

# Alla ricerca dei pianeti extrasolari

*Onde possiamo stimare che de stelle innumerabili sono altre tante lune, altre tanti globi terrestri, altre tanti mondi simili a questo; circa gli quali par che questa terra si volte, come quelli appaiono rivolgersi ed aggirarsi circa questa terra.*

**Filippo Giordano Bruno (1548 ÷ 1600)**

**Francesco De Paolis, Achille Nucita, Gabriele Ingresso, Francesco Strafella**

*Dipartimento di Matematica e Fisica "Ennio De Giorgi", Università del Salento, Via per Arnesano, Lecce, Italia*

**Domenico Licchelli**

*R.P. Feynman Observatory, Gagliano del Capo, Lecce, Italia*

## Introduzione

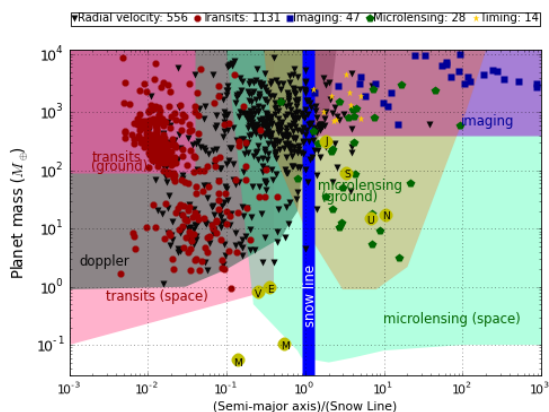
La scoperta dei pianeti extrasolari (PE) è certamente uno degli sviluppi più eccitanti dell'astrofisica dell'ultimo quarto di secolo. Sebbene per secoli filosofi e scienziati abbiano considerato l'esistenza di PE orbitanti attorno alle stelle, è stato solo con la scoperta di 51 Pegasi b nel 1995 da parte dei due astronomi svizzeri Mayor e Queloz [1] che si è avuta la prima prova diretta della non unicità del nostro sistema solare. In effetti, dopo l'affermazione di Giordano Bruno dell'esistenza di un numero infinito di mondi abitati da esseri intelligenti, il primo cacciatore di pianeti fu Christian Huygens che, nel XVII secolo, puntò il suo telescopio verso diverse stelle, ma realizzò subito che l'impresa non aveva speranza di successo con le capacità osservative del tempo. I tre secoli successivi hanno visto solo falsi allarmi e scoperte presunte. In un articolo fondamentale del 1952, Otto Struve [2] propose per la prima volta di usare misure di alta precisione della velocità

radiale delle stelle per cercare PE. Ma si dovette aspettare il 1995 per dimostrare che la tecnica suggerita funzionava realmente sul campo.

I pianeti, paragonati alle stelle, sono corpi celesti piuttosto piccoli ed emettono una quantità trascurabile di radiazione. Ciononostante gli astronomi sono stati capaci di sviluppare una serie di sofisticate tecniche osservative adatte a scoprire tracce della loro presenza. Tra le cinque tecniche principali <sup>1</sup> utilizzate per scoprire i pianeti extrasolari, ognuna con i suoi pregi e difetti, citiamo le velocità radiali, i transiti, l'astrometria, la rivelazione diretta (o *direct imaging*), ed infine la microlente gravitazionale. Quest'ulti-

<sup>1</sup>Tra le tecniche *minori* citiamo il metodo del *timing* che consente di scoprire PE attraverso l'analisi dei disturbi che essi causano su fenomeni periodici quali quelli che si hanno nel caso in cui la stella madre sia una pulsar, una stella variabile o anche un sistema binario ad eclissi. Questo metodo ha consentito di scoprire il primo (in realtà ne furono rivelati due) PE in assoluto attorno alla pulsar PSR 1957+12 [3]. Ad oggi ci sono 29 PE scoperti con questa tecnica.

ma gioca un ruolo particolare nella scoperta di pianeti di massa terrestre nella zona abitabile ed è così efficace da consentire la scoperta di pianeti a grandissima distanza dalla Terra ed anche in galassie vicine. Ad oggi il numero di PE scoperti con queste tecniche è di 3869 pianeti. Tra questi abbiamo 2887 sistemi planetari e 638 sistemi planetari multipli – costituiti cioè da più di due pianeti (per dettagli si veda il sito web <http://exoplanet.eu/>). In Fig. 1 viene mostrata la distribuzione in massa (in masse terrestri) e semiasse maggiore (in unità della distanza di abitabilità stella-pianeta) dei primi 1776 pianeti scoperti con i vari metodi. E' anche indicata la zona di abitabilità (dove è possibile la presenza di acqua allo stato liquido). La varietà, in larga parte non attesa, dei parametri fisici dei pianeti scoperti ha stimolato una nuova generazione di astrofisici a riconsiderare la questione della formazione dei pianeti e della loro evoluzione nei rispettivi sistemi solari. Stiamo ora iniziando a comprendere come si collochi il nostro sistema solare in questa ampia comunità di sistemi planetari.

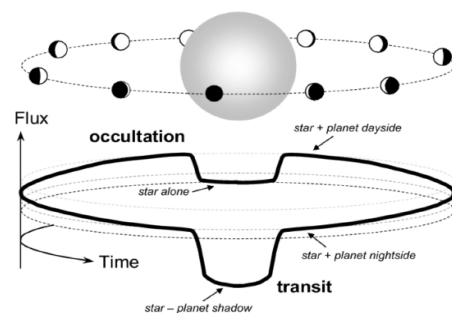


**Figura 1:** Distribuzione in massa (in masse terrestri) e semiasse maggiore (in unità della distanza di abitabilità stella-pianeta) dei primi 1776 PE scoperti con i vari metodi. E' anche indicata la zona di abitabilità (dove è possibile la presenza di acqua allo stato liquido). I vantaggi di osservazioni spaziali di transiti e microlenti sono chiari dalla figura.

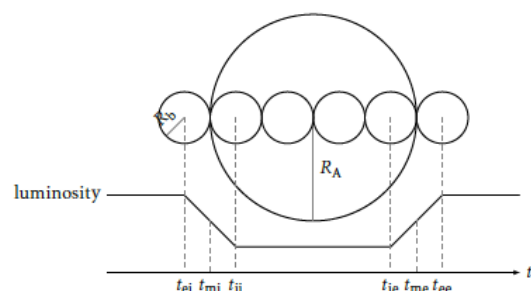
## Transiti

Il metodo di gran lunga di maggior successo nello scoprire e caratterizzare i PE è quello dei transiti, molto utilizzato soprattutto dopo il lancio

della missione spaziale Kepler che in breve tempo ha consentito di scoprire circa i tre quarti dei pianeti noti. Questa tecnica consiste nel misurare la diminuzione periodica del flusso proveniente da una stella causata dal passaggio di un pianeta che le orbita attorno. L'analisi della curva di luce che si osserva fornisce informazioni sulle dimensioni della stella e del pianeta e sul semiasse maggiore dell'orbita del pianeta. La tecnica favorisce la scoperta di pianeti giganti orbitanti vicino alla stella madre, ma il telescopio Kepler ha consentito anche la scoperta di un certo numero di pianeti di taglia terrestre orbitanti attorno a stelle relativamente piccole. Per alcuni dettagli facciamo riferimento al riquadro *Transiti planetari* e alle Fig. 2 e 3.



**Figura 2:** Schematizzazione di una curva di transito con l'eclisse primaria (transito), l'eclisse secondaria (occultazione) e le diverse fasi.



**Figura 3:** Schematizzazione di un transito di un pianeta di raggio  $R_b$  sulla stella madre di raggio  $R_A$ , con angolo di inclinazione  $i = \pi/2$ . I dischi più piccoli rappresentano le differenti posizioni del pianeta durante il transito. La curva al di sotto della stella rappresenta la curva di luce della luminosità della stella in funzione del tempo.

È facile calcolare la probabilità che un pianeta

in orbita circolare transiti sulla sua stella. Questa probabilità è data dall'angolo solido spazzato dall'ombra del pianeta normalizzato a tutto l'angolo solido

$$p = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} df \int_{\theta_0}^{\theta_1} \cos \theta d\theta \quad (1)$$

dove  $\theta$  è l'angolo polare rispetto al piano orbitale,  $f$  è l'anomalia vera (l'angolo compreso tra il pericentro dell'orbita, il fuoco e la posizione del pianeta) e  $\theta_0$  e  $\theta_1$  definiscono l'estensione angolare dell'ombra proiettata dal pianeta (dunque  $\theta_0 = -\theta_1$ ). Si ottiene dunque, tenendo conto che la geometria del sistema implica  $\theta_1 = \arcsin(R_*/r_p)$  ( $R_*$  è il raggio stellare ed  $r_p$  la distanza stella-pianeta)

$$p = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{2R_*}{r_p} df \quad (2)$$

Nel caso dei pianeti in orbita eccentrica  $r_p$  non è più costante ma varia nel tempo ed  $r_p$  è una funzione del semiasse maggiore  $a_p$  e dell'eccentricità  $e$  dell'orbita, nonché di  $f$ , secondo la nota relazione

$$r_p = \frac{a_p(1 - e^2)}{1 + e \cos f} \quad (3)$$

Si ottiene quindi (ricordando che il raggio solare è  $R_\odot \simeq 7 \times 10^5$  km)

$$p = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{2R_*(1 + e \cos f)}{a_p(1 - e^2)} df = \frac{R_*}{a_p(1 - e^2)} \simeq 0.0046 \left( \frac{R_*}{R_\odot} \right) \left( \frac{1AU}{r_p} \right) \quad (4)$$

che mostra come tale probabilità  $p$  aumenti all'aumentare dell'eccentricità dell'orbita (intuitivamente ciò è conseguenza del fatto che i pianeti spendono la maggior parte del tempo a grandi valori di  $f$ ). In Fig. 4 si mostra l'eccezionale transito della stella TRAPPIST-1 in cui si nota chiaramente la presenza di tre pianeti. E' stato trovato che in realtà questo sistema planetario è caratterizzato dalla presenza di ben sette pianeti, due dei quali nella zona di abitabilità [4].

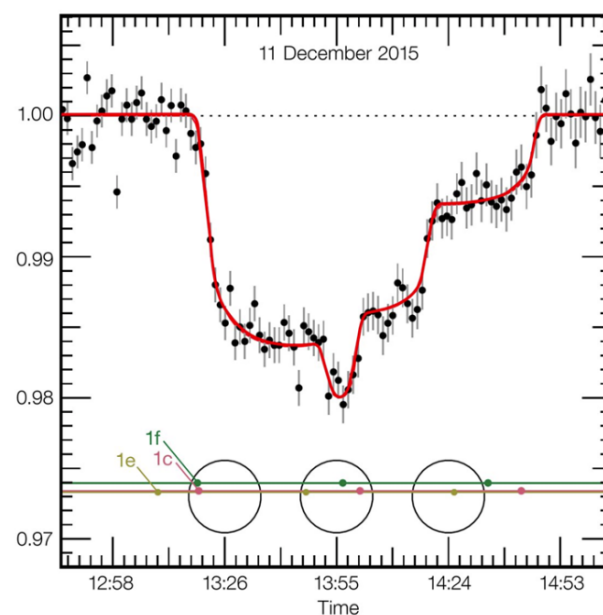
Nel 2006 presso l'Osservatorio R.P. Feynman è stato osservato il transito del pianeta XO-1b sulla sua stella (si veda Fig. 5) dimostrando che, con opportune accortezze in sede di acquisizione e di analisi dei dati, la tecnica dei transiti po-

teva essere replicata con successo anche con rivelatori commerciali abbinati a piccoli telescopi ed in ambienti cittadini fortemente penalizzati dall'inquinamento luminoso [5].

Tenendo conto della Fig. 3 è facile comprendere che dalla variazione del flusso nella curva di luce osservata

$$\frac{\Delta F}{F} \simeq \left( \frac{R_p}{R_*} \right)^2 \simeq 0.01 \left( \frac{R_p}{R_{Jup}} \right) \left( \frac{R_*}{R_\odot} \right)^{-2} \quad (5)$$

e dalla durata di ingresso ed egresso sia possibile stimare il raggio del pianeta  $R_p$ . Nella relazione precedente si è tenuto conto che il raggio di Giove è  $R_{Jup} \simeq 7 \times 10^4$  km (circa un decimo del raggio solare).



**Figura 4:** Il grafico mostra la variazione di luminosità della stella TRAPPIST-1 durante un transito triplo osservato l'11 dicembre 2015 [4]. Mentre la stella veniva osservata con lo strumento Hawk-I montato al telescopio VLT (Very Large Telescope) dell'ESO (European Southern Observatory), tre pianeti sono passati di fronte al disco della stella bloccando via via parte della sua luce (fino a circa il 2%) mostrando, per la prima volta, tre pianeti di dimensioni paragonabili a quelle della Terra.

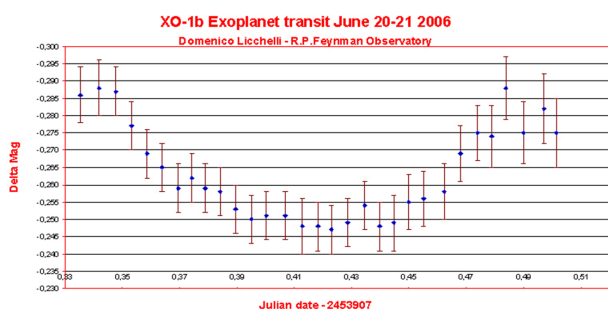
## Il metodo delle velocità radiali

La velocità radiale è la componente della velocità di una stella lungo la line di vista e può essere misurata tramite l'effetto Doppler, cioè lo spostamento della lunghezza d'onda delle righe

## Transiti planetari

È possibile individuare alcuni istanti di tempo importanti in cui la curva di luce segnala l'inizio e la fine di un transito. Facciamo riferimento alla Fig. 3 per una rappresentazione schematica di un transito.

- Quando il pianeta è interamente fuori dal disco della stella si ha l'ingresso esterno o primo contatto ( $t_{ei}$ ) e la luminosità proveniente dalla stella inizia a diminuire.
- Il tempo  $t_{ii}$  (secondo contatto o ingresso interno) corrisponde alla posizione in cui il pianeta è entrato completamente nel disco stellare e la luminosità cessa di diminuire.
- Il punto centrale tra questi due istanti definisce  $t_{mi}$ .
- Quando il pianeta è interamente nel disco e si muove verso l'esterno del disco stellare si definisce il tempo  $t_{ie}$  (egresso interno o terzo contatto) e la luminosità che viene dalla stella inizia ad aumentare.
- Il tempo  $t_{ee}$  definisce l'egresso esterno (o quarto contatto) quando il pianeta è uscito completamente dal disco stellare e la luminosità ritorna alla condizione iniziale.
- Il punto medio tra  $t_{ie}$  e  $t_{ee}$  definisce l'egresso medio  $t_{me}$ .



**Figura 5:** Il grafico mostra la variazione di luminosità (in magnitudini) della stella XO-1 durante un transito osservato nella notte tra il 20 e il 21 giugno 2006 all'osservatorio R.P. Feynman.

spettrali causato dal moto della stella relativo all'osservatore. Se la stella, di massa  $M_*$  è legata gravitazionalmente ad un altro corpo o ad un pianeta (di massa  $M_p$ ), la velocità della stella lungo la linea di vista presenterà un comportamento periodico sovrapposto ad una velocità sistematica costante (la velocità radiale del centro di massa del sistema). Non è difficile dimostrare che la componente radiale della velocità della stella è data da

$$v_* = \frac{2\pi a_*}{P} \frac{M_p \sin i}{\sqrt{1 - e^2}} \quad (6)$$

dove  $i$  è l'angolo formato tra normale al piano orbitale del sistema binario stella-pianeta e la linea di vista,  $a_*$  è la distanza orbitale della stella rispetto al centro di massa,  $P$  è il periodo orbitale del sistema ed  $e$  è l'eccentricità orbitale. Mettendo a sistema l'equazione precedente con la terza legge di Keplero

$$\frac{a^3}{P^2} = \frac{G(M_* + M_p)}{4\pi^2} \quad (7)$$

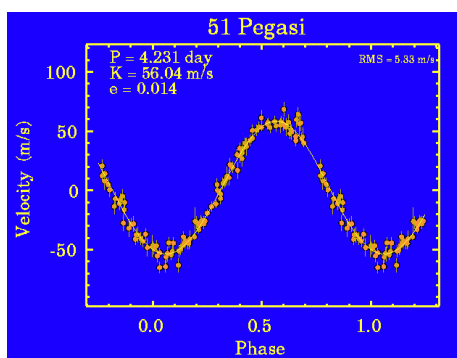
e ricordando che, mettendosi nel centro di massa del sistema  $a_* = aM_p/(M_* + M_p)$  si ottiene la cosiddetta semi-ampiezza della velocità radiale  $K$  della stella in funzione dei parametri del sistema binario:

$$K = \left(\frac{2\pi}{G}\right)^{1/3} \frac{M_p \sin i}{(M_* + M_p)^{3/2}} \frac{1}{\sqrt{1 - e^2}} \quad (8)$$

Da una procedura di *best fit* delle velocità radiali misurate è possibile ricavare la massa e gli altri parametri orbitali del sistema binario. Ad esempio nel caso del pianeta 51 Pegasi (si veda la Fig. 6) si ottiene  $K = 56.04$  m/s,  $P = 4.231$  giorni,  $e = 0.014$  e  $M_p \geq 0.47 M_{\text{Jup}}$ . Notiamo solo che uno dei limiti della tecnica delle velocità radiali è quello di consentire generalmente

solo una stima del limite inferiore della massa del pianeta, la cosiddetta massa minima  $M_p \sin i$ , stima possibile una volta ricavata la somma delle masse  $M_*$  e  $M_p$  (che in pratica si riduce alla sola massa della stella essendo generalmente trascurabile quella del pianeta). A sua volta la massa stellare può essere stimata in vari modi, dall'analisi fotometrica e spettroscopica, al confronto con i modelli evolutivi stellari fino alle osservazioni di tipo asterosismologiche che consentono di determinare i parametri fisici della stella (in particolare massa, raggio e composizione chimica) dalle frequenze di pulsazione stellari.

Partendo dall'equazione (8) non è difficile convincersi che per individuare pianeti giganti con questa tecnica è necessaria una notevole precisione nelle misure spettroscopiche, in grado di rivelare velocità radiali almeno di 30 m/s o addirittura dell'ordine di 0.1 m/s per pianeti di tipo terrestre posti ad 1 UA dalla stella madre.



**Figura 6:** La componente radiale della velocità della stella 51 Pegasi [1]. I punti sul grafico indicano le misure effettivamente eseguite con il relativo errore. È chiara la forma sinusoidale della curva da cui è possibile ricavare i parametri fisici del pianeta.

## Astrometria

Il metodo dell'astrometria è senza dubbio il metodo più antico tentato per cercare PE, ma forse anche quello che ha registrato la maggior percentuale di insuccessi<sup>2</sup>. Già nel 1844 Bessel scoprì,

<sup>2</sup>Un celebre insuccesso fu l'annuncio nel 1963 della scoperta di un PE attorno alla stella di Barnard, ma osservazioni successive dimostrarono l'infondatezza del risultato, causato da rumore sistematico che affliggeva le osservazioni.

con misure astrometriche, che la stella Sirio aveva una compagna (denominata Sirio b), che si rivelò poi essere la prima nana bianca. Ciò certamente alimentò la fede nella potenza di questa tecnica. Ad oggi, tuttavia, solo quattro PE sono stati scoperti con questa tecnica e solo di uno è stato possibile stimarne il periodo orbitale.

Anche questo metodo, come quello delle velocità radiali, si basa sulla misura del *dondolio* stellare attorno al centro di massa del sistema stella-pianeta (si veda il riquadro *Astrometria*). A differenza del metodo delle velocità radiali, però, l'astrometria misura questo movimento nella direzione perpendicolare alla linea di vista. Purtroppo, le misure della posizione delle stelle nel cielo con la precisione necessaria per rivelare la presenza di un pianeta è tutt'altro che banale, e ciò spiega il motivo degli insuccessi di questa tecnica. In effetti si è dovuto attendere il 2010 per la scoperta del primo pianeta (HD 176051b) con la tecnica dell'astrometria. Il lieto fine della faccenda è costituito dal fatto che nel 2013 è stato lanciato dall'ESA una missione spaziale, Gaia, con il compito di fare una cartografia tridimensionale estremamente accurata della nostra galassia. Gaia determinerà la posizione e la distanza di quasi due miliardi di stelle della nostra galassia con altissima precisione e si prevede che con il rilascio del quarto catalogo, previsto per il 2022-2023, potranno essere scoperti migliaia di nuovi PE.

## Rivelazione diretta

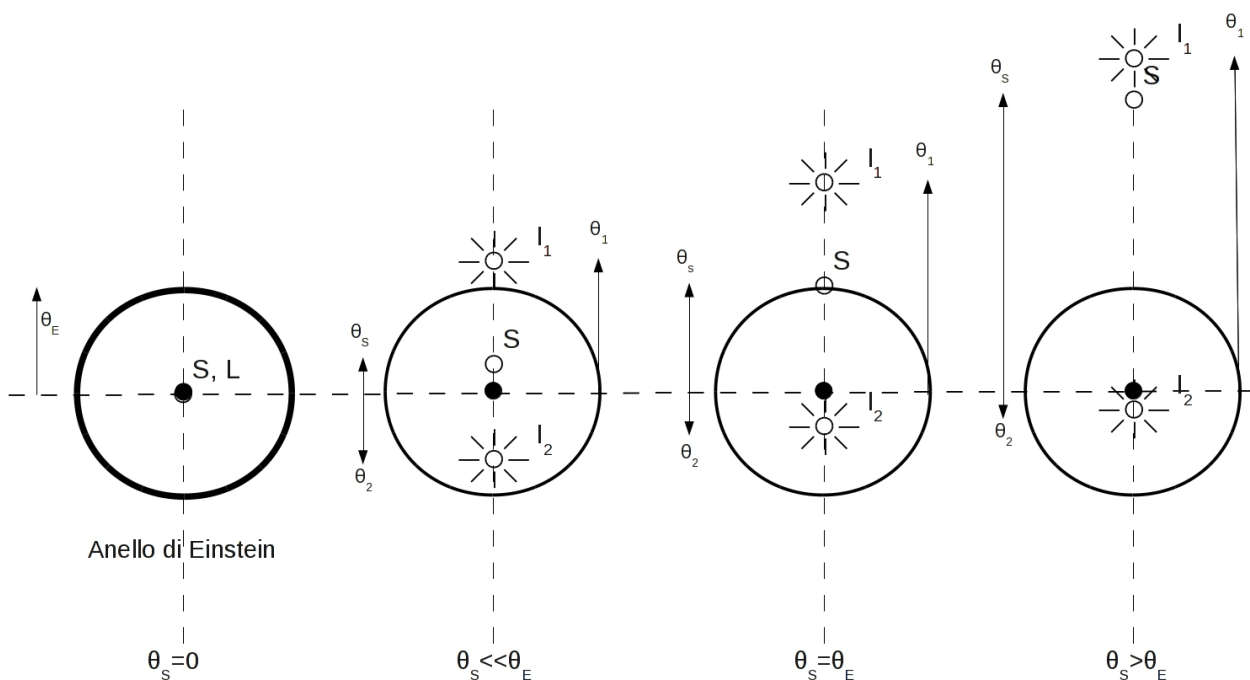
Mentre praticamente la totalità dei PE sono stati scoperti con metodi indiretti, l'unico metodo che consente di "vedere" un pianeta è quello della rivelazione diretta (o direct imaging), la tecnica più semplice da comprendere. In poche parole, si osserva una stella e si vede il pianeta. Semplice a dirsi ma estremamente difficile a farsi dato che l'intensità della luce riflessa da un PE è dell'ordine di un milionesimo di quella irradiata dalla stella, dipendendo fondamentalmente sia dalla distanza del pianeta dalla stella che dalla dimensione della superficie del pianeta. Per vedere il pianeta occorre schermare la luce della stella utilizzando un coronografo, come si fa solitamente per studiare la corona solare e mettere in evidenza i brillamenti, o impiegare tecniche

## Astrometria

Dato che stella e pianeta formano un sistema binario, essi ruotano attorno al proprio centro di massa (cdm) e, se  $a_*$  e  $a_p$  sono le rispettive distanze dal cdm, si ha che

$$a_* = \frac{M_p}{M_*} a_p, \quad (9)$$

dove  $M_*$  e  $M_p$  indicano la massa di stella e pianeta. Si vede quindi che lo spostamento  $a_*$  della stella è maggiore quanto maggiore è il rapporto  $M_p/M_*$  e  $a_p$ . Il metodo astrometrico è quindi più efficace per scoprire pianeti massivi orbitanti a grande distanza dalla stella madre. D'altra parte, poichè quello che realmente si può misurare è lo spostamento angolare della stella, vale a dire  $a_*/d$  (dove  $d$  è la distanza della stella da Terra) il metodo privilegia fortemente la scoperta di pianeti attorno a stelle piuttosto vicine.



**Figura 7:** Posizioni angolari dell'immagine primaria ( $I_1$ ) e secondaria ( $I_2$ ) per quattro diversi parametri di impatto  $\theta_s$ . La sorgente  $S$  è assunta essere puntiforme.

interferometriche per amplificare il segnale luminoso riflesso dal pianeta rispetto a quello proveniente dalla stella. L'interferometria consiste nell'utilizzare due telescopi separati da una *linea di base* la cui lunghezza  $D$  sia controllabile con estrema precisione. I fasci di luce (che assumiamo monocromatici con lunghezza d'onda  $\lambda$ ) possono allora essere combinati con una differenza di fase di  $\pi$  così da annullare completamente la luce che proviene dalla stella centrale. L'ottica insegna che si avrà interferenza costruttiva per valori dell'angolo  $\theta$  che soddisfano la condizione

$D \sin \theta = (2n+1)\lambda/2$ , dove  $n$  è un numero intero. Variando  $D$  è possibile tentare di rivelare la luce riflessa dal pianeta a lunghezze d'onda visibili, o la sua emissione termica nell'infrarosso. Uno strumento ideale per questo tipo di misure è il Large Binocular Telescope Interferometer (LBTI) in Arizona (USA) che opera nella regione infrarossa dello spettro elettromagnetico, fra  $3 \mu m$  e  $5 \mu m$ , e sulla carta dovrebbe essere in grado di rivelare PE più lontani di 0.03 secondi d'arco dalla loro stella.

Questa tecnica, che ha permesso di scoprire

fino ad ora 99 PE, consente di scovare pianeti piuttosto massicci e orbitanti a grande distanza dalla stella madre. Il più lontano dalla sua stella è 2M J2126-81 b che orbita ad una distanza di 6900 AU dalla sua stella mentre il più massiccio è WISE J0720-0846 con una massa pari a 62 volte quella di Giove.

## Microlensing

Secondo la Teoria della Relatività Generale i campi gravitazionali sono responsabili della curvatura dello spazio-tempo cosicché i raggi di luce, che seguono delle *geodetiche nulle*, nell'avvicinarsi ad un corpo singolo e massivo subiscono una deviazione di un angolo pari a  $2r_s/b$ . Nella relazione precedente,  $r_s = 2GM/c^2$  è il raggio di Schwarzschild del corpo (detto anche lente gravitazionale) di massa  $M$  e  $b$  è il parametro di impatto.

Dopo questa interazione gravitazionale, i raggi di luce possono proseguire il loro viaggio verso un osservatore a Terra che osserverà la formazione, nel piano della sorgente (e quindi al piano focale di un telescopio), di due immagini virtuali ( $I_1$  e  $I_2$  nella Figura 7). Le posizioni angolari delle immagini virtuali ( $\theta_1$  e  $\theta_2$ , rispetto al riferimento usato) sono soluzioni dell'equazione della lente  $\theta^2 - \theta_S\theta - \theta_E^2 = 0$ , dove  $\theta_S$  rappresenta la posizione della sorgente e il *raggio angolare di Einstein*  $\theta_E$  indica la scala caratteristica del fenomeno (per maggiori dettagli si veda [6]).

A titolo di esempio, nella Figura 7, riportiamo le immagini che sarebbero osservabili nelle diverse possibili configurazioni: la sorgente  $S$ , la lente  $L$  e l'osservatore sono perfettamente allineati (pannello all'estrema sinistra) e la simmetria circolare del problema suggerisce che debba formarsi (così come accade realmente) un anello luminoso (detto anello di Einstein) di raggio pari a  $\theta_E$ . Per una data separazione angolare tra la sorgente e la lente, l'immagine della sorgente è duplicata (si vedano i pannelli successivi) nelle immagini  $I_1$  (primaria) e  $I_2$  (secondaria) e, al crescere del parametro di impatto, l'immagine secondaria si avvicina alla lente mentre la primaria se ne allontana. Per grandi distanze tra lente e sorgente, il fenomeno della lente gravitazionale cessa di manifestarsi e ritroveremo la stella  $S$  nella sua posizione originaria.

Si definisce *microlente gravitazionale* (o microlensing) il fenomeno appena descritto quando applicato ad una lente avente una massa dell'ordine di quella di un tipico oggetto stellare. Volendo quantificare la separazione angolare tra le immagini virtuali si nota che, nel caso di perfetto allineamento, essa è pari a  $\simeq 2\theta_E$ . Per una stella al centro della nostra Galassia distante circa 26000 anni luce e che subisce l'effetto di lente ad opera di un oggetto della massa del Sole posto a metà strada lungo la direzione di vista, il raggio angolare di Einstein corrispondente è  $\simeq 0.001''$ , molto al di sotto del potere risolutivo, ad esempio, del telescopio spaziale Hubble: in una situazione di questo tipo le immagini virtuali non possono essere risolte!

Fortunatamente, il fatto che l'intensità specifica (o brillantezza  $I$ , intesa come l'energia che attraversa una superficie  $dA$ , nell'intervallo di frequenze  $d\nu$ , nel tempo  $dt$  e nell'angolo solido  $d\omega$  attorno alla normale alla superficie) si conserva e che le immagini multiple si sommano offre un modo per osservare gli eventi di microlente gravitazionale (osservando come la brillantezza di una stella cambia nel corso del tempo).

Infatti, se un'immagine è magnificata, essa sottende un angolo solido maggiore rispetto a quello sotteso dalla sorgente in assenza della lente. Poiché questa immagine possiede la stessa intensità specifica (potenza per steradiante) della sorgente, allora l'osservatore misurerà un flusso (ottenuto integrando sull'angolo solido corrispondente) più grande. Analoghe considerazioni (ma con un effetto opposto) si hanno nel caso di un'immagine de-magnificata. Al netto quindi, durante un evento di microlente gravitazionale, il flusso osservato di una stella varia nel tempo secondo la legge  $F(t) = A(t)F_0$ , dove  $F_0$  è il flusso della stella non amplificata e  $A(t)$  rappresenta il fattore di amplificazione<sup>3</sup> che dà la tipica forma di *Paczynski* alla curva di luce di un evento di microlente gravitazionale.

Poiché circa il 50% delle stelle si trova in un sistema binario (o multiplo) e che, come visto in precedenza, gli osservatori attuali stanno scoprendo migliaia di sistemi planetari con diversi

<sup>3</sup>Il fattore di amplificazione è dato da  $A = (u^2 + 2)/\sqrt{u^2(u^2 + 4)}$  dove  $u$  è il parametro di impatto adimensionale definito da  $u = \theta_S/\theta_E$ . Se si ha un moto relativo tra lente e sorgente,  $u$  varia nel tempo secondo una legge assegnata.

metodi, è naturale generalizzare la teoria della microlente gravitazionale considerando una lente doppia o multipla.

Nel caso di una lente binaria (intesa come un sistema binario di stelle che amplifica – gravitazionalmente – la luce di una sorgente di fondo), la curva di luce risultante cambia drasticamente rispetto alla curva di Paczyński in maniera dipendente dai parametri del sistema binario (quali la separazione tra gli oggetti ed il loro rapporto di massa) e dalla geometria generale dell’evento (come la direzione del moto della sorgente e la velocità relativa tra lente e sorgente) [7].

Quanto asserito è anche vero nel caso in cui la stella primaria avesse per compagno un pianeta. Il metodo della microlente gravitazionale può quindi essere usato, sotto opportune condizioni, per *identificare* PE intorno alle stelle. Il metodo è inoltre sensibile a valori dei parametri orbitali del sistema (quali ad esempio l’angolo di inclinazione del piano orbitale rispetto alla linea di vista, la separazione tra la stella ed il pianeta ed il loro rapporto di massa) in generale difficilmente investigabili con le altre tecniche esposte in precedenza. Questo rende il microlensing (seppur intrinsecamente complicato rispetto alle altre tecniche) particolarmente affascinante agli occhi dei cercatori di PE tanto che, ad oggi, oltre 82 PE sono stati scoperti grazie ad esso.

Perché il metodo del microlensing è più complicato rispetto alle altre tecniche? Come anticipato, la curva di luce ottenuta in presenza di un sistema doppio di lenti dipende da un certo numero di parametri come, in particolare, il rapporto di massa  $q$ , la separazione  $b$ , il tempo  $t_0$  in corrispondenza del quale la sorgente è alla minima distanza (proiettata nel piano del cielo) dal centro di massa del sistema binario, il tempo di Einstein  $t_E$  (che definisce il tempo scala caratteristico dell’evento), il parametro di impatto  $u_0$  rispetto al centro di massa, il raggio della sorgente  $R_S$ , la traiettoria seguita dalla sorgente (inclinata di un angolo  $\alpha$  rispetto all’asse del sistema binario), il fattore di *confusione* (o di *blending*)  $f_s = F_*/(F_* + F_l)$  (che misura la percentuale di luce proveniente dalla stella rispetto a quella della linea di base - sostanzialmente sorgente più lente), e il livello di magnitudine di base della sorgente  $V_0$  (qui  $F_*$  ed  $F_l$  sono i flussi provenienti dalla stella sorgente e dalla lente).

Questa abbondanza di parametri rende spesso difficile l’interpretazione dei dati osservativi.

Per un sistema binario, l’equazione della lente in forma complessa e adimensionale è data da [8]

$$\zeta = z + \frac{m_1}{z_1 + \bar{z}} + \frac{m_2}{z_2 + \bar{z}} \quad (10)$$

dove  $m_1$  ed  $m_2$  sono le masse delle componenti (con  $m_2 < m_1$  e  $q = m_2/m_1 < 1$ ),  $z_1$  and  $z_2$  le posizioni delle lenti, e  $\zeta = \xi + i\eta$  e  $z = x + iy$  le posizioni della sorgente e delle immagini. In questo modello, il sistema di riferimento è centrato nel punto medio della separazione  $b$  e la stella è posta a sinistra dell’origine. La posizione della sorgente rispetto al centro di massa della sistema binario (posto alla distanza  $-b(1-q)/(1+q)$  dal centro) può essere espressa in forma parameterica da

$$\begin{aligned} \xi &= u_0 \sin(\alpha) - \frac{(t-t_0)}{t_E} \cos(\alpha) \\ \eta &= -u_0 \cos(\alpha) - \frac{(t-t_0)}{t_E} \sin(\alpha). \end{aligned} \quad (11)$$

L’amplificazione di ciascuna immagine è data dallo Jacobiano  $J$  della trasformazione che trasforma il piano della sorgente in quello della lente. Notiamo che le posizioni delle immagini e della sorgente corrispondenti ad amplificazioni infinite ( $\det J = 0$ ) formano le *curve critiche* nel piano dell’immagine e *curve caustiche* nel piano della lente. Infine, l’amplificazione totale  $A(t)$  è ottenuta, per ciascun tempo, sommando su tutti i contributi delle singole immagini.

Nel caso di sorgente puntiforme, la soluzione dell’equazione della lente può avvenire o risolvendo un equivalente polinomio complesso del quinto ordine o attraverso la tecnica numerica del *ray tracing*. Nel primo caso il metodo è veloce ma inaccurato vicino alle caustiche (dove predice valori infiniti – e quindi non realistici – dell’amplificazione), mentre il secondo è robusto ma dispendioso in tempo di calcolo. Molto spesso è utilizzato un approccio ibrido tra il due metodo esposti in precedenza. A tutto questo si aggiunge la complicazione del fatto che la sorgente è angolarmente estesa (e quindi parti differenti del suo disco sono amplificate in maniera differente) e che la stella lente può contribuire alla luce osservata tramite il fattore di confusione. Perciò un modello teorico che possa descrivere la curva di luce di un evento di microlente binaria è dato



da

$$m_V = -2.5 \log [(A(t) - 1)f_s + 1] + V_0 - 2.5 \log f_s \quad (12)$$

e quindi dipende da nove parametri liberi. Un'eventuale procedura di adattamento ai dati sperimentali deve quindi affrontare un problema di minimizzazione di una funzione numerica e multi-dimensionale.

Si ricorda inoltre che l'evento di microlente è, per definizione, un evento transitorio che non avverrà mai più (o meglio la probabilità che l'evento si ripeta è  $\simeq 10^{-7}$  per stella e per anno). Ogni PE potenzialmente scoperto tramite questa tecnica assume quindi il ruolo di *candidato* a PE. Nel riquadro *Un pianeta extrasolare nella costellazione del Toro* riportiamo brevemente la storia della scoperta e caratterizzazione dell'evento di microlente gravitazionale più vicino alla Terra.

## Conclusioni

La scoperta di quasi 4000 pianeti extrasolari ha portato un notevolissimo avanzamento delle nostre conoscenze sui sistemi planetari. Comunque, i pianeti scoperti fino ad ora, la maggior parte con massa piuttosto grande, sono soprattutto attorno a stelle relativamente vicine. Tra i problemi chiave che si può passare ad affrontare, ora che iniziamo ad avere a disposizione una discreta statistica di PE, citiamo, ad esempio: i) I PE sono ugualmente numerosi attorno a stelle piccole e grandi? ii) I parametri fisici dei pianeti (massa, dimensioni, etc.) dipendono, e come, dalla stella madre? iii) L'abbondanza di elementi pesanti favorisce la formazione di pianeti, e perchè? iv) I sistemi planetari simili al nostro sistema solare sono comuni nella Via Lattea e nelle altre galassie? v) Quale è la distribuzione in massa e distanza dei PE in funzione del tipo spettrale e/o delle caratteristiche fisiche della stella ospite? vi) Ci sono e quanto sono comuni i pianeti terrestri nella zona di abitabilità (la zona dove può esistere acqua allo stato liquido)? vii) Perchè l'eccentricità dell'orbita di molti PE è così grande rispetto a quella dei pianeti nel nostro sistema solare?

Trovare un numero cospicuo di PE non solo nella Via Lattea ma anche in altre galassie - prima di tutto nella galassia di Andromeda (si veda

[12]) - e negli ammassi globulari (e questo può essere fatto praticamente solo con la tecnica del microlensing gravitazionale), è fondamentale per provare a rispondere a queste domande.



- [1] M. Mayor & D. Queloz, A Jupiter-mass companion to a solar-type star, *Nature*, 378, 1995, 355
- [2] O. Struve, Proposal for a project of high-precision stellar radial velocity work, *The Observatory*, 72, 1952, 199
- [3] A. Wolszczan, D. Frail, A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12, *Nature*, 355, 1992, 145
- [4] M. Gillon et al., Seven temperate terrestrial planets around the nearby ultracool dwarf star TRAPPIST-1, *Nature*, 542, 2017, 456
- [5] D. Licchelli, Exoplanet photometry from backyard observatory, *Memorie della Società Astronomica Italiana Supplement*, 11, 2007, 211
- [6] F. De Paolis, M. Giordano, G. Ingrosso, L. Manni, A. Nucita, F. Strafella, Macro / micro / retro lensing gravitazionale, *Ithaca*, Numero V, 2015, 19
- [7] P. Schneider & A. Weiss, The two-point-mass lens - Detailed investigation of a special asymmetric gravitational lens, *A&A*, 164, 1986, 237
- [8] H.J. Witt, Investigation of high amplification events in light curves of gravitationally lensed quasars, *A&A*, 236, 1990, 311
- [9] A.A. Nucita, D. Licchelli, F. De Paolis, G. Ingrosso, F. Strafella, N. Katysheva, S. Shugarov, Discovery of a bright microlensing event with planetary features towards the Taurus region: a super-Earth planet, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 476, 2018, 2962
- [10] S. Dong et al., First Resolution of Microlensed Images, preprint arXiv:1809.08243, 2018
- [11] A. Einstein, Lens-Like Action of a Star by the Deviation of Light in the Gravitational Field, *Science*, 84, 1936, 506
- [12] G. Ingrosso, S. Calchi Novati, F. De Paolis, Ph. Jetzer, A. Nucita, F. Strafella, Pixel lensing as a way to detect extrasolar planets in M31, *MNRAS* 399, 2009, 219



## Note biografiche

Gli autori sono componenti del gruppo di Astrofisica del Dipartimento di Matematica e Fisica "Ennio De Giorgi" dell'Università del Salento e si occupano sia di analisi di grandi moli di dati che di problematiche legate all'astrofisica teorica.

## Un pianeta extrasolare nella costellazione del Toro

Il gruppo scrivente ha recentemente scoperto e caratterizzato [9] un evento di lente gravitazionale *esotico*. L'evento indicato come TCP J05074264+2447555 (e successivamente ribattezzato come *l'evento di Halloween* poiché avvenuto durante la notte del 31 Ottobre 2017) è stato osservato usando un telescopio (un riflettore newtoniano del diametro di 300mm e rapporto focale  $f/5.3$ , dedicato ad osservazioni fotometriche e spettroscopiche di PE e stelle variabili) comandato da uno di noi (DL) presso l'osservatorio R.P. Feynman Observatory localizzato nell'area urbana di Gagliano del Capo (Le), nel sud del Salento. Data la sua natura, la sorgente è stata anche osservata in contemporanea da due telescopi (anch'essi di piccole dimensioni) dell'Istituto Astronomico dell'Accademia Slovaca delle Scienze localizzati a Stará Lesná (SL). Con rammarico, l'evento di Halloween non è stato osservato tramite il telescopio dell'Osservatorio Astronomico del Dipartimento di Matematica e Fisica *E. De Giorgi* in quanto, da tempo, la strumentazione necessita di manutenzione e la cupola, nel suo stato attuale, risulta inaccessibile.

La peculiarità dell'evento è data non tanto quella d'essere stato osservato da piccoli telescopi (cosa non affatto eccezionale), quanto alla sua posizione nel cielo. TCP J05074264+2447555 è infatti stato osservato verso la regione del Toro e quindi in direzione dell'anti-centro galattico. Infatti, la probabilità di osservare un evento di microlente gravitazionale dipende (come la profondità ottica dell'occorrenza) dalla densità delle sorgenti osservate e, quindi, delle possibili lenti coinvolte. Per dare un'idea, nel caso di osservazioni condotte verso il centro della Galassia il numero di eventi aspettato è di circa  $\simeq 10^{-6} - 10^{-7}$  microlenti per anno e per stella monitorata. E' necessario quindi osservare un grande numero di sorgenti (cosa fattibile con le moderne CCD) con campagne osservative lunghe per avere un numero cospicuo di microlenti. Si comprende quindi come, per massimizzare la probabilità di scoperta, si debba guardare verso regioni del cielo dense di stelle e non, ovviamente, nella direzione del Toro dove, di stelle da osservare, ve ne sono poche!

Ciò nonostante, gli eventi di microlente possono accadere in qualsiasi direzione come appunto avvenuto nel caso dell'evento di Halloween. Dopo la sorpresa iniziale, si è subito riconosciuto l'evento come quello caratterizzato dalla lente gravitazionale più vicina alla Terra mai osservata sino ad oggi. Infatti la sorgente è una lente a circa 700 pc dalla Terra mentre la lente si trova a soli  $\simeq 350$  pc da noi. In aggiunta, le osservazioni condotte hanno permesso di identificare, inequivocabilmente, una deformazione della curva di luce di microlente cosiccome accade, in genere, in presenza di una lente binaria. Seguendo una metodologia simile a quella descritta nel testo, il gruppo scrivente ha identificato un PE di tipo terrestre (avente massa tra 10 e 17 volte la massa della Terra) in orbita intorno ad una stella nana.

L'evento TCP J05074264+2447555 si è rivelato, a posteriori, un evento di straordinaria importanza in quanto ha consentito per la prima volta di risolvere le immagini delle singole immagini in un evento di microlente gravitazionale. Ciò è stato reso possibile dalle osservazioni effettuate dal gruppo guidato da Dong [10] al VLTI GRAVITY. L'angolo di separazione misurato tra le due immagini è stato di  $3.78 \pm 0.05$  milliarcsec. Tra l'altro, questa misura contraddice in maniera diretta l'affermazione nel lavoro di Einstein [11] circa il fatto che le immagini in un evento di microlente non possano essere separate dalla stella sorgente.