine da dato in

dato; risultato dei movimenti dell'aria durante l'osservazione e da altri fattori che incidono l'imprecisione della misurazione.

Differenza di magnitudini fra la stella senza il transito e la stella di confronto (m_*)	Differenza di magnitudini fra la stella durante il transito e la stella di confronto (m_{*-p})	Profondità del transito (Δm) (equazione 9)
-0.2413 mag	-0.2213 mag	-0.0200 mag

Visto l'alternarsi dei valori è necessario determinare la loro incertezza. Calcolando la varianza dei dati con la formula 10.1, possiamo determinare una stima del sigma (10.2) e quindi il valore dell'incertezza dei dati.

$$v = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{\mu})^2 \quad (9.1)$$

$$\sigma = \sqrt{v} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{\mu})^2} \quad (9.2)$$

Analizzando i dati otteniamo un sigma di 0.0035 mag. Per ottenere più precisione possibile sarebbe ideale analizzare un numero alto di dati allo scopo di ottenere un'accurato studio della propagazione di probabilità. L'istogramma dei nostri dati mostra l'incertezza che abbiamo dei nostri valori medi (μ): ogni colonna dell'immagine 28 corrisponde al conteggio dei dati risultanti nell'intervallo determinato, nel nostro caso l'intervallo equivale a 0.004 mag.

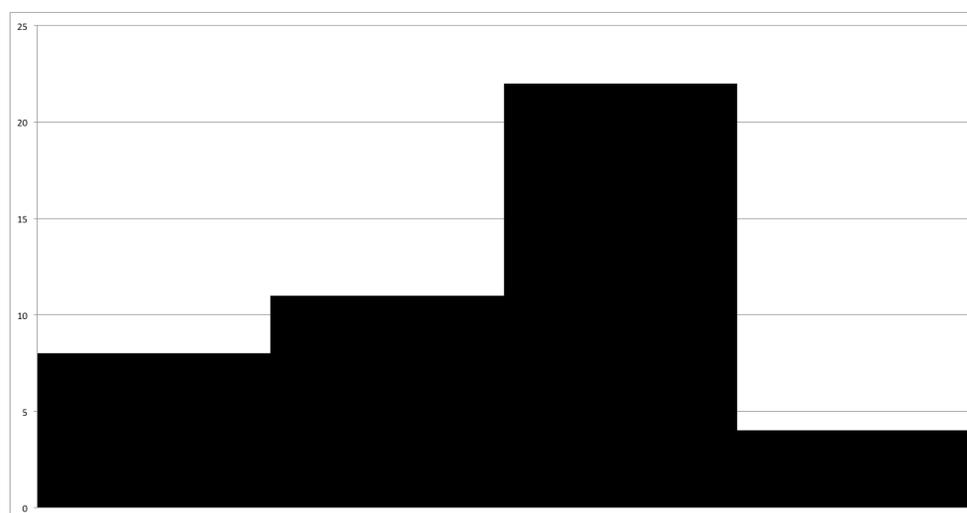


Immagine 31. Sull'asse delle x vengono posti gli intervalli in cui troviamo i dati misurati, l'asse delle y indica la quantità di dati che troviamo nei singoli intervalli.

Possiamo costruire la campana di Gauss che contraddistingue il nostro caso tramite la funzione della campana di Gauss. Il centro della campana corrisponde al valore medio dei dati μ che nel nostro caso corrisponde a -0.2413 . Un sigma di incertezza comprende il 68% di possibilità che un dato sia fra l'intervallo $\mu \pm \sigma$, due sigma il 95% che sia nell'intervallo $\mu \pm 2\sigma$ e tre sigma il 99% che sia fra l'intervallo $\mu \pm 3\sigma$. La campana di Gauss coincide grosso modo con i dati riportati nell'istogramma (immagine 29).

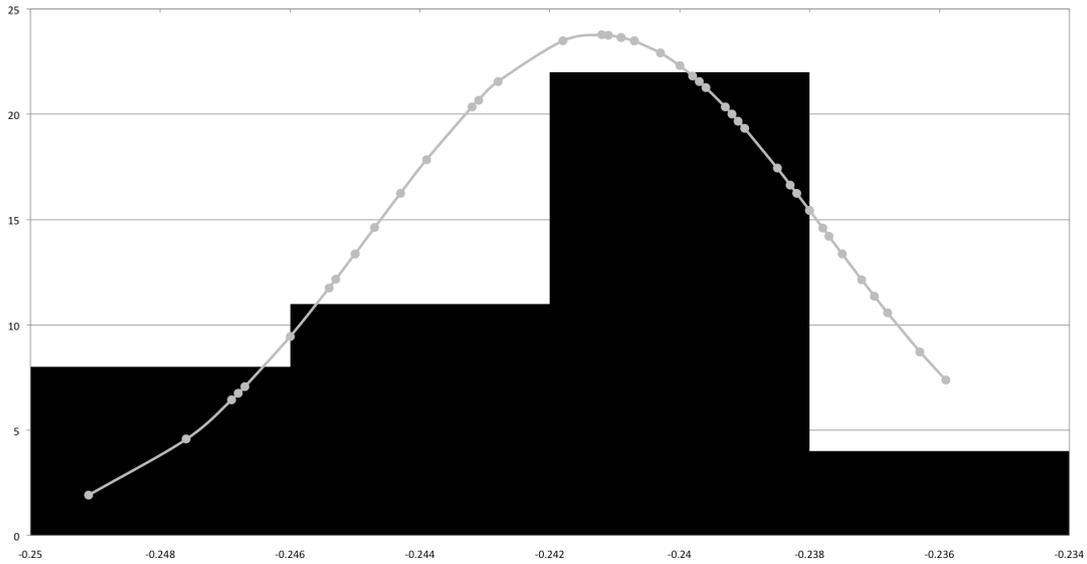


Immagine 32. La campana di Gauss coincide con l'istogramma dei dati.

Otteniamo in questo modo la quantificazione dell'errore dei nostri dati. Quindi abbiamo ricavato i dati che necessitavamo con la relativa incertezza.

m_*	m_{*-p}	Δm
$-0.2413 \pm 0.0035 \text{ mag}$	$-0.2213 \pm 0.0035 \text{ mag}$	$-0.0200 \pm 0.0035 \text{ mag}$

7.4 Raggio dell'esopianeta

7.4.1 Calcolo generale del raggio dell'esopianeta

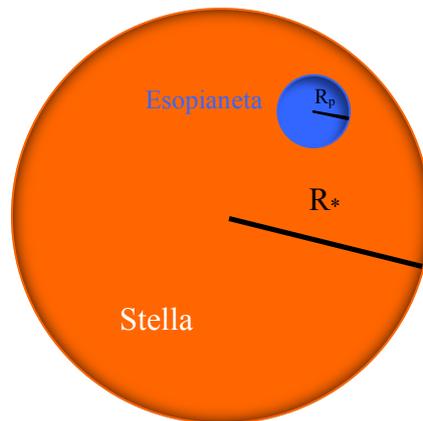


Immagine 33. Raffigurazione semplificata non in scala dell'area dell'esopianeta (A_p) che oscura parte dell'area luminosa della stella (A_s).

Il primo parametro che possiamo calcolare è il raggio del pianeta. Nell'immagine 30 è rappresentato il transito. L'area può essere messa in relazione con la quantità di flusso emessa. La stella ha una determinata area che corrisponde ad una alquanto determinata luminosità, quando davanti ad essa transita l'esopianeta la differenza fra l'area della stella e l'area del pianeta corrisponde alla luminosità che diminuisce a causa del transito. Possiamo quindi mettere in uguaglianza il rapporto fra i due differenti flussi, quello solito della stella e quello alterato dal transito, con il rapporto fra le due diverse aree (equazione 9.1).

$$\frac{f_p}{f_*} = \frac{A_* - A_p}{A_*} \quad (10.1)$$

L'equazione può essere semplificata sostituendo l'area con la formula completa ($R^2\pi$), così facendo otteniamo una relazione diretta fra i flussi e i raggi (equazione 9.2).

$$\frac{f_p}{f_*} = 1 - \left(\frac{R_p}{R_*}\right)^2 \quad (10.2)$$

Modifichiamo l'equazione fino ad ottenere la formula finale (equazione 9.4).

$$1 - \frac{f_p}{f_*} = \left(\frac{R_p}{R_*}\right)^2 \quad (10.3)$$

$$\frac{\Delta f}{f_*} = \left(\frac{R_p}{R_*}\right)^2 \quad (10.4)$$

Per semplificare la scrittura dei prossimi calcoli possiamo scrivere il rapporto dei raggi con la lettera δ .

$$\delta = \left(\frac{R_p}{R_*}\right)^2 \quad (10.5)$$

7.4.2 Il raggio dell'esopianeta di Qatar-1b

Visto che i nostri dati sono in magnitudine, prendiamo la formula 9.3 e convertiamo i flussi con l'equazione 5.7 (equazione 10.1).

$$\left(\frac{R_p}{R_*}\right)^2 = 1 - 10^{\left(\frac{m_* - m_p}{2.5}\right)} \quad (11.1)$$

Isoliamo il raggio del pianeta e immettiamo i nostri dati calcolati, ottenendo il risultato desiderato (equazione 10.2). Dobbiamo utilizzare il raggio della stella Qatar-1 che abbiamo calcolato nel capitolo 7.2.3 ($R_* = 0.84 \pm 0.03 r_{\text{sun}}$).

$$R_p = R_* \cdot \sqrt{1 - 10^{\left(\frac{m_* - m_p}{2.5}\right)}} = 0.84 \cdot \sqrt{1 - 10^{\left(\frac{-0.2413 + 0.2213}{2.5}\right)}} = 0.113 r_{\odot} \quad (11.2)$$

$$R_p = 0.113 r_{\odot} = 1.12 r_{\text{Giove}} = 78'648'000 \text{ m} \quad (11.3)$$

L'incertezza assoluta la calcoliamo utilizzando la formula 6.

$$\Delta R_p = 0.014 r_{\odot} = 0.14 r_{\text{Giove}} = 9'667'000 \text{ m} \quad (11.4)$$

In conclusione il raggio di Qatar-1b è di $1.12 \pm 0.14 r_{\text{Giove}}$.

7.4.3 Calcolo generale del raggio dell'esopianeta tramite il limb darkening

Il raggio calcolato precedentemente non tiene conto del limb darkening della stella e approssima la luminosità come se fosse uniforme in tutto il disco stellare. Questo metodo l'abbiamo utilizzato per fare un paragone con il metodo che utilizzeremo in questo capitolo, oltre a darci un'idea su quello che potrebbe essere approssimativamente il valore del raggio del pianeta.

Il primo passo è creare le curve di luce artificialmente mediante formule che lasciano come variabile il raggio del pianeta. Le formule prevedono una sottrazione dall'area della stella del segmento di pianeta che si situa davanti il disco stellare, in un primo momento il pianeta occultata gradualmente la stella per poi trovarsi interamente davanti al disco stellare. Il risultato è una curva spigolosa e ben definita che approssima la luminosità della stella come luminosa in modo uguale in tutte la sua superficie (vedi primo grafico dell'immagine 26). Utilizziamo la formula 7 per moltiplicare l'area occultata con il limb darkening, assegnando ad ognuno di questi il giusto valore della luminosità bloccata. La creazione di tali curve di luce implicano l'uso del raggio della stella, calcolata nel capitolo 7.2.3, della durata totale del transito e dei coefficienti del limb darkening.

7.4.4 Raggio dell'esopianeta di Qatar-1b tramite il limb darkening

Determiniamo i coefficienti del limb darkening della stella Qatar-1 utilizzando i grafici dell'immagine 27.

T_{eff}	u_1	u_2
$4'860 \pm 125$ k	0.625	0.1

Le curve di luce in funzione del raggio del pianeta soddisfano il limb darkening della stella e vengono messe in rapporto con i dati originali dell'osservazione (immagine 34). Facendo variare il raggio del pianeta attorno al valore ricavato tramite il metodo spiegato e utilizzato nei capitoli 7.4.1 e 7.4.2., troviamo la curva artificiale che più si avvicina ai dati d'osservazione.

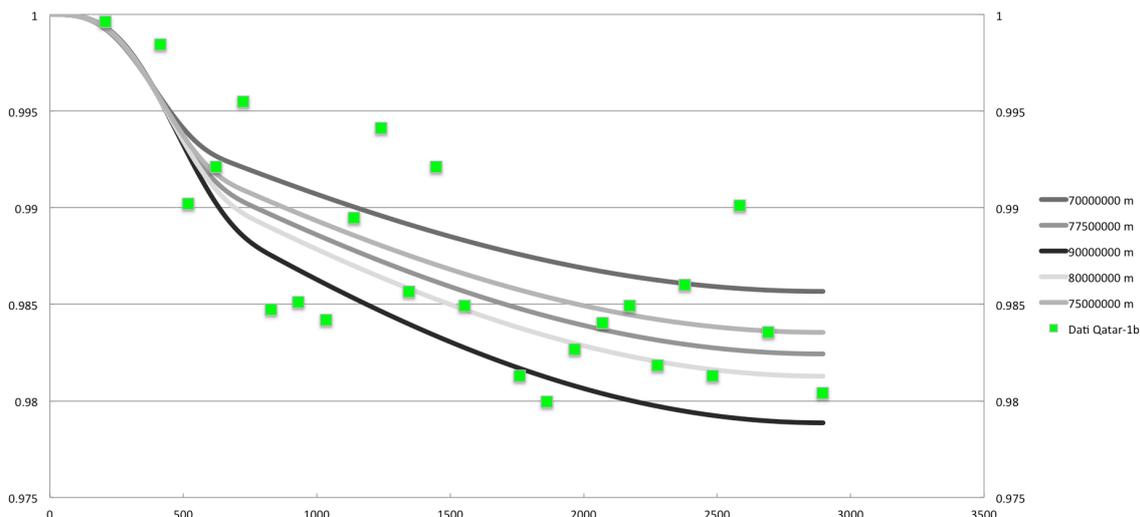


Immagine 34. Le curve in funzione del raggio dell'esopianeta, le quali soddisfano il limb darkening della stella Qatar-1b, vengono confrontate con i dati ricavati dall'osservazione (punti verdi).

La curva che assomiglia maggiormente ai dati utilizza un raggio che ha un valore di 77'500'000 m. Nella seguente tabella vengono messi in confronto i raggi ottenuti con due diversi metodi.

R_p ricavato tramite il rapporto fra le aree	R_p ricavato tramite il limb darkening
$78'648'000 \pm 9'667'000 \text{ m}$	$77'500'000 \pm 840'000 \text{ m}$
$1.12 \pm 0.14 \text{ } r_{\text{Giove}}$	$1.11 \pm 0.02 \text{ } r_{\text{Giove}}$

I due valori sono simili, tuttavia non ricaveremo il raggio del pianeta mediante il limb darkening nel corso del nostro lavoro. Abbiamo applicato tutti i due metodi agli altri due casi presi in studio, il raggio ricavato dalla profondità del transito risulta più vicino al valore che troviamo sull'*Exoplanet Data Explorer* (XXVI.), mentre il valore è superiore rispetto ai dati reali se calcolato tramite il limb darkening. Questo problema è probabilmente il risultato di un'approssimazione apportata a quest'ultimo metodo: i calcoli fatti valgono solo se il pianeta transita all'equatore della stella e, quindi, se possiede un'angolo di inclinazione del piano orbitale di 90° . Di conseguenza non sono affidabili al punto da essere utilizzati per la determinazione dei parametri orbitali; utilizzeremo il raggio ricavato dalla profondità del transito per determinare il resto dei parametri.

7.5 Parametro d'impatto

7.5.1 Calcolo generale del parametro d'impatto

Una volta ottenuto il raggio del pianeta il prossimo parametro che possiamo ricavare è il parametro d'impatto b . Il parametro di impatto non è altro che l'altezza del pianeta rispetto al centro della stella dal nostro punto di vista (immagine 31).

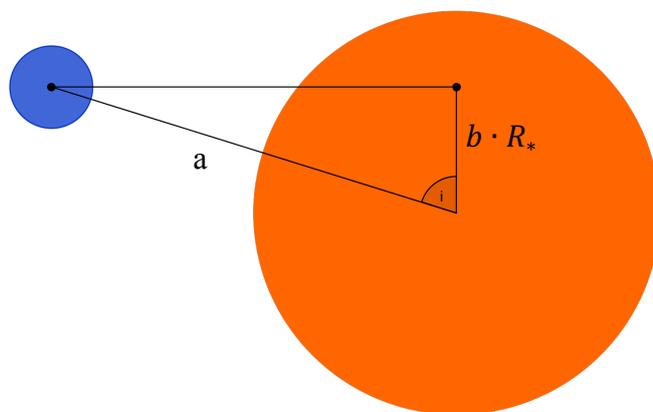


Immagine 35. Il parametro b in rapporto con il raggio della stella R_* indica l'altezza dell'esopianeta rispetto al centro della stella dal nostro punto d'osservazione.

La formula per calcolare il parametro d'impatto b è quindi la seguente.

$$b = \frac{a \cos(i)}{R_*} \quad (12.1)$$

Per poter ottenere questo parametro è necessario capire la relazione che troviamo tra il raggio della stella e quello del pianeta con la durata dell'intero transito t_T e della durata del tempo in cui l'intero pianeta è posto davanti alla stella t_F (immagine 35).

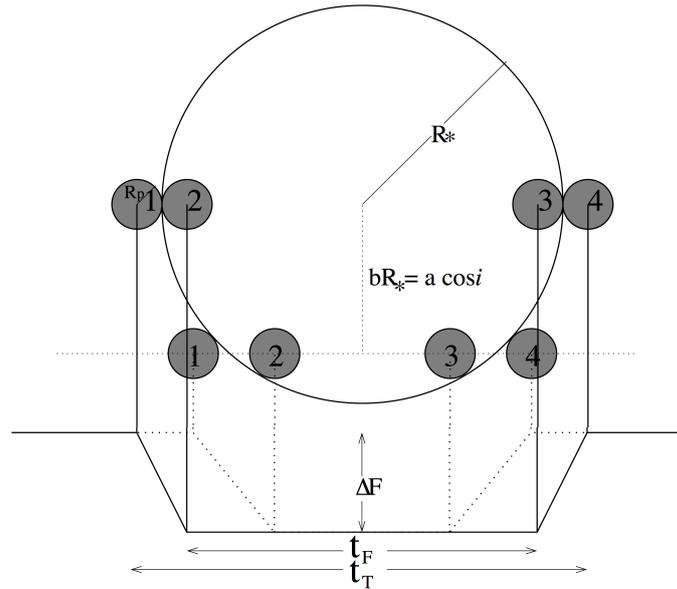


Immagine 36. Nel momento in cui l'esopianeta inizia ad occultare la luce della stella, la luminosità diminuisce gradualmente, quando l'intero pianeta blocca i raggi della stella la luminosità si stabilizza (cerchi 1 e 2). Accade analogamente alla fine del transito (cerchi 3 e 4).

Bisogna trovare la distanza totale percorsa dal pianeta durante l'intero transito, ovvero da quando il pianeta inizia a porsi davanti la sua stella fin quando si è spostata del tutto, non provocando più nessuna diminuzione della luminosità (immagine 32).

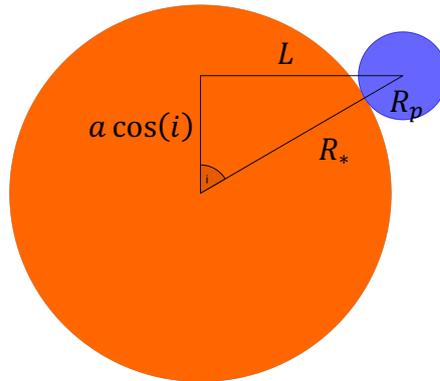


Immagine 37. L'esopianeta è all'inizio o alla sua fine del transito. Tramite pitagora possiamo mettere in relazione i vari valori.

Come vediamo nell'immagine 33, la distanza totale percorsa è data da $2L$, che possiamo ricavare con la formula seguente.

$$2L = 2\sqrt{(R_* + R_p)^2 - (a \cos(i))^2} \quad (12.2)$$

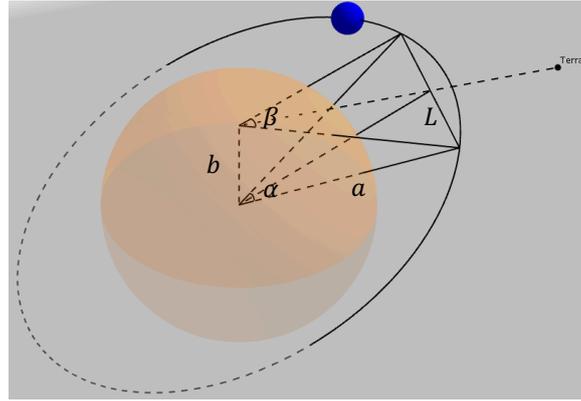


Immagine 38. Rappresentazione del transito con un punto di vista esterno a quello terrestre, in evidenza i valori e l'angolo α interessato.

Nell'immagine 34 l'orbita del pianeta possiede un'inclinazione i diversa da 90° . La distanza, che calcoliamo con la formula (13.2), risulta diversa da quel che dovrebbe essere realmente. L'orbita invece di creare una retta crea una curva come si può vedere nell'immagine 35, la distanza reale è leggermente più lunga. Dato che il pianeta orbita molto lontano dalla stella, la differenza fra $2L$ e il segmento dell'orbita in questione risulta trascurabile. Il seguente passaggio prevede l'angolo che si forma al centro della stella con ampiezza pari ai due punti in cui il pianeta inizia e finisce il transito (vedi immagine 35).

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{L}{a \sin(i)} \quad (12.3)$$

Adesso prendiamo la formula del calcolo della durata del transito totale t_T .

$$t_T = P \frac{a}{2\pi} \quad (12.4)$$

Inseriamo quindi l'equazione 13.3 nella 13.4 per poter togliere l'angolo α .

$$t_T = \frac{P}{\pi} \sin^{-1} \left(\frac{L}{a \sin(i)} \right) \quad (12.5)$$

Ora invece inseriamo l'equazione 13.2 per poter ottenere la formula con i raggi all'interno.

$$t_T = \frac{P}{\pi} \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{(R_* + R_p)^2 - (a \cos(i))^2}}{a \sin(i)} \right) \quad (12.6)$$

Possiamo ora modificare e semplificare la formula.

$$\sin \left(\frac{t_T \pi}{P} \right) = \frac{\sqrt{(R_* + R_p)^2 - (a \cos(i))^2}}{a \sin(i)} = \frac{\sqrt{\left(\frac{R_* + R_p}{R_*} \right)^2 - \left(\frac{a \cos(i)}{R_*} \right)^2}}{\frac{a \sin(i)}{R_*}} \quad (12.7)$$

Da questa equazione appare la formula del parametro d'impatto b (13.1) vista precedentemente. Possiamo quindi ottenere una formula che contiene il nostro parametro da ottenere.

$$\sin\left(\frac{t_T \pi}{P}\right) = \frac{\sqrt{\left(1 + \frac{R_p}{R_*}\right)^2 - b^2}}{\frac{a \sin(i)}{R_*}} \quad (12.8)$$

Una volta ottenuta questa formula bisogna fare lo stesso con la durata del transito t_F in cui il pianeta è interamente davanti la stella (immagine 35).

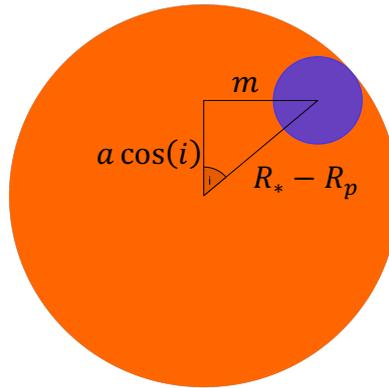


Immagine 39. L'intera area dell'esopianeta inizia o finisce di bloccare la luminosità della stella. Tramite pitagora possiamo mettere in relazione i vari valori.

Dall'immagine 33 notiamo che il procedimento è lo stesso per la durata del transito totale. Possiamo quindi iniziare calcolando la distanza $2m$ ovvero la distanza che percorrerà il pianeta durante questa fase del transito.

$$2m = 2\sqrt{(R_* - R_p)^2 - (a \cos(i))^2} \quad (12.9)$$

Facciamo quindi la stessa cosa che abbiamo fatto per il transito totale, fino a raggiungere la seguente formula.

$$\sin\left(\frac{t_F \pi}{P}\right) = \frac{\sqrt{\left(1 - \frac{R_p}{R_*}\right)^2 - b^2}}{\frac{a \sin(i)}{R_*}} \quad (12.10)$$

Possiamo mettere in rapporto le formule 13.8 e 13.10 e semplificarle.

$$\left[\frac{\sin\left(\frac{t_F \pi}{P}\right)}{\sin\left(\frac{t_T \pi}{P}\right)}\right]^2 = \frac{\left(1 - \frac{R_p}{R_*}\right)^2 - b^2}{\left(1 + \frac{R_p}{R_*}\right)^2 - b^2} \quad (12.11)$$

Ora possiamo ottenere la formula per ottenere il parametro d'impatto b .

$$b = \frac{\left(1 - \frac{R_p}{R_*}\right) - \left\{ \frac{\left[\sin\left(\frac{t_F \pi}{P}\right)\right]^2}{\left[\sin\left(\frac{t_T \pi}{P}\right)\right]^2} \right\} \left(1 + \frac{R_p}{R_*}\right)}{\sqrt{1 - \frac{\left[\sin\left(\frac{t_F \pi}{P}\right)\right]^2}{\left[\sin\left(\frac{t_T \pi}{P}\right)\right]^2}}} \quad (12.12)$$

Dato che $\frac{t_T \pi}{P} \ll 1$ e $\frac{t_F \pi}{P} \ll 1$ possiamo approssimare e ottenere la formula del parametro d'impatto in funzione dei dati che conosciamo finora: il raggio del pianeta, il raggio della stella e la durata del transito.

$$b = \frac{\sqrt{\left(1 - \frac{R_p}{R_*}\right)^2 - \left(\frac{t_F}{t_T}\right)^2 \left(1 + \frac{R_p}{R_*}\right)^2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{t_F}{t_T}\right)^2}} \quad (12.13)$$

7.5.2 Parametro d'impatto di Qatar-1b

Per il seguente calcolo urge nuovamente visionare il grafico della riduzione fotometrica di Qatar-1b. Dobbiamo determinare la durata di t_F e di t_T . Dal grafico possiamo individuare l'inizio e la fine di t_F e la fine del transito (t_T) (immagine 40). La nostra osservazione purtroppo presenta dati iniziali falsati: questi dati hanno una maggiore luminosità perché li abbiamo estrapolati prima che il Sole tramontasse lasciando scuro il cielo notturno. Per determinare l'inizio effettivo del transito (t_T) abbiamo sottratto all'inizio di t_T il lasso di tempo tra la fine di t_F e la fine del transito (linea blu, immagine 40).

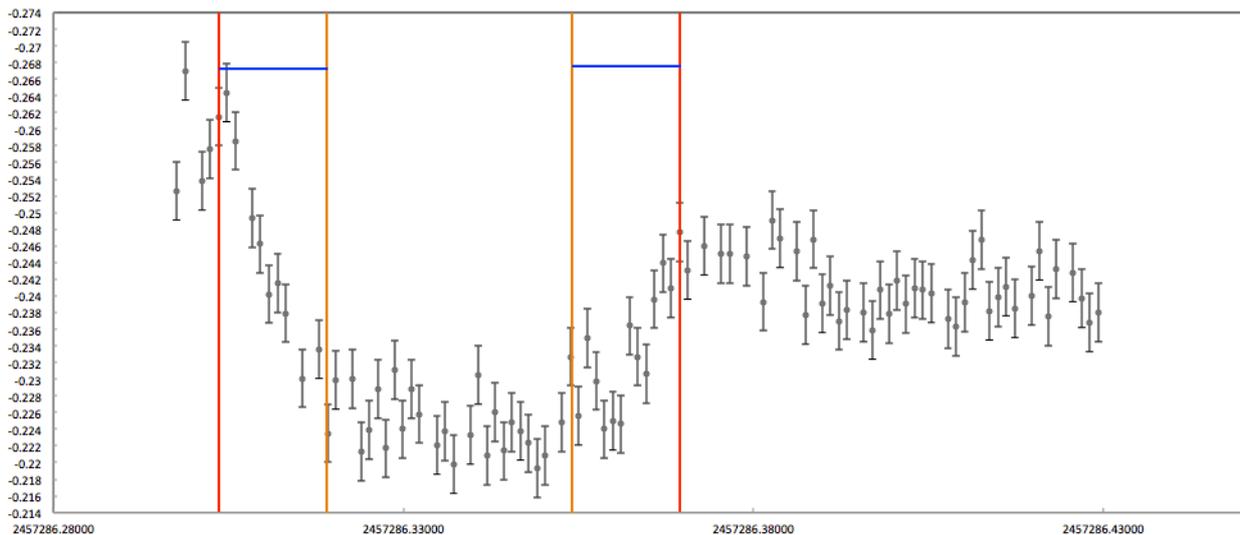


Immagine 40. L'intervallo fra le linee rosse indica il valore di t_T , t_F è delineato dalle righe arancioni.

Dal grafico (immagine 40) delineiamo l'inizio e la fine del transito ricavando il tempo iniziale e finale del transito. La loro differenza è il valore t_F .

Inizio transito	Fine transito	t_T
2'457'286.3036 giorni	2'457'286.37065 giorni	0.06705 giorni

L'incertezza dei valori equivale al tempo d'esposizione degli scatti, nel nostro caso 100 secondi. Trasformando tale intervallo di tempo in giorni giuliani otteniamo un'incertezza di 0.00116. Tramite l'equazione 8 calcoliamo l'incertezza di t_T che equivale al doppio dell'incertezza dei singoli valori. Otteniamo quindi i seguenti valori con le relative incertezze.

Inizio transito	Fine transito	t_T
2'457'286.3036 \pm 0.00116 giorni	2'457'286.37065 \pm 0.00116 giorni	0.06705 \pm 0.00232 giorni

Applichiamo le medesime operazioni per ottenere t_F .

Inizio transito con l'intero pianeta che occulta la luce della stella	Fine transito con l'intero pianeta che occulta la luce della stella	t_F
2'457'286.31917 \pm 0.00116 giorni	2'457'286.35389 \pm 0.00116 giorni	0.03472 \pm 0.00232 giorni

Possiamo calcolare b con l'equazione 12 visto che abbiamo tutti i dati necessari.

$$b = \sqrt{\frac{\left(1 - \frac{0.113}{0.84}\right)^2 - \left(\frac{0.03472}{0.06705}\right)^2 \left(1 + \frac{0.113}{0.84}\right)^2}{1 - \left(\frac{0.03472}{0.06705}\right)^2}} = 0.743 \quad (13.3)$$

L'incertezza assoluta del parametro d'impatto equivale a 0.094. In conclusione il parametro d'impatto di b è 0.743 ± 0.083 .

7.6 Raggio, periodo e angolo orbitale

7.6.1 Calcolo generale del raggio, del periodo e dell'angolo orbitale

Per calcolare il raggio orbitale del pianeta (ovvero la distanza tra esso e la sua stella) possiamo fare riferimento alla terza legge di Keplero. Questa legge afferma che il quadrato del tempo in cui un pianeta impiega per percorrere la sua orbita attorno alla stella è proporzionale al cubo della loro distanza, e si basa sulla forza centripeta F_C e sulla forza attrattiva F_A , le due forze che mantengono il pianeta nella sua orbita.

$$F_C = \frac{M_P V^2}{a} \quad (14.1)$$

$$F_A = G \frac{M_p M_*}{a^2} \quad (14.2)$$

In queste due formule M_p è la massa del pianeta, M_* la massa della stella, V la velocità del pianeta nella sua orbita, G la costante di gravitazione universale ($G = 6.67259 \cdot 10^{-11} \text{N m}^2 \text{kg}^{-2}$) e a il raggio dell'orbita. Possiamo ora uguagliare le due forze e ottenere la seguente formula.

$$G \frac{M_p M_*}{a^2} = \frac{m V^2}{a} \quad (14.3)$$

Sostituiamo la velocità dell'equazione 14.3 con la relazione tra il raggio orbitale e il periodo P (equazione 14.4).

$$V = \frac{2\pi a}{P} \quad (14.4)$$

$$G \frac{m M_*}{a^2} = \frac{m 4\pi^2 a^2}{a P^2} \quad (14.5)$$

Attraverso semplificazioni e modifiche di questa formula otteniamo il raggio orbitale.

$$a = \sqrt[3]{\frac{P^2 G M_*}{4\pi^2}} \quad (14.6)$$

Per ricavare a c'è bisogno però anche del periodo P che non abbiamo ancora ottenuto. Per farlo possiamo affidarci ancora alla terza legge di Keplero con l'approssimazione $M_p \ll M_*$, utilizzando la formula della densità della stella ρ_* .

$$\rho_* = \frac{M_*}{R_*^3} = \frac{4\pi^2}{P^2 G} \left(\frac{a}{R_*}\right)^3 \quad (14.7)$$

Con una rielaborazione delle formule viste nel capitolo parametro d'impatto possiamo fare una sostituzione e rielaborare l'equazione.

$$\rho_* = \frac{M_*}{R_*^3} = \frac{4\pi^2}{P^2 G} \left(\frac{\left(1 - \frac{R_p}{R_*}\right)^2 - b^2 \left\{1 - \left[\sin\left(\frac{t_T \pi}{P}\right)\right]^2\right\}}{\left[\sin\left(\frac{t_T \pi}{P}\right)\right]^2} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (14.8)$$

Possiamo ora ricavare una formula per calcolare il periodo.

$$P = \sqrt{\frac{R_*^3}{M_*} \frac{4\pi^2}{G} \left(\frac{\left(1 - \frac{R_p}{R_*}\right)^2 - b^2 \left\{1 - \left[\sin\left(\frac{t_T \pi}{P}\right)\right]^2\right\}}{\left[\sin\left(\frac{t_T \pi}{P}\right)\right]^2} \right)^{\frac{3}{2}}} \quad (14.9)$$

Approssimandola otteniamo così una formula più comoda e semplice.

$$P = \frac{M_* G \pi (t_T^2 - t_F^2)^{\frac{3}{2}}}{R_*^3 32 \left(\left(\frac{R_p}{R_*} \right)^2 \right)^{\frac{3}{4}}} \quad (14.10)$$

Siamo quindi riusciti a ricavare il periodo e di conseguenza inserendolo nella formula 14.6 ricaviamo anche il raggio orbitale. Infine tramite la trigonometria può essere calcolata l'inclinazione orbitale del pianeta i (immagine 32), grazie al parametro d'impatto, calcolato nel capitolo 7.4, e al raggio dell'orbita appena calcolato.

$$i = \cos^{-1} \left(\frac{b \cdot R_*}{a} \right) \quad (14.11)$$

7.6.2 Raggio orbitale, periodo e angolo orbitale di Qatar-1b

Per calcolare il periodo orbitale usiamo l'equazione 14.10, quest'operazione necessita il raggio della stella, che abbiamo già usato, e la sua massa, che abbiamo ricavato nel capitolo 7.2.3. Vista la presenza della costante gravitazionale è necessario convertire tutti i dati nelle apposite unità di misura che il calcolo prevede:

R_*	0.84 ± 0.03 rsun	$584'640'000 \pm 20'880'000$ m
M_*	0.82 ± 0.06 msun	$1.63 \cdot 10^{30} \pm 0.12 \cdot 10^{30}$ kg
R_p	0.113 ± 0.014 rsun	$78'648'000 \pm 9'744'000$ m
t_T	0.06705 ± 0.00232 giorni	$5'793 \pm 201$ s
t_F	0.03472 ± 0.00232 giorni	$3'000 \pm 201$ s

$$P = \frac{1.63 \cdot 10^{30}}{584'640'000^3} \frac{6.67259 \cdot 10^{-11} \pi (5793^2 - 3000^2)^{\frac{3}{2}}}{32 \left(\left(\frac{78'648'000}{584'640'000} \right)^2 \right)^{\frac{3}{4}}} = 131'804 \text{ s} \quad (15.1)$$

$$P = 131'804 \text{ s} = 1.53 \text{ giorni}$$

L'incertezza assoluta del periodo equivale a $69175 \text{ s} = 0.81$ *giorni*. Quindi il periodo di Qatar-1b è 1.53 ± 0.81 *giorni*. Con l'equazione 14.6 calcoliamo il raggio dell'orbita.

$$a = \sqrt[3]{\frac{131'804^2 \cdot 6.67259 \cdot 10^{-11} \cdot 1.63 \cdot 10^{30}}{4\pi^2}} = 3'628'296'435 \text{ m} \quad (15.2)$$

Con la relativa incertezza il valore del raggio dell'orbita è $3'628'296'435 \pm 1'280'290'255$ m, l'equivalente di 0.024 ± 0.0086 AU. Infine calcoliamo l'angolo dell'orbita dell'esopianeta tramite l'equazione 14.11.

$$i = \cos^{-1} \left(\frac{0.743 \cdot 584'640'000}{3'628'296'435} \right) = 83.10^\circ \quad (15.3)$$

L'incertezza assoluta equivale a 3.46° . In conclusione l'angolo è di ampiezza $83.10^\circ \pm 3.46^\circ$.

8. Analisi di Qatar-1b

8.1 Parametri orbitali di Qatar-1b

Qatar-1b è il pianeta che orbita attorno a Qatar-1, la quale si trova a $175^{+30/-22}$ pc dal nostro pianeta. La stella ha una magnitudine apparente di 12.84 mag e un'età maggiore ai 4.0 Gy. Qatar-1b è stato scoperto nell'ottobre 2009 dal gruppo *Qatar Exoplanet Survey* (Alsubai, 2011).

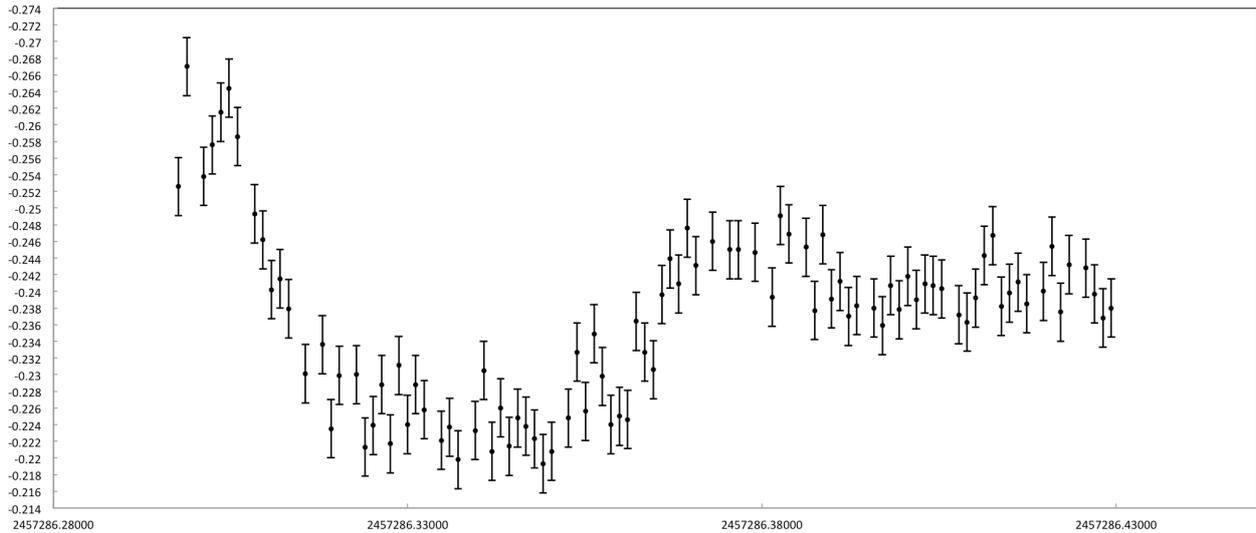


Immagine 41. Transitio di Qatar-1b.

Parametri orbitali di Qatar-1b

R_p	$1.12 \pm 0.14 r_{\text{Giove}}$
b	0.743 ± 0.083
P	1.53 ± 0.81 giorni
a	0.024 ± 0.0086
i	$83.10^\circ \pm 3.46^\circ$

Mettiamo in confronto i nostri dati con quelli dell'*Exoplanet Data Explorer* (XXVI).

Parametri orbitali di Qatar-1b (Exoplanet Data Explorer)

R_p	$1.164 \pm 0.045 r_{\text{Giove}}$
b	$0.696 + 0.021/-0.024$
P	$1.420033 \pm 1.6 \cdot 10^{-5}$ giorni
a	$0.023476 \pm 8.03 \cdot 10^{-4}$ AU
i	$83.47^\circ + 0.4^\circ/-0.36^\circ$

9. Analisi di HAT-P-36b

9.1 Parametri orbitali di HAT-P-36b

HAT-P-36b è il pianeta che orbita attorno a HAT-P-36, la quale si trova a 317.0 ± 17.0 pc dal nostro pianeta. La stella ha una magnitudine apparente di 12,26 mag e un'età di 6.6 ± 1.8 Gy. WASP-103b è stato scoperto nel gennaio 2012 (Bakos, 2012).

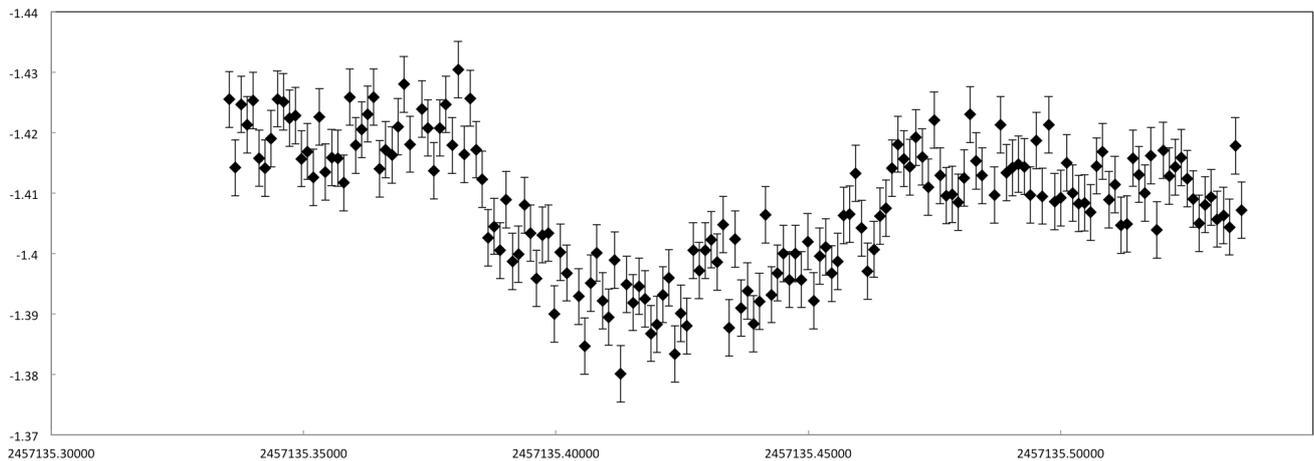


Immagine 42: Transito di HAT-P-36b.

HAT-P-36b: proprietà base della stella e del transito

T_{eff}	$5'560 \pm 100$ k - <i>Exoplanet Data Explorer</i> (XXVI.)	
R_*	0.87 ± 0.05 r_{\odot}	$605'520'000 \pm 34'800'000$ m
M_*	0.85 ± 0.04 m_{\odot}	$1.69 \cdot 10^{30} \pm 0.08 \cdot 10^{30}$ kg
m_*	-1.420 ± 0.0047 mag	$-1'420 \pm 4.7$ mmag
m_p	-1.394 ± 0.0047 mag	$-1'394 \pm 4.7$ mmag
t_T	0.09074 ± 0.00232 giorni	$7'840 \pm 201$ s
t_F	0.05850 ± 0.00232 giorni	$5'054 \pm 201$ s

Parametri orbitali di HAT-P-36b

R_p	1.38 ± 0.19 r_{Giove}
b	0.528 ± 0.225
P	2.06 ± 1.16 giorni
a	0.030 ± 0.011 AU
i	$85.92^\circ \pm 3.51^\circ$

Mettiamo in confronto i nostri dati con quelli dell'*Exoplanet Data Explorer* (XXVI.).

Parametri orbitali di HAT-P-36b (Exoplanet Data Explorer)

R_p	$1.264 \pm 0.071 r_{\text{Giove}}$
b	$0.31 + 0.078 / -0.105$
P	$1.3273470 \pm 3 \cdot 10^{-6}$ giorni
a	0.0189 ± 0.0011 AU
i	$86.0^\circ \pm 1.3^\circ$

10. Analisi di HAT-P-19b

10.1 Osservatorio Astronomico della Regione Autonoma Valle d'Aosta

Per la nostra esperienza siamo stati gentilmente ospitati all'Osservatorio Astronomico della Regione Autonoma Valle d'Aosta, situato a Saint-Barthelemy, a monte del capoluogo di Nus. Questo è uno dei più importanti centri astronomici italiani, sia per le ricerche che per le varie attività didattico e divulgative. Tutta la strumentazione necessaria alle osservazioni è collegata in modo tale da poter lavorare facilmente da un'unica postazione riuscendo comunque a controllare più apparecchi contemporaneamente. L'osservatorio è dotato di vari telescopi Cassegrain di dimensioni simili a quelle del telescopio Calina, 25 cm di diametro con un rapporto focale $f/15$. In questo osservatorio abbiamo osservato il transito del pianeta HAT-P-19b il 13 novembre 2015, per farlo ci siamo serviti del telescopio principale, un telescopio riflettore di configurazione Bowen-Vaughan, con 81 cm di diametro e rapporto focale $f/7.8$, su una montatura equatoriale a forcina (XXVII).

10.2 Parametri orbitali di HAT-P-19b

HAT-P-12b è il pianeta che orbita attorno a HAT-P-12, la quale si trova a $142,5 \pm 3,3$ pc dal nostro pianeta. La stella ha una magnitudine apparente di 12,84 mag e un'età di $2,5 \pm 2.0$ Gy. HAT-P-12b è stato scoperto il 5 novembre 2009 (Hartman, 2011), Hartman e il suo gruppo di lavoro lavorò con il W.M.Keck Observatory, l'esopianeta fu determinato tramite transito primario e confermato il 21 maggio 2014.

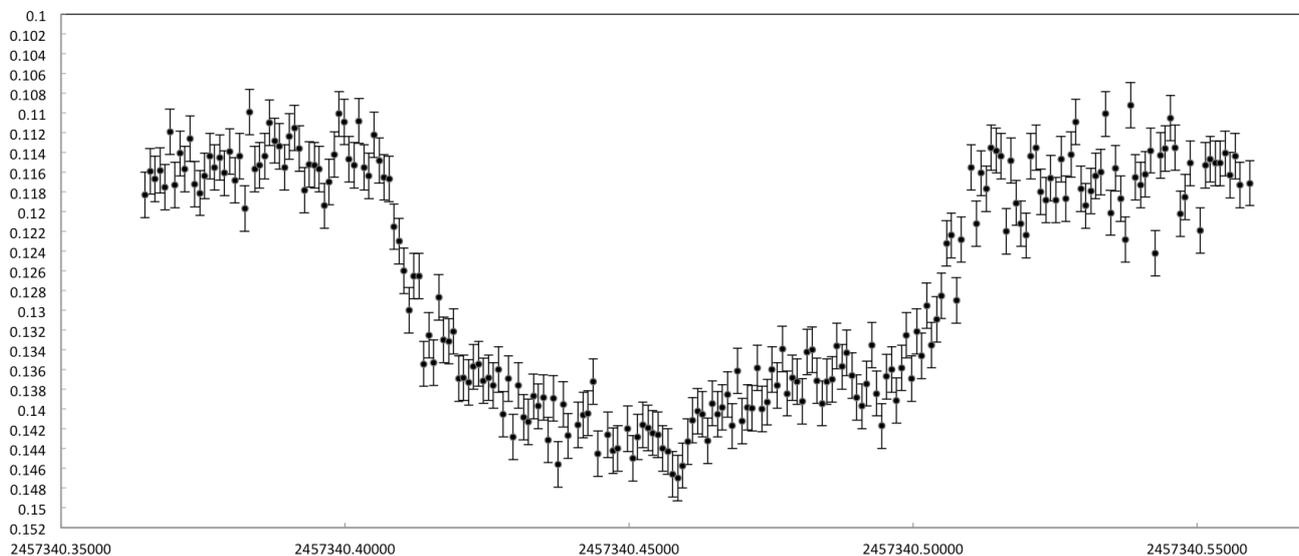


Immagine 43. Transito di HAT-P-19b del 13 novembre 2015.

HAT-P-19b: proprietà base della stella e del transito

T_{eff}	$4'990 \pm 130 \text{ k} - \text{Exoplanet Data Explorer (XXVI.)}$	
R_*	$0.83 \pm 0.04 r_{\odot}$	$577'680'000 \pm 27'840'000 \text{ m}$
M_*	$0.86 \pm 0.04 m_{\odot}$	$1.77 \cdot 10^{30} \pm 0.08 \cdot 10^{30} \text{ kg}$
m_*	$0.1149 \pm 0.0023 \text{ mag}$	$114.9 \pm 2.3 \text{ mmag}$
m_p	$0.1391 \pm 0.0023 \text{ mag}$	$139.1 \pm 2.3 \text{ mmag}$
t_T	$0.1034 \pm 0.00232 \text{ giorni}$	$8'934 \pm 201 \text{ s}$
t_F	$0.06835 \pm 0.00232 \text{ giorni}$	$5'905 \pm 201 \text{ s}$

I dati di un'osservazione, compiuta il 09 novembre 2015 da Davide Cenadelli, del medesimo transito possono rivelare con precisione la durata del periodo orbitale (immagine 43)..

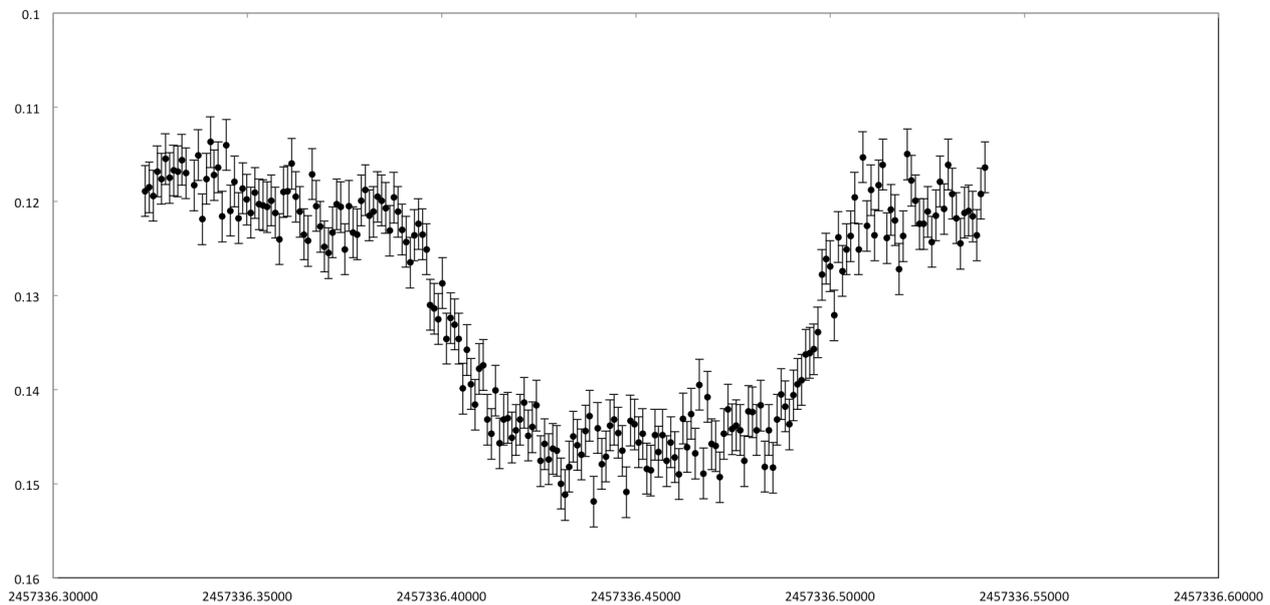


Immagine 44. Transito di HAT-P-19b del 09 novembre 2015.

Ipotizziamo che da questa osservazione a quella che abbiamo appena analizzato non è avvenuto nessun'altro transito. Possiamo confrontare i due transiti dello stesso pianeta avvenuti in due momenti diversi per ricavare il periodo dell'orbita del pianeta. Per calcolare il periodo è necessario prendere in riferimento il punto intermedio (midpoint) dei due transiti. Sottraendo il *midpoint* del transito più recente con l'altro otteniamo il periodo del pianeta in giorni con una precisione molto più elevata.

Midpoint del transito 09.11.15	Midpoint del transito 13.11.15	Periodo orbitale
$2'457'336.44855$	$2'457'340.45855$	$4.01 \pm 0.00232 \text{ giorni}$
$\pm 0.00116 \text{ giorni}$	$\pm 0.00116 \text{ giorni}$	

Compariamo questo valore con il periodo calcolato sulla base di un unico transito e con il periodo che troviamo nell'*Exoplanet Data Explorer (XXVI.)*.

Periodo calcolato con un transito	Periodo calcolato con due transiti	Periodo effettivo (<i>Exoplanet Data Explorer</i>)
$3.48 \pm 1.54 \text{ giorni}$	$4.01 \pm 0.00232 \text{ giorni}$	$4.0087780 \pm 6 \cdot 10^{-6} \text{ giorni}$

Parametri orbitali di HAT-P-19b (13 novembre 2015)

R_p	$1.23 \pm 0.12 r_{Giove}$
b	0.515 ± 0.185
P	$4.01 \pm 0.00232 \text{ giorni}$
a	$0.0423 \pm 0.0128 \text{ AU}$
i	$87.23^\circ \pm 1.95^\circ$

Mettiamo in confronto i nostri dati con quelli dell'*Exoplanet Data Explorer* (XXVI).

Parametri orbitali di HAT-P-19b (Exoplanet Data Explorer)

R_p	$1.132 \pm 0.072 r_{Giove}$
b	$0.404 + 0.061 / -0.088$
P	$4.0087780 \pm 6 \cdot 10^{-6} \text{ giorni}$
a	$0.046705 \pm 2.86 \cdot 10^{-3} \text{ AU}$
i	$88.20^\circ \pm 0.4^\circ$

Conclusioni

In questo lavoro di maturità abbiamo voluto fare uno studio che ha come oggetto gli esopianeti. L'obiettivo ultimo è stato quello di osservare esopianeti già scoperti per poter poi ricavare le loro caratteristiche e poterle confrontare con quelle ricavate da altri studiosi nel mondo. Abbiamo inizialmente dato un'idea generale sullo studio degli esopianeti, siamo partiti parlando delle loro prime scoperte e abbiamo poi spiegato i vari metodi utilizzati per la loro ricerca. Successivamente abbiamo trattato degli esopianeti abitabili, infatti uno degli obiettivi più importanti, se non il più importante, che si pone lo studio degli esopianeti è proprio quello di scovare pianeti simili al nostro che possano ospitare la vita. Per questo abbiamo parlato della zona di Goldilocks, dell'equazione di Drake e del messaggio di Arecibo fino a discutere della missione Kepler, che cerca di comprendere con quale statistica siano presenti pianeti potenzialmente abitabili nel nostro universo. In seguito abbiamo spiegato con quale metodologia vengono nominati gli esopianeti e abbiamo definito le varie tipologie dei telescopi. Siamo poi passati alla parte in cui parliamo delle osservazioni pratiche di esopianeti. Per eseguirle ci siamo serviti principalmente dell'osservatorio Calina, situato a Carona. Il metodo con cui abbiamo scelto di analizzare gli esopianeti è quello del transito. Abbiamo accuratamente scelto un lista di pianeti (OLECT) che rispettassero i parametri che il nostro telescopio richiedeva per poter eseguire una buona osservazione della profondità del transito. Abbiamo poi aspettato delle notti a ciel sereno in cui fosse possibile poter fare un'osservazione di uno dei pianeti inseriti nella lista. Siamo riusciti a fare varie osservazioni, alcune però non sono andate a buon fine, per il nostro lavoro abbiamo allora scelto il caso che ci sembrava il più opportuno analizzare, il caso di Qatar-1b. Nella redazione del lavoro abbiamo spiegato i vari accorgimenti da tener conto durante il nostro lavoro, come per esempio le problematiche dovute all'atmosfera. Successivamente abbiamo spiegato come funziona il telescopio e come avviene l'osservazione. Abbiamo poi discusso di come abbiamo analizzato i dati ottenuti dal telescopio, attraverso il programma *MuniWin*. Infine, una volta ottenuti i nostri dati, abbiamo parlato di come possiamo derivare da essi i parametri da noi cercati. Per farlo abbiamo mostrato i calcoli generali che si utilizzano per la derivazione di ogni parametro e di seguito a ognuno di essi abbiamo derivato i parametri di Qatar-1b. La nostra derivazione comunque non è completamente precisa, per questo abbiamo inserito per ogni parametro l'incertezza assoluta, ma oltre a fattori come problematiche dovute alla qualità del telescopio o alla serenità dell'aria c'è anche quello del limb darkening, le nostre derivazioni sono infatti delle approssimazioni, comunque utilizzate da molti studiosi. Abbiamo analizzato e calcolato i parametri di un altro esopianeta osservato a Carona: HAT-P-36b. Inoltre per il nostro lavoro siamo stati aiutati dall'Osservatorio Astronomico della Regione Autonoma Valle d'Aosta, dove abbiamo potuto osservare e ottenere i dati un altro caso di transito, quello di HAT-P-19b. Come per il primo pianeta anche per questi abbiamo derivato i propri parametri. In conclusione, dopo le varie derivazioni, possiamo dire di aver ottenuto dati soddisfacenti, infatti sono molto simili a quelli presenti nell'*Exoplanet Data Explorer*. Nel caso di HAT-P-36b i dati non coincidono esattamente con i valori del database, ciò è dovuto ad una elevata dispersione dei dati. Il nostro operato ha dimostrato la possibilità di osservare esopianeti usando telescopi locali di modeste dimensioni e localizzati in ambienti dove la trasparenza dell'aria è influenzata dall'inquinamento luminoso; nel caso del telescopio Calina trattasi della città di Lugano. Le nostre analisi hanno confermato i parametri orbitali di questi esopianeti sommandosi con tutti i valori ricavati da altre ricerche, diminuendo la probabilità che siano errati.

11.1 Ringraziamenti

Vogliamo ringraziare innanzitutto il nostro supervisore e insegnante di fisica per averci accompagnato nel nostro lavoro e averci dato la possibilità di creare un lavoro scientifico in ambito astronomico. La nostra gratitudine va a Francesco Fumagalli che ci ha dato la possibilità di osservare i transiti mediante l'osservatorio Calina a Carona. Ringraziamo Davide Cenadelli e l'Osservatorio Astronomico della Regione Autonoma Valle d'Aosta per averci dato l'opportunità di utilizzare il telescopio principale allo scopo di osservare un esopianeta. Siamo grati verso i nostri compagni Christopher Magnoli e Tanya Boila, i quali hanno svolto un lavoro analogo al nostro e con i quali abbiamo analizzato e risolto alcuni problemi che abbiamo incontrato durante il lavoro.

Fonti

12.1 Sitografia

- I. <https://www.goodreads.com/quotes/942724-do-there-exist-many-worlds-or-is-there-but-a>
- II. <http://planetquest.jpl.nasa.gov/page/history>
- III. <http://www.eso.org/sci/facilities/lasilla/instruments/harps/overview.html>
- IV. <http://www.tng.iac.es/info/whatstng.html>
- V. http://www.ted.com/talks/sara_seager_the_search_for_planets_beyond_our_solar_system
- VI. <http://planetquest.jpl.nasa.gov/system/interactable/11/index.html>
- VII. <http://www.seti.org/seti-institute/project/details/arecibo-message>
- VIII. <http://kepler.nasa.gov/Mission/QuickGuide/>
- IX. http://www.nasa.gov/mission_pages/kepler/main/index.html, 20.08.15
- X. <http://exoplanet.hanno-rein.de/planet/Gliese%20667%20C%20b/>
- XI. http://www.iau.org/public/themes/naming_exoplanets/
- XII. <http://spiff.rit.edu/classes/phys445/lectures/atmos/atmos.html>
- XIII. <https://drive.google.com/open?id=1maMpiZXMUvNHKybVM-FXWqFJReSAtbCR5BWGL-HTNn0>
- XIV. <http://var2.astro.cz/ETD/etd.php?STARNAME=HAT-P-32&PLANET=b>
- XV. <http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/cgi-bin/TransitView/nph-visibletbs?dataset=transits>
- XVI. <http://astronomia.comze.com/coordinate.htm>
- XVII. https://it.wikipedia.org/wiki/Sistema_di_coordinate_equatoriali
- XVIII. <http://astrolab.altervista.org/articoli/stazionare.html>
- XIX. <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>
- XX. <http://www.astrocalina.ch/chi-siamo.html>
- XXI. <http://c-munipack.sourceforge.net>
- XXII. <http://www.cfht.hawaii.edu/~baril/Pyxis/Help/flatdarkfield.html>
- XXIII. https://starizona.com/acb/ccd/software/maxim_calibrate.aspx
- XXIV. <http://www.astro-imaging.com/Tutorial/Frames.html>
- XXV. <http://spiff.rit.edu/classes/phys440/lectures/limb/limb.html>
- XXVI. <http://exoplanets.org>
- XXVII. <http://www.oavda.it/italiano/>

12.2 Bibliografia

12.2.1 Libri

- Gianluca Ranzini, 2007, Istituto Geografico De Agostini, *Astronomia*
- Duncan John, 2008, Ready-made, *Stelle e pianeti, il cielo a colpo d'occhio*
- Roger A. Freedman e William J. Kaufmann III, 2008, W.H. Freeman and Company, *Universe*, eighth edition
- Govert Schilling, 2014, Black Dog & Leventhal Publishers, *Deep Space, beyond solar system to the edge of the universe and the beginning of time*
- Vittorio Riezzo, 2011, De Agostini S.p.A., *Astronomia, schemi riassuntivi, quadri di approfondimento*
- Sara Seager, 2011, University of Arizona Press, *Exoplanets*
- Pierre Bourge, Jean Lacroux e Nicolas Dupont-Bloch, 2010, Zanichelli editore s.p.a., *Manuale pratico di Astronomia*

John C. B. Papaloizou e Caroline Terquem, 2005, Institut Universitaire de France, Planet formation and migration
 W. Romanishin, 2006, University of Oklahoma, An Introduction to Astronomical Photometry Using CCDs
 Barbara Ryden, 2002, Addison-Wesley, Introduction to Cosmology
 Stephen Hawking, 2009, Gruppo Mondadori, Caccia al tesoro nell'universo
 Robert Southey, 1837, Longman, Goldilocks and the Three Bears
 Caleb A. Scharf, 2009, University Science Books, Extrasolar Planets and Astrobiology
 Enrico Bernieri, 2012, Università Roma Tre, Charge Coupled Devices
 Philippe De La Cortadière, 1987, Librairie Larousse, Dictionnaire de l'astronomie
 Carole A. Haswell, 2010, The Open University, Transiting exoplanets

11.2.2 Articoli

Smith, B. A., Terrile, R. J., 1984, Science, vol. 226, pp. 1421-1424
 Wolszczan, A., Frail, D. A., 1992, Nature, vol. 335, pp. 145-147
 Mayor, M., Queloz, D., 1995, Nature, vol. 378, pp. 355-359
 Seager, S., Mall' en-Ornelas, G., 2003, The Astrophysical Journal, vol. 585, pp. 1038-1055
 Bignami, L., 2015, Nuovo Orione, n. 281, pp. 26-29
 Lemonick, M. D., 2014, National Geographic, n. 226, pp. 30-45
 Hertzsprung, E., Russell, H. N., 1910, Astronomische Nachrichten, n. 179, pp.373
 Bonfils, X., 2005, Astronomy and Astrophysics, n.443, pp. L15-L18
 Alsubai, K. A., 2011, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, n.417, pp. 709-716
 Hartman, J. D., 2011, The Astrophysical Journal, n. 726, 16 pp.
 Eker, Z., 2015, The Astronomical Journal, n. 149, 16 pp.
 Gillon, M., 2014, Astronomy & Astrophysics, n. 562, 4 pp.
 Espinoza, N., Jordán, A., 2015, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, n. 450, pp.1879-1899
 Bakos, G. Á., 2012, The Astronomical Journal, n. 144, 14 pp.

12.3 Immagini

0. <http://www.eso.org/public/switzerland-it/images/eso0950a/> (immagine di copertina, GJ1214b)
1. <https://www.eso.org/public/switzerland-it/images/ann12010a/>
2. <http://planetquest.jpl.nasa.gov/system/interactable/11/index.html> (immagine modificata)
3. <https://www.eso.org/public/switzerland-it/news/eso9938/>
4. <https://www.youtube.com/watch?v=XqCk87QHdNc> (immagine modificata)
5. Immagine prodotta dall'Osservatorio Astronomico della Regione Autonoma della Val d'Aosta
6. Caleb A. Scharf, 2009, University Science Books, Extrasolar Planets and Astrobiology, pp. 136
7. Roger A. Freedman e William J. Kaufmann III, 2008, Universe, eighth edition, pp. 203 (immagine modificata)
8. Caleb A. Scharf, 2009, University Science Books, Extrasolar Planets and Astrobiology, pp. 162
9. <http://planetquest.jpl.nasa.gov/system/interactable/11/index.html> (immagine modificata)
10. Nuovo Orione, 2015, n. 277, pp. 38
11. Caleb A. Scharf, 2009, University Science Books, Extrasolar Planets and Astrobiology, pp.

138

12. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/46/Gliese_581_-_2010.jpg
13. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/55/Arecibo_message.svg
14. <http://www.seti.org/seti-institute/news/nasa-ends-attempts-fully-recover-kepler-spacecraft-potential-new-missions>
15. <http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/cgi-bin/TransitView/nph-visibletbls?dataset=transits>
16. https://it.wikipedia.org/wiki/Sistema_di_coordinate_equatoriali (immagine modificata)
17. https://it.wikipedia.org/wiki/Sistema_di_coordinate_equatoriali
18. <http://astronomia.comze.com/coordinate.htm>
19. <http://astronomia.comze.com/coordinate.htm>
20. Immagine modificata tratta da MaxIm Dl. Pro 5 e The Sky 6
21. Immagine tratta dal programma MuniWin
22. Immagine scattata all'osservatorio Calina ed elaborata con MuniWin
23. Immagine scattata all'osservatorio Calina ed elaborata con MuniWin
24. Immagine scattata all'osservatorio Calina ed elaborata con MuniWin
25. <http://spiff.rit.edu/classes/phys440/lectures/limb/limb.html>
26. <http://inspirehep.net/record/1237633/plots>
27. Espinoza, N., Jordán, A., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, n. 450, pp.1879-1899
28. <http://slideplayer.it/slide/588807/>
29. Eker, Z., 2015, The Astronomical Journal, n. 149, pp. 41
30. Immagine creata con Excel
31. Immagine creata con Excel
32. Immagine creata con Excel
33. Immagine creata con Word
34. Immagine creata con Excel
35. Immagine creata con Geogebra
36. S. Seager e G. Mallén-Ornelas, 2002, The Astrophysical Journal, n. 585, pp. 1040
37. Immagine creata con Geogebra
38. Immagine creata con Geogebra
39. Immagine creata con Geogebra
40. Immagine creata con Excel
41. Immagine creata con Excel
42. Immagine creata con Excel
43. Immagine creata con Excel
44. Immagine creata con Excel

12.4 Equazioni

1. J. Papaloizou e C. Terquem, 2000
2. C.A. Scharf, 2009
3. National Geographic, vol. 226
4. <http://spiff.rit.edu/classes/phys445/lectures/atmos/atmos.html>
5. B. Ryden, 2002
6. <https://www.paulanthonywilson.com/exoplanets/exoplanet-detection-techniques/the-exoplanet-transit-method/>
7. Haswell, 2010
8. http://win.eanweb.com/transiti_extrasolari_nov_dic_2008.htm
9. Commissions romandes de mathématique, de physique et de chimie, 2010

10. https://www.astro.ex.ac.uk/people/alapini/Publications/PhD_chap1.pdf
11. https://www.astro.ex.ac.uk/people/alapini/Publications/PhD_chap1.pdf
12. https://www.astro.ex.ac.uk/people/alapini/Publications/PhD_chap1.pdf
13. https://www.astro.ex.ac.uk/people/alapini/Publications/PhD_chap1.pdf
14. https://www.astro.ex.ac.uk/people/alapini/Publications/PhD_chap1.pdf
15. https://www.astro.ex.ac.uk/people/alapini/Publications/PhD_chap1.pdf