PARTE SECONDA: I SISTEMI EXTRASOLARI

Chapter 7

Sistemi planetari extrasolari: scoperta e caratteristiche.

7.1 Introduzione. Metodi per la scoperta

Il problema dell'esistenza di altri sistemi planetari, oltre al Sistema Solare, è evidentemente un problema tra i più importanti dell'astrofisica, anche per le ovvie implicazioni su tematiche di grande interesse culturale, come quello della diffusione della vita nell'universo. Fino a pochi anni fa questa problema era rimasto sostanzialmente irrisolto: nessuna evidenza era stata trovata in favore della esistenza di altri sistemi planetari, ma questa mancata evidenza poteva essere ragionevolmente attribuita all'estrema difficoltà di osservazione.

Da poco più di un decennio la situazione è drasticamente cambiata. Prima (nel 1992) sono arrivate le prime evidenze relative all'esistenza di corpi planetari intorno a stelle di tipo *pulsar*. Successivamente (dal 1995) sono cominciate le scoperte di pianeti orbitanti intorno a stelle normali, come il Sole. A tutt'oggi [dati maggio 2016] risultano scoperti 2116 pianeti extrasolari, in 1356 sistemi, pur con tutte le limitazioni e le incertezze di cui parleremo. Un catalogo online è tenuto aggiornato all'indirizzo:

http://exoplanet.eu

Da notare che nel maggio 2016 la NASA ha annunciato, sulla base di un lavoro pubblicato recentemente, la aggiunta di ulteriori 1284 pianeti scoperti dalla missione **Kepler**, il che porta il numero totale a oltre 3000.

Prima di proseguire è importante fare una precisazione. La compagna di una stella viene considerata a sua volta una stella se è in condizione di bruciare l'idrogeno, e questo richiede una massa dell'ordine del decimo di massa solare. Per masse più piccole, tuttavia, sono possibili reazioni termonucleari minori, e ciò fino a una massa di circa $13M_J$. Gli oggetti che superano questa massa, ma non sono stelle *tout–court* prendono il nome di **brown drarfs** e vengono considerati di transizione fra stelle e pianeti. I pianeti veri e propri hanno masse sotto le 13 masse gioviane. La separazione pianeti–brown drarfs è abbastanza convenzionale, e resa ancora più vaga dalle incertezze osservative sulla massa di molti pianeti. Nei cataloghi attualmente vengono di solito inseriti corpi la cui massa non superi, entro un certo scarto, un valore di $20M_J$.

Ci sono sostanzialmente diversi tipi di approccio al problema della scoperta dei sistemi extrasolari, sia di tipo diretto, consistente nel cercare di osservare qualche pianeta (ovviamente cominciando dai più grandi), sia di tipo indiretto, consistente nell'osservare gli eventuali effetti di un sistema planetario sulla stella centrale.

Nella figura 7.1, sviluppata per la prima volta da Perryman (2000), aggiornata al 2015 e ricavata dal link

http://luth7.obspm.fr/20150708-macp-detection-methods.pdf

vengono sintetizzate le diverse tecniche di scoperta usate e usabili per la scoperta di pianeti extrasolari. Ovviamente M_E e M_J sono la massa della Terra e di Giove, e i numeri messi al termine di alcuni rami si riferiscono alle scoperte fatte (al momento della elaborazione della figura) con il metodo corrispondente (i punti interrogativi sottolineano i casi dubbi).

7.1.1 Imaging; tecniche indirette "esotiche": pianeti di pulsar, microlensing

La scoperta diretta di un sistema planetario è estremamente difficile; in primo luogo per un problema di risoluzione: la separazione angolare tra il Sole e Giove sarebbe al più di un secondo d'arco già da $5\,pc$, che è una distanza interstellare molto piccola; ma questo non è il problema più grande, che risiede invece nella spaventosa differenza di luminosità fra la stella centrale e i pianeti. Tale rapporto può essere espresso dalla relazione (si veda anche la Eq. 3.1 e le successive):

$$L_p/L_* = p(\lambda, \alpha)(R_p/a)^2 \tag{7.1}$$

dove i suffissi p e * si riferiscono, qui e nel seguito, al pianeta e alla stella centrale, a è il semiasse maggiore dell'orbita e la funzione p dipende sostanzialmente dall'albedo e dalla fase alla quale si osserva il pianeta. Per osservazioni nel visibile del sistema Sole-Giove il rapporto definito nella (7.1) è dell'ordine di 10^{-9}. Il rapporto cresce un po' nell'infrarosso, centrato sullo spettro di emissione termica del pianeta, ma resta sempre estremamente piccolo. Si noti che il problema non consiste nella piccola luminosità del pianeta, ma nel contrasto. Di per sè un pianeta come Giove risulta circa 20 magnitudini meno luminoso della sua stella di riferimento. Un Giove intorno a un Sole a $10pc$ di distanza avrebbe una magnitudine intorno a 25, molto debole ma osservabile.

La stella centrale disperde i suoi fotoni intorno al centro della propria immagine, e, data l'enorme differenza di luminosità, ciò basta a mascherare completamente l'immagine dell'eventuale pianeta. Il problema può essere parzialmente affrontato con tecniche di mascheramento, quali quelle adottate nei coronografi, e significativi miglioramenti possono essere realizzati mediante osservazioni spaziali (con le quali l'immagine della stella non è più quella allargata dal *seeing* ma quella definita dall'ottica, mediante la *figura di diffrazione*), metodi di ottica adattiva e, soprattutto, tecniche interferometriche. È stata anche definita la promettente tecnica del *"nulling"*, consistente nel costruire volontariamente un interferometro "difettoso" che, mediante una opportuna differenza dei cammini ottici, mandi in controfase la stella centrale, che viene così "annullata". Il pianeta, invece, trovandosi in una posizione diversa, non centrale nell'immagine, non viene cancellato e risulta di conseguenza ben visibile. Al momento però possiamo registrare all'attivo non molte osservazioni dirette di pianeti, mentre le tecniche di imaging ci forniscono dati preziosi su dischi di polvere (potenziali strutture protoplanetarie), e possibili *debris disks*, ossia dischi circumstellari in cui già parte della materia si è condensata

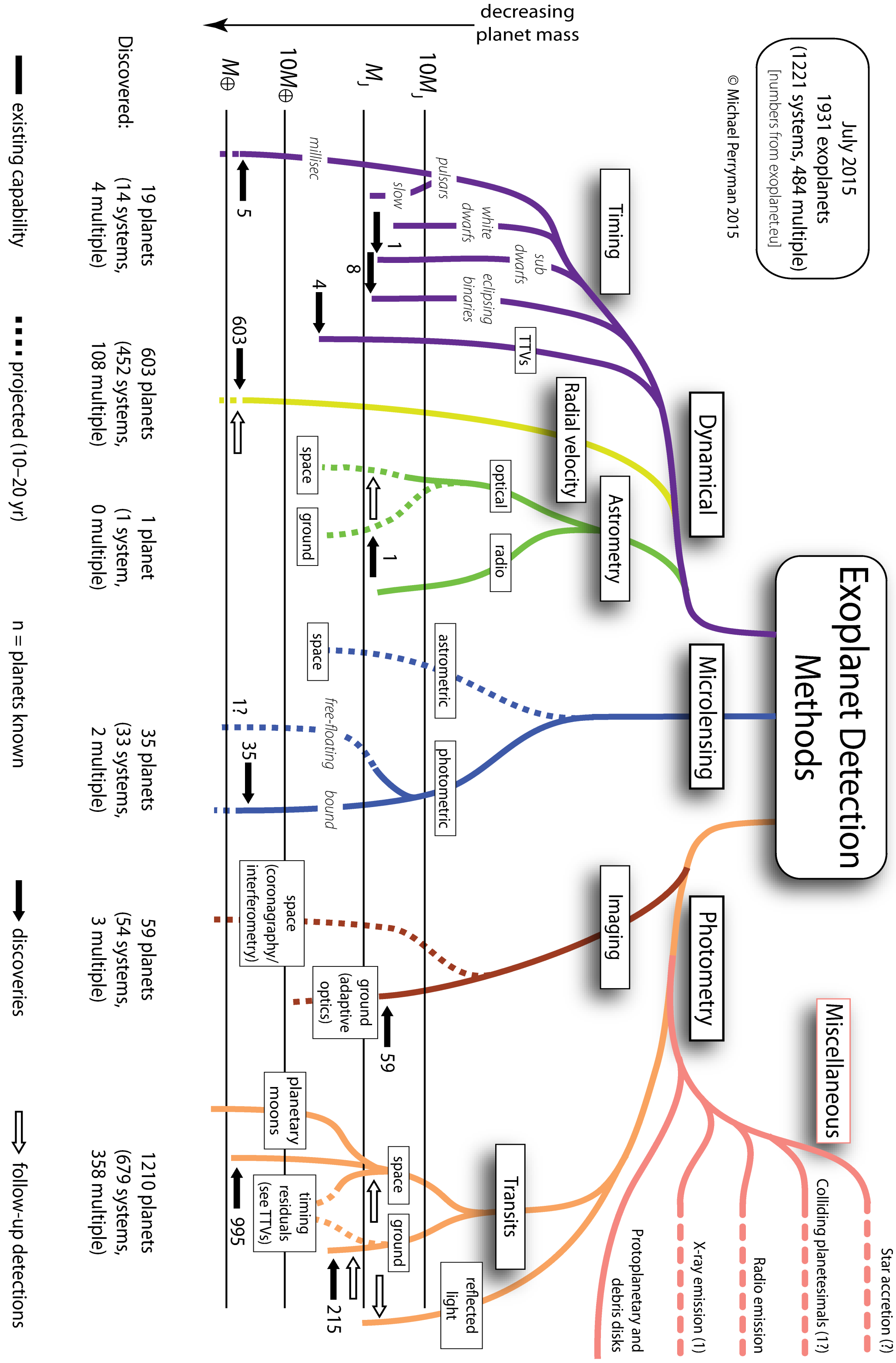

Figure 7.1: Il "Perryman plot"

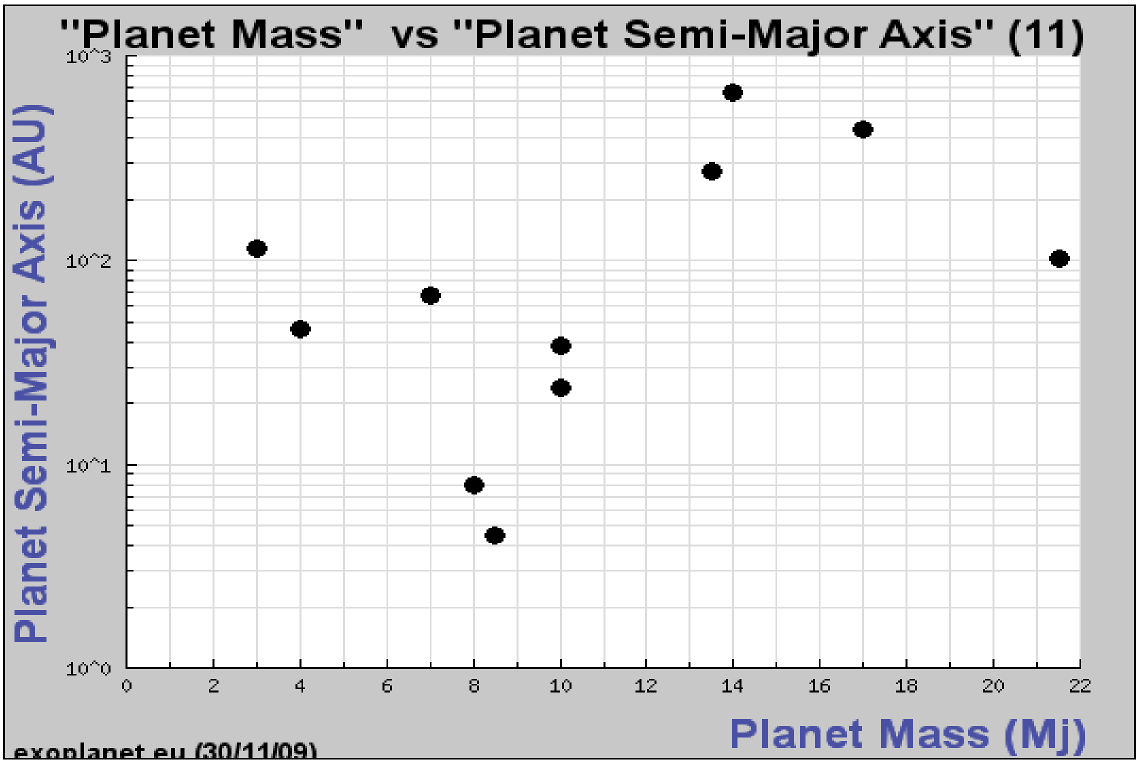

Figure 7.2: Correlazione fra massa (in unità di masse di Giove) e semiasse maggiore (AU, scala logaritmica) per i sistemi osservati tramite imaging - Figura ottenuta dal citato sito exoplanet.eu; agg. dicembre 2010.

in corpi planetari. Al maggio 2016 le osservazioni dirette catalogate si riferiscono a 60 sistemi, per un totale di 65 pianeti. Parecchi pianeti hanno masse superiori a $10M_J$, e sono quindi al confine con le brown dwarfs. È interessante rilevare che per questi pianeti vale un effetto di selezione opposto a quello che sarà presente nei due campioni principali (pianeti scoperti per velocità radiali e per transiti; v. nel seguito): sono meglio visibili dei pianeti molto lontani: quelli osservati hanno quasi tutti semiasse maggiore superiore a $10AU$ (come dimostrato nella figura 7.2, aggiornata a fine 2010).

La scoperta di un sistema planetario con tecniche *indirette* si avvale di diversi metodi. Alcuni di questi sono piuttosto peculiari e di rara applicazione, e ne parleremo per primi, altri invece sono più classici e simili a quelli usati per lo studio delle stelle doppie.

Una tecnica piuttosto peculiare, che però è stata storicamente la prima a consentire la scoperta di un pianeta extrasolare, è basata sulle osservazioni delle *pulsar*, stelle compatte (tipicamente resti di supernovae) che emettono un segnale con periodicità molto regolare, e con periodi dell'ordine dei secondi o dei millisecondi (il fenomeno è legato a processi di *alta energia*, connessi con la presenza di intensi campi magnetici). Se questi oggetti hanno un pianeta, il moto del sistema intorno al comune centro di massa provoca uno spostamento periodico della stella e quindi il segnale pulsante arriva all'osservatore in anticipo o in ritardo, a causa della variazione del cammino ottico. Già in un sistema tipo Sole–Terra il Sole percorre una ellisse di semiasse $\simeq (m_E/m_\odot)a_E \simeq 500km$, e questo provoca un ritardo o un anticipo del segnale dell'ordine del millisecondo, ben misurabile per pulsar di corto periodo. Il metodo è quindi efficiente, ed ha in effetti portato alla prima scoperta di un corpo planetario extrasolare, nel 1992 (ad oggi 23 pianeti). Va però rilevato che sistemi planetari intorno a pulsar sono completamente diversi dal Sistema Solare; è anche probabile che non siano sistemi planetari nati con la stella ma conseguenza dei processi legati alla fase di supernova. Non rispondono quindi alle fondamentali domande: quanto è frequente la formazione di sistemi planetari all'atto della formazione stellare, quanto è frequente la formazione di pianeti terrestri, quanto può essere frequente la nascita della vita?

Un'altra tecnica molto interessante è basata sulle osservazioni di *microlensing* gravitazionale. La teoria delle lenti gravitazionali non verrà discussa nei dettagli in questa sede. In generale, se vicino al cammino ottico di un raggio di luce emesso da una sorgente S e diretta ad un osservatore O è presente un corpo L di massa M_L, il raggio di luce verrà deviato. I raggi di luce che raggiungeranno l'osservatore non saranno quelli sulla retta OS ma saranno dei raggi deflessi che passeranno "sopra" o "sotto" la sorgente. Se O, L, S sono esattamente sulla stessa retta la configurazione gode di simmetria assiale, e i raggi utili saranno localmente su una superficie conica. Si potrà allora vedere una immagine anulare della sorgente (**anello di Einstein**). In pratica però non ci sarà mai un allineamento perfetto, le sorgenti non saranno puntiformi ecc.: l'anello di Einstein non sarà osservabile, ma la sorgente lontana vedrà la sua luminosità amplificata dalla lente. La definizione dell'anello di Einstein torna utile per capire i termini di questa amplificazione. Le dimensioni **angolari** dell'anello di Einstein sono date dalla equazione:

$$\theta_E^2 = \frac{4GM_L D_{LS}}{c^2 D_{OL} D_{OS}} \tag{7.2}$$

dove, ovviamente, D_{AB} è la distanza fra A e B. Si noti che nell'espressione compare in sostanza, oltre alle tre distanze tipiche della geometria del sistema, il doppio del **raggio di Schwartzschild** $R_s = 2GM/c^2$ della lente. I fenomeni di lensing possono interessare oggetti extragalattici, o oggetti all'interno della nostra Galassia; questo secondo è il caso che ci interessa. Le sorgenti galattiche possono essere stelle del nucleo galattico (distanza dell'ordine di $10kpc$), e le lenti stelle tipicamente a metà strada. Inserendo questi numeri, per una lente di massa più o meno solare, si ottiene un anello di dimensioni angolari nettamente inferiori al millisecondo d'arco (una ragione in più per non sperare di vederne...). È però anche interessante stimare le dimensioni lineari dell'anello di Einstein. Definendo: $d = D_{OS}, yd = D_{LS}, (1-y)d = D_{OL}$ si ha:

$$R_E = (1-y)d\theta_E = (1-y)d(4GM_L/c^2)^{1/2}[y/(1-y)d]^{1/2} = [2y(1-y)R_s d]^{1/2} \tag{7.3}$$

L'anello raggiunge le massime dimensioni lineari per $y = 1/2$, ossia per una lente a metà strada: esse sono in tal caso di alcune unità astronomiche.

Le dimensioni dell'anello di Einstein definiscono il livello di allineamento richiesto per avere una significativa amplificazione del segnale della sorgente. In pratica il raggio di luce deve passare ad una distanza dalla lente inferiore a R_E. Da un lato questo rende piuttosto rare le osservazioni del fenomeno. In base a banali considerazioni statistiche il raggio deve passare entro un cilindro avente come base un cerchio di raggio R_E e di altezza d, nel quale, in base alla densità stellare del disco galattico, c'è in media una stella in meno di un caso su centomila. Per esattezza, comunque, non si tratta proprio di un cilindro (forse meglio dire una salsiccia), perchè R_E varia al variare della posizione della lente, e in sezione il lato lungo non è una retta ma una curva convessa, che si avvicina all'asse centrale agli estremi. Peraltro le stelle si muovono, con velocità relative che possono essere dell'ordine delle centinaia di chilometri al secondo. Un allineamento parziale ha quindi una durata limitata nel tempo (settimane), e può essere osservato dalla variazione della luminosità della stella sorgente, con un picco di questa durata, la cui altezza dipende dal migliore allineamento raggiunto. Il fenomeno può essere osservato mediante campagne dedicate, in cui vengono osservate molte sorgenti contemporaneamente (stelle verso il nucleo galattico). Si noti che la durata Δt della campagna aumenta il numero delle osservazioni possibili. Il moto relativo delle stelle rende "utili" non più le stelle presenti nel "cilindro" sopra definito (condizione istantanea), ma quelle che stanno in un volume avente come base un rettangolo di lati $v_{rel}\Delta t, d$ e come altezza il raggio di Einstein (dipendente dalla distanza). Dato il grande numero delle sorgenti disponibili, è stato così possibile osservare centinaia di eventi all'anno.

L'interesse di questa tecnica per la scoperta di pianeti extrasolari risiede in una proprietà non troppo intuitiva. È per la verità ovvio che se la lente è costituita da più masse avremo un fenomeno più complesso, con una curva di luce avente eventualmente più picchi. Non è però ovvio capire che la presenza e la osservabilità di questi picchi quando si ha una stella con uno o più pianeti non dipende tanto dalla massa dei pianeti quanto dalla loro collocazione, in posizioni efficaci interne ma spesso non lontane dall'anello di Eistein. In linea di principio potrebbero essere osservabili, con questa tecnica, anche pianeti di taglia terrestre. Da notare anche che è favorita la scoperta di pianeti intorno a stelle piuttosto lontane, difficilmente studiabili con altre tecniche. Infatti la regione utile è di estensione proporzionale alla superficie racchiusa dall'anello di Einstein, che raggiunge dimensioni ragguardevoli quando la stella lente è a diversi *kpc* di distanza.

Sono stati finora osservati 46 pianeti con la tecnica del microlensing, e in un paio di casi le loro masse sono di poche volte superiori a quella della Terra. Purtroppo la tecnica del microlensing presenta anche alcune limitazioni che la rendono –anche in prospettiva– di modesta efficacia. Gli eventi non sono -in pratica– ripetibili, ed è molto difficile anche sperare di poterli confermare con altre tecniche.

Nella figura 7.3 (aggiornata a dicembre 2010 e quindi incompleta) vengono rappresentati massa e semiasse maggiore dei pianeti scoperti tramite microlensing. Come si vede le masse sono spesso relativamente piccole (anche confrontate con quelle scoperte con altre tecniche indirette; v. seguito), e i semiassi maggiori sono, come previsto, da qualche frazione a poche unità astronomiche.

7.1.2 Scoperta mediante tecniche astrometriche, spettroscopiche e transiti

I metodi più usati per la scoperta e lo studio dei sistemi planetari extrasolari sono analoghi a quelli introdotti per le stelle doppie. Abbiamo già detto che l'osservazione diretta (analoga a quella delle *binarie visuali*) è al momento molto difficile, e applicabile solo in casi particolarmente favorevoli (e quindi con rilevanti *effetti di selezione*). Le stelle binarie visuali vengono studiate però anche da un punto di vista **astrometrico**: la loro posizione sulla sfera celeste

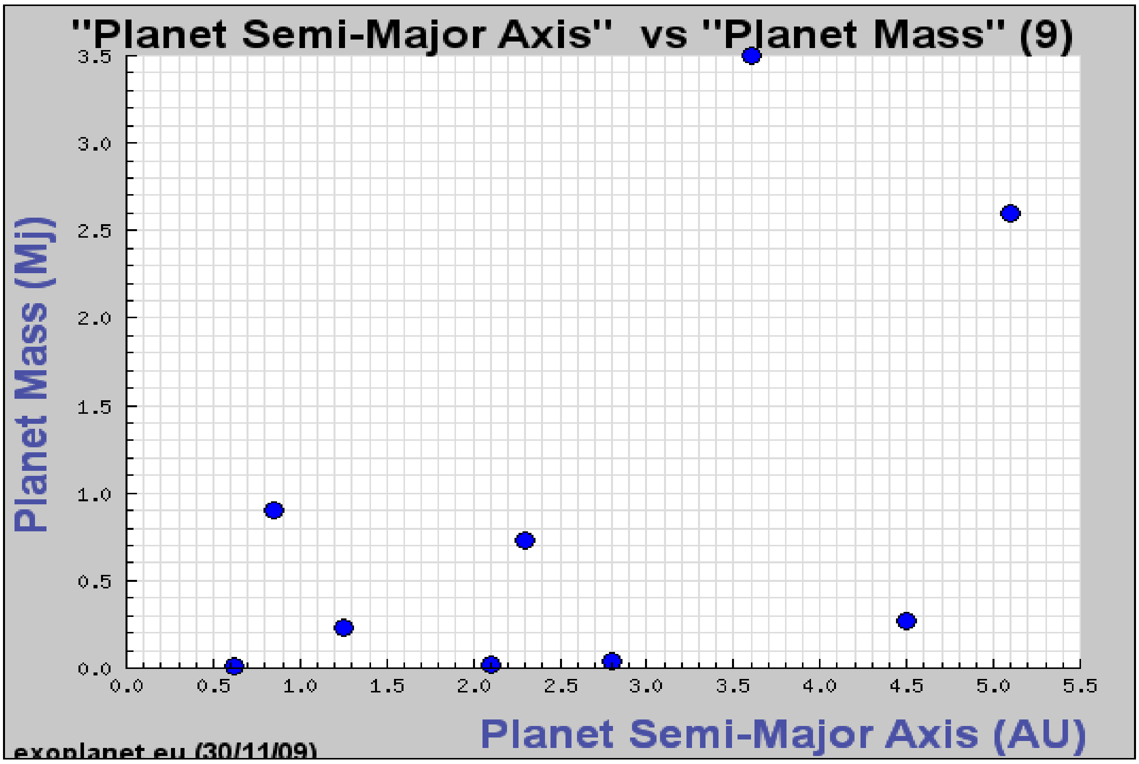

Figure 7.3: Correlazione fra semiasse maggiore (AU) e massa dei pianeti scoperti tramite microlensing. Figura presa dal citato sito exoplanet.eu; agg. dicembre 2010.

varia periodicamente in virtù del moto orbitale. Per sistemi stellari composti da componenti abbastanza simili è tutt'uno osservare tali moti e *vedere* le due stelle; per i sistemi planetari invece l'osservazione del pianeta è impossibile, ma può essere misurato il moto kepleriano ellittico della stella centrale sotto l'effetto gravitazionale del pianeta. E' facile dimostrare che il semiasse maggiore dell'ellisse sottende un angolo:

$$\theta = \frac{m_p}{r}\left(\frac{P}{M_*}\right)^{\frac{2}{3}} \tag{7.4}$$

dove m_p e M_* sono massa del pianeta e della stella in unità solari, il periodo è in anni e la distanza r è in parsec. Nel ricavare la (7.4) abbiamo utilizzato le leggi di Keplero e trascurato m_p nell'espressione della massa totale.

Come è evidente, l'angolo diventa tanto più piccolo quanto la distanza aumenta; il metodo è quindi promettente per scoprire eventuali sistemi vicini. Il problema è che anche a pochi parsec di distanza un sistema Sole–Giove provoca uno spostamento della stella dell'ordine del millisecondo d'arco, troppo piccolo per essere rivelato da terra e al limite delle potenzialità attuali delle migliori misure spaziali. I successi sono per ora limitati, ma la missione ESA **Gaia** potrebbe riuscire a fare numerose misure utili, nel prossimo futuro. Ancora più difficile è vedere l'effetto di un pianeta come la Terra, anche se una futura missione come quella NASA, al momento sospesa **SIM**, basata su un interferometro spaziale, potrebbe riuscirci.

Le metodologie spettroscopiche usano la osservazione di una componente periodica nella velocità radiale di una stella, dovuta al moto di cui sopra. Il ragionamento è identico a quello fatto per le binarie spettroscopiche, in particolare per quei sistemi in cui solo una delle due componenti riesce a essere studiata.

Ricordiamo quanto detto per le binarie spettroscopiche. La terza legge di Keplero può essere applicata a un sistema di due corpi interagenti, una stella di massa M_* e un pianeta di massa m_p; moltiplicando ambo i membri per il cubo del $\sin i$ (i è l'inclinazione dell'orbita rispetto al piano, sulla sfera celeste, normale alla linea di vista) si ottiene:

$$(M_* + m_p)\sin^3 i = \frac{4\pi^2 a^3 \sin^3 i}{GP^2} \tag{7.5}$$

Se il sistema presenta entrambi gli spettri visibili, è possibile calcolare dalle velocità radiali $a_* \sin i$ e $a_p \sin i$, e di conseguenza anche $(M_* + m_p)\sin^3 i$; inoltre

$$\frac{a_* \sin i}{a_p \sin i} = \frac{m_p}{M_*}$$

e si può ottenere quindi:

$$M_* \sin^3 i; \quad m_p \sin^3 i \tag{7.6}$$

Se, invece, è visibile soltanto uno spettro, come, al momento, nella generalità dei sistemi stella+pianeta, possiamo seguire il seguente ragionamento:

$$a = a_* + a_p = a_*(1 + a_p/a_*) = a_*(1 + M_*/m_p) = a_*(m_p + M_*)/m_p$$

e quindi:

$$a^3 \sin^3 i = a_*^3 \sin^3 i \left(\frac{m_p + M_*}{m_p}\right)^3$$

Si può quindi calcolare la funzione delle masse:

$$(M_* + m_p) \sin^3 i \, \frac{m_p^3}{(M_* + m_p)^3} = \frac{4\pi^2}{GP^2} \, a_*^3 \sin^3 i \tag{7.7}$$

ossia

$$f(M_*, m_p) = \frac{m_p^3 \sin^3 i}{(M_* + m_p)^2} \tag{7.8}$$

Se il sistema è anche fotometrico (si ha cioè una eclissi del sistema quando una delle due componenti transita davanti all'altra) è possibile valutare l'inclinazione e quindi risalire alle masse; altrimenti, ponendo $i = \pi/2$, si ottiene limite inferiore delle stesse.

Per un sistema stella+pianeta è di solito una buona approssimazione trascurare la massa del pianeta rispetto a quella della stella. Inoltre le osservazioni spettroscopiche (ad alta risoluzione; v. nel seguito) della stella permettono una buona stima, basata anche su modelli teorici, della massa della stella. Utilizzando i calcoli precedenti si vede facilmente che l'ampiezza di variazione della velocità radiale è data (usando masse solari e anni unità) dalla espressione:

$$v = \frac{30 m_p \sin i}{M_*^{2/3} P^{1/3}} \tag{7.9}$$

dove v è in km/s e i è l'inclinazione dell'orbita sulla superficie della sfera celeste.

Sempre nel caso del sistema Sole–Giove ciò corrisponde, almeno per un angolo i vicino al valore ottimale di $\pi/4$, a poco più di $12m/s$; si scende a $10cm/s$ per il sistema Sole–Terra. Se si riesce a misurare questa variazione di velocità diventa immediato calcolare $m_p \sin i$.

Fino a non molti anni fa entrambi questi limiti erano fuori dalla portata degli strumenti esistenti. La situazione è cambiata drasticamente nell'ultimo ventennio. La predisposizione di spettrografi particolari, basati su principi innovativi (quali la copresenza sullo spettro delle righe dello spettro astronomico e di quelle di un gas presente nello strumento) ha permesso di raggiungere una sensibilità che permette di misuare velocità di pochi metri al secondo. Sembra però intrinsecamente preclusa la possibilità di scendere sotto a $1m/s$, essendo a questo livello presente un rumore nei dati dovuto alle macchie stellari e ad eventuali fenomeni convettivi alla superficie della stella (usualmente presenti in stelle di sequenza di piccola o media massa, le più interessanti per la ricerca di pianeti).

Per questa via sono stati scoperti, negli ultimi anni, 667 pianeti (dato aggiornato a maggio 2016), per lo più in sistemi diversi (ma ormai i sistemi multipli sono piu' di cento), che hanno permesso l'avvio di un lavoro sistematico di analisi. L'incertezza legata alla mancata conoscenza dell'angolo può essere rimossa se il pianeta è osservato anche per via fotometrica (v. qui sotto), o tenuta sotto controllo sulla base di considerazioni statistiche.

Infine la scoperta di sistemi planetari può avvenire per via fotometrica; un pianeta come Giove, transitando davanti ad una stella come il Sole o meno luminosa,dà luogo ad una diminuzione di luce facilmente osservabile. Infatti il rapporto fra le dimensioni dei due corpi porta alla occultazione di circa l'1% della superficie stellare, e alla conseguente analoga diminuzione di luminosità, facilmente rilevabile con una fotometria anche standard e con osservazioni da Terra. Il transito di un pianeta come la Terra davanti al Sole causerebbe invece una diminuzione relativa dell'ordine di 10^{-4}, non osservabile da Terra (a causa degli effetti perturbatori dell'atmosfera), ma misurabile con certezza dallo spazio (questa è la fondamentale motivazione di una missione come la **Kepler**, partita nella primavera del 2009).

Purtroppo l'angolo solido entro cui l'eclisse è visibile è molto piccolo: sempre per una configurazione Sole-Giove, siamo intorno a 10^{-6} (fig. 7.4); la via fotometrica, per essere efficace, richiede l'elaborazione di un programma automatizzato di osservazioni, che permetta di acquisire ed elaborare le molte misure necessarie per avere una significativa probabilità di vedere un'eclisse. Tuttavia le caratteristiche dei pianeti extrasolari scoperti finora (prevalentemente mediante le tecniche spettroscopiche) hanno reso assai meno stringenti le considerazioni qui fatte. Molti dei pianeti scoperti sono molto più vicini alla stella di quanto non sia Giove al Sole. Recentemente sono stati perfino scoperti pianeti con periodo intorno ad un giorno. Questo corrisponde ad una distanza orbitale di pochi milioni di chilometri ($\simeq 3$ per una massa stellare come quella del Sole), ossia di pochi raggi stellari. La probabilità di osservazione casuale di una eclisse, con una osservazione, dipende in sostanza dal quadrato del rapporto R_*/a. Se poi un sistema viene seguito per un tempo uguale o maggiore del periodo orbitale (richiesta ambiziosa per un periodo di molti anni, ma più ragionevole se il periodo è invece di pochi giorni) la probabilità di poter vedere il transito è data da $(R_* + R_p)/a \simeq R_*/a$. Se occorrevano moltii anni di osservazione per poter avere una probabilità dell'ordine di 10^{-3} di osservare un transito di Giove davanti al Sole, per questi sistemi molto stretti poche notti possono fornire una significativa probabilità di osservazione!

Recentemente sono state pubblicate delle survey osservative: per esempio una su stelle del bulge galattico, che ha trovato una decina di transiti "planetari", tipicamente di sistemi molto stretti. Recenti missioni spaziali (**Corot** e **Kepler**) honno scoperto e/o stanno scoprendo molti sistemi. Inoltre è stato anche possibile in alcuni casi *ritrovare* per via fotometrica un pianeta già scoperto per via spettroscopica, migliorando anche, utilizzando tutti i dati ottenuti con tecniche diverse, la conoscenza delle sue caratteristiche fisiche (massa) e orbitali (eccentricità, inclinazione). Per questi sistemi, una volta verificato che l'orientazione dell'orbita consente di osservare il transito, è possibile ripetere le osservazioni, spesso anche con strumentazioni non particolarmente sofisticate, a volte addirittura amatoriali.

Ovviamente, essendo la probabilità di poter vedere l'eclisse uguale al rapporto raggi/semiasse, i sistemi più interessanti sono quelli a corto periodo.

Tra survey, missioni spaziali e riscoperte, i pianeti di cui si è osservato almeno un transito sono (a maggio 2016) più di mille (per la precisione 1309 in oltre settecento sistemi.

A questi vanno aggiunti i 1284 annunciati a maggio 2016 e se ne aggiungeranno probabilmente in futuro parecchi altri. Va a questo punto spiegato il problema: le osservazioni fotometriche identificano delle curve di luce che potrebbero corrispondere a dei transiti planetari; a questo punto la scoperta del pianeta va "convalidata", per evitare *falsi positivi.* Il metodo più robusto è quello di cercare di osservare il sistema anche con tecniche spettroscopiche, ma non sempre è possibile, e si tratta comunque di effettuare osservazioni complesse. Quali sono i falsi positivi più insidiosi? Sono dovuti alla presenza di sistemi stellari binari a eclisse molto deboli nel campo di osservazione. La diminuzione di luce dovuta all'eclisse può simulare un transito planetario. È possibile però, con tecniche statistiche, stimare la probabilità di falsi positivi di

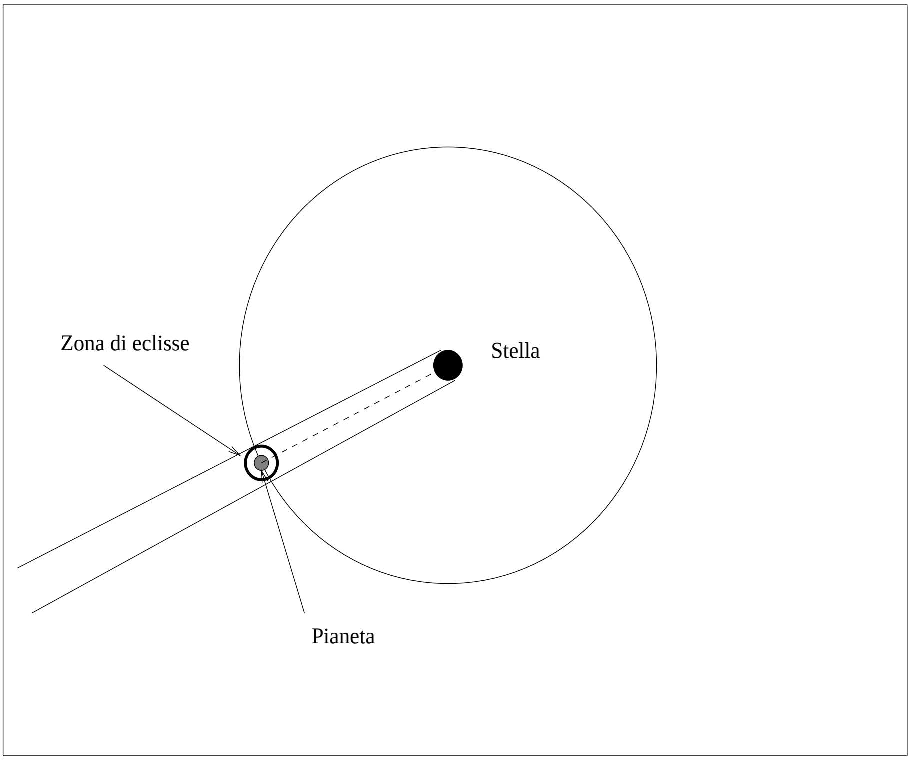

Figure 7.4: La zona in cui una eclisse può essere osservata è definita dal dischetto intorno al pianeta; la probabilità di osservare una eclisse è quindi data dal rapporto tra la superficie di tale dischetto e quella della sfera centrata sulla stella e passante per il pianeta (si trascura per semplicità il raggio del pianeta rispetto a quello stellare e non si considerano quindi le possibilità di eclissi parziali.)

questo tipo. I pianeti che hanno una probabilità molto bassa $< 1\%$ di essere "fasulli" ottengono una validazione, che può essere sbagliata nel caso singolo, ma è in genere attedibile.

7.2 Caratteristiche dei sistemi planetari extrasolari e problemi interpretativi

Discutiamo, seppure in modo sintetico, il quadro dei risultati delle osservazioni svolte con diverse tecniche.

Il primo risultato, anche se piuttosto mal definito, riguarda la frequenza con cui una stella ha uno o più pianeti. La questione in questi termini non è ben posta: quele è la definizione che diamo per pianeta o sistema planetario? La stessa adottata (v. Cap. 3) per il Sistema Solare? In quei termini non possiamo ancora azzardare una risposta: pianeti come la Terra sono, al momento, molto difficili da osservare, e quindi anche un sistema con tutti i pianeti di taglia terrestre sfuggirebbe, con ogni probabilità, alla nostra indagine. Possiamo adottare una definizione più "pragmatica" definendo come pianeti quelli che riusciremmo a scoprire con le tecniche di osservazione standard, e in particolare mediante la misura delle velocità radiali. In tal modo la frequenza diventa sostanzialmente il rapporto fra sistemi in cui si sono visti pianeti e sistemi studiati, opportunamente calibrato. Ne viene fuori una stima prudenziale tra il 5 e il 10 percento, che suona abbastanza ragionevole. Tuttavia, dai dati di Kepler, sembra che i pianeti possano essere molto più numerosi, addirittura più numerosi delle stelle su scala galattica. La percentuale sarebbe allora molto più alta. Restano comunque diverse incognite. Per esempio, quale è la probabilità di avere pianeti intorno a stelle doppie? Da un punto di vista dinamico la situazione è abbastanza chiara. Se le due stelle sono vicine e il pianeta è lontano, oppure se le due stelle sono lontane e il pianeta è ben all'interno del lobo di Roche di una delle due, è possibile avere delle configurazioni dinamicamente stabili. Il problema più complesso da risolvere è se i pianeti **si formino** in sistemi binari. La risposta a questa domanda non è ancora completamente chiara, anche se qualche campagna osservativa sembra suggerire, a livello preliminare, una significativa carenza di pianeti in sistemi binari.

Ci sono caratteristiche delle stelle che rendono più probabile la formazione dei pianeti? Se vale il modello "alla Safronov"per il quale la componente della nube protoplanetaria decisiva è quella costituita dai grani solidi (polvere cosmica, ghiacci ecc.), per la cui abbondanza conta la presenza di elementi più pesanti dell'elio, allora devono essere largamente privilegiati i sistemi con più alta "metallicità". Sembra essere così, in effetti, secondo l'istogramma riportato nella figura 7.5.

L'interpretazione dell'istogramma è però da alcuni messa in dubbio. La maggiore abbondanza di elementi pesanti potrebbe essere non una causa della formazione di pianeti, ma una conseguenza, legata alla caduta –che ha sicuramente luogo, specialmente nelle fasi di formazione– di corpi planetari sulla stella centrale, e al derivante **inquinamento chimico**. L'idea è, almeno al momento, minoritaria. Da notare che la figura qui presentata non tiene conto degli effetti di selezione (potrebbero essere studiate più spesso le stelle con alta metallicità, come candidate ad ospitare sistemi planetari, per esempio). Sono però presenti in letteratura numerosi studi che presentano, sulla base di una statistica accurata, conclusioni simili, anche se non può essere esclusa la presenza di pianeti anche intorno a stelle di bassa metallicità (possibilità che porterebbe a ipotizzare l'esistenza di diversi canali di formazione planetaria).

Pesanti effetti di selezione sono sicuramente presenti anche nella distribuzione di masse delle stelle con pianeti (Fig 7.6): si vede che la maggioranza delle stelle studiate hanno masse non lontane da quella del Sole. In realtà le stelle di gran lunga più numerose sono quelle di massa più piccola di quella solare, e non ci sono motivi per pensare che abbiano in media meno pianeti. Queste stelle sono state però studiate meno sistematicamente, sia perchè considerate *a priori* meno interessanti, sia perchè più deboli e spettroscopicamente molto complesse.

Dagli studi svolti finora la distribuzione di massa dei pianeti scoperti è piccata intorno alla massa di Giove. Circa il 60% dei pianeti scoperti ha massa inferiore a un paio di masse di Giove. Se la carenza di masse piccole è chiaramente di origine osservativa, lo scarso numero di pianeti nettamente più massicci ha sicuramente un significato fisico rilevante, anche se forse non univoco. Può essere un ulteriore indizio della separazione fra i processi di formazione planetaria e quelli di formazione stellare (che non coinvolgono in un ruolo dominante la componente "polverosa"), o anche testimoniare delle efficienza dei processi di migrazione, che rendono molto difficile la sopravvivenza di "brown dwarfs" vicine alla primaria.

Il risultato qualitativamente più interessante è comunque quello legato alla distribuzione dei semiassi maggiori. In Fig. 7.7 viene rappresentato, per tutti i pianeti scoperti, un plot semiasse

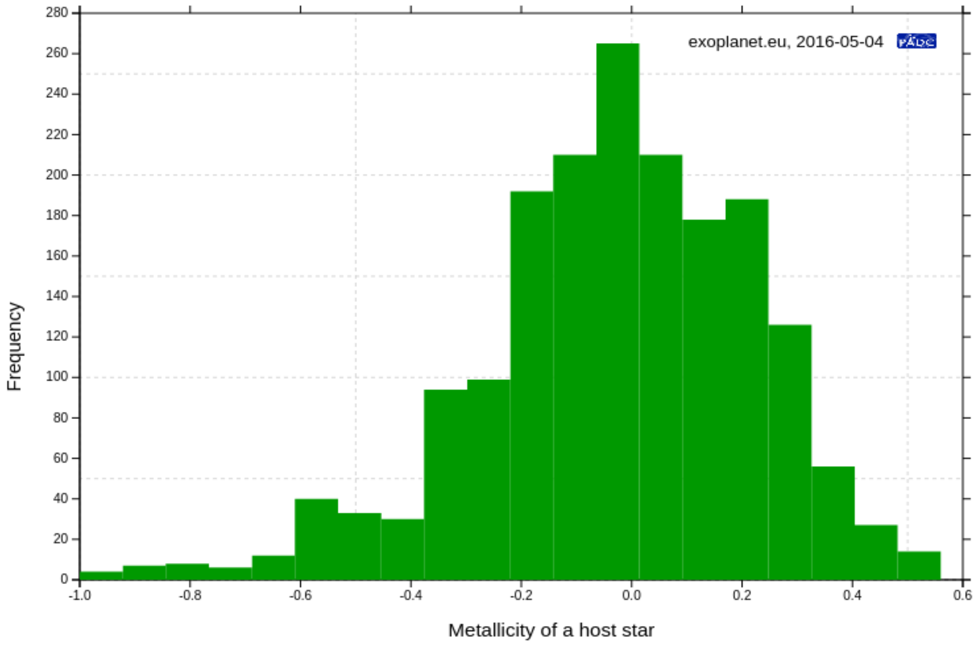

Figure 7.5: Distribuzione di stelle con pianeti osservati in funzione della metallicita' (in unità solari). Dal sito exoplanet.eu, aggiornata a dicembre 2014.

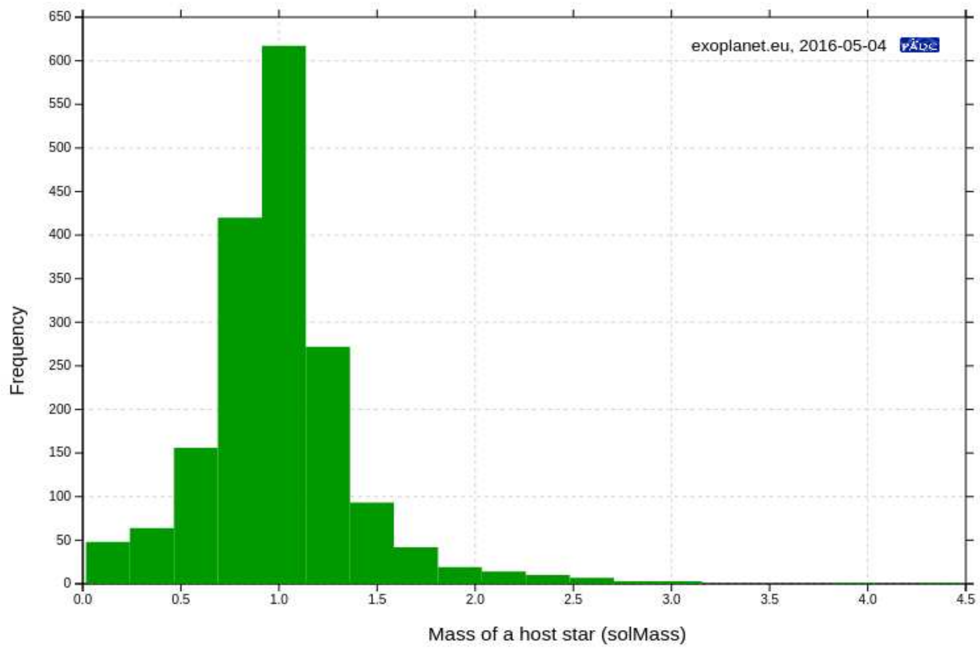

Figure 7.6: Distribuzione della massa delle stelle con pianeti osservati. Dal sito exoplanet.eu, agg. 2016.

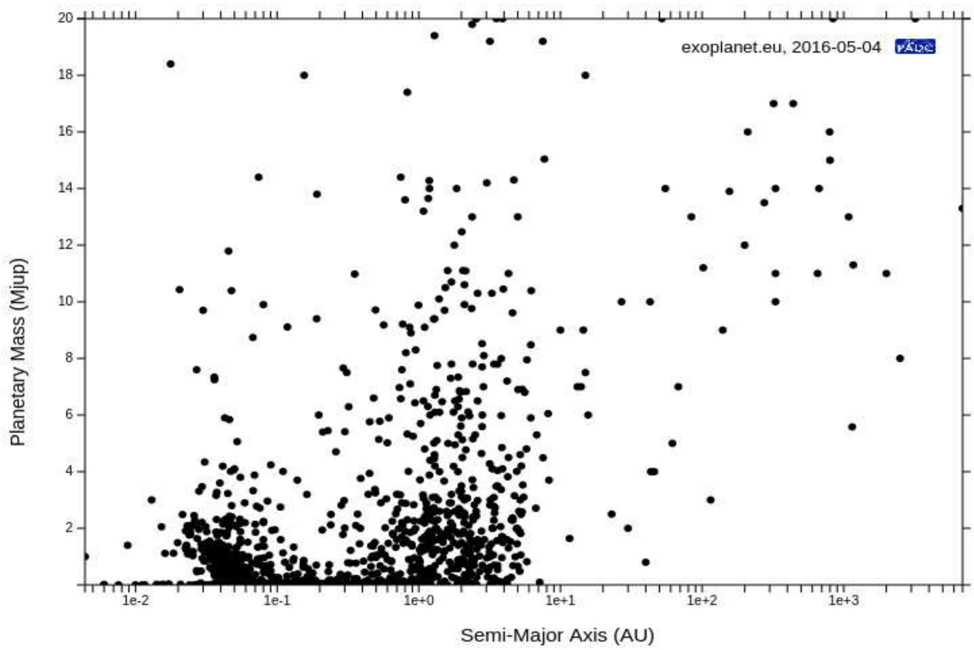

Figure 7.7: Plot semiasse maggiore/ massa per tutti i pianeti catalogati (dal sito exoplanet.eu, agg. 2016).

maggiore-massa. Si vede che gran parte dei pianeti scoperti sono più interni a Giove e, in molti casi, hanno semiassi maggiori inferiori a quello della Terra. Sono anche presenti numerosi sistemi per i quali il pianeta è estremamente vicino alla stella centrale ("hot Jupiters").

Naturalmente anche qui sono presenti effetti di selezione: i sistemi più larghi sono spesso stati identificati per imaging, mentre i transiti sono osservabili solo in sistemi molto stretti (Fig. 7.8). Nondimeno la abbondante presenza di sistemi con pianeti giganti stretti sembra essere ormai un risultato consolidato e non dipendere da effetti di selezione. Si noti anche (Fig 7.9) come la distribuzione dei semiassi maggiori non sia molto cambiata nel corso del tempo, come sarebbe accaduto se fosse dipeso criticamente dalla disponibilità di adeguate risorse tecnologiche. Soltanto poche osservazioni, condotte tramite *imaging*, hanno recentemente arricchito in modo significativo la distribuzione di sistemi molto larghi e di lungo periodo.

Le caratteristiche dei sistemi visti finora creano, come già accennato, delle difficoltà teoriche: il modello più "robusto" di formazione del Sistema Solare è basato sulla formazione dei pianeti partendo da nuclei solidi, costituiti dall'aggregazione di polveri e ghiacci presenti nella nebulosa protosolare (v. Cap.6). Per diversi motivi questo modello prevede la formazione di pianeti giganti ad una certa distanza minima dalla stella; per il Sistema Solare tale limite è oltre l'orbita di Marte. La presenza di pianeti grossi e vicini è incompatibile con il modello a meno di non riconoscere un ruolo dominante ai processi di migrazione planetaria (v. Cap.6).

I meccanismi di migrazione possono essere legati all'interazione del disco protoplanetario

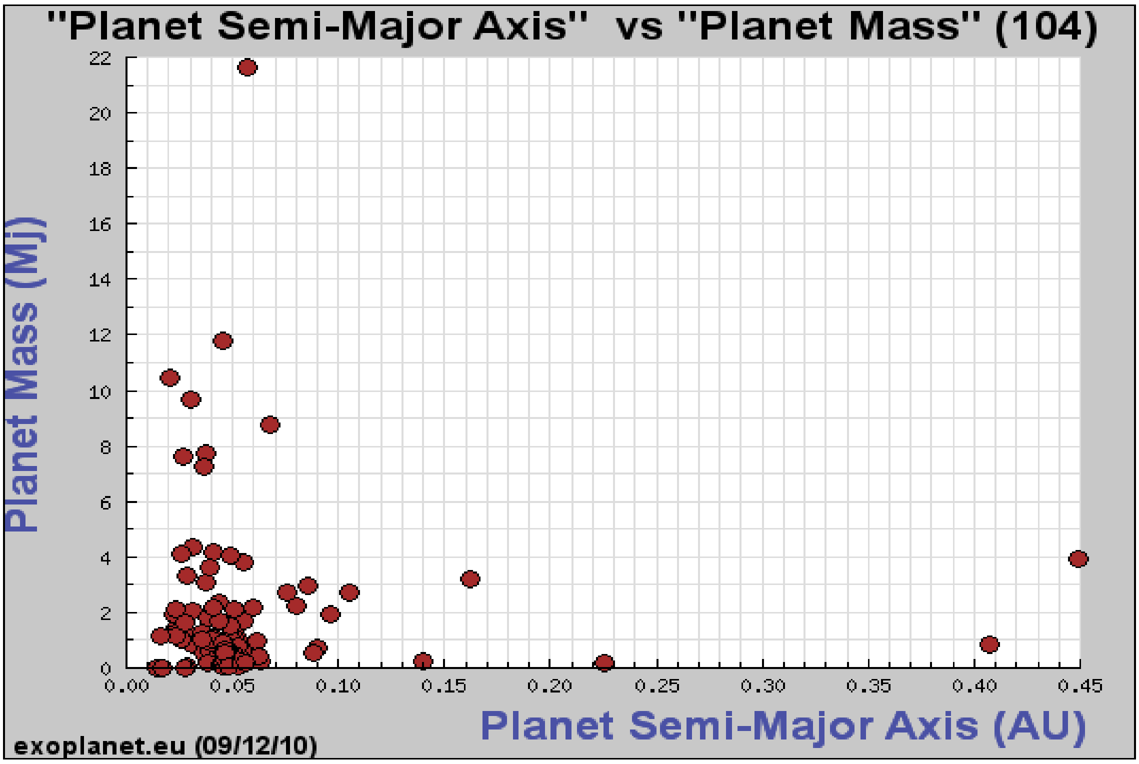

Figure 7.8: Plot semiasse maggiore/ massa per tutti i pianeti catalogati osservati tramite transito(dal sito exoplanet.eu, agg. dicembre 2010).

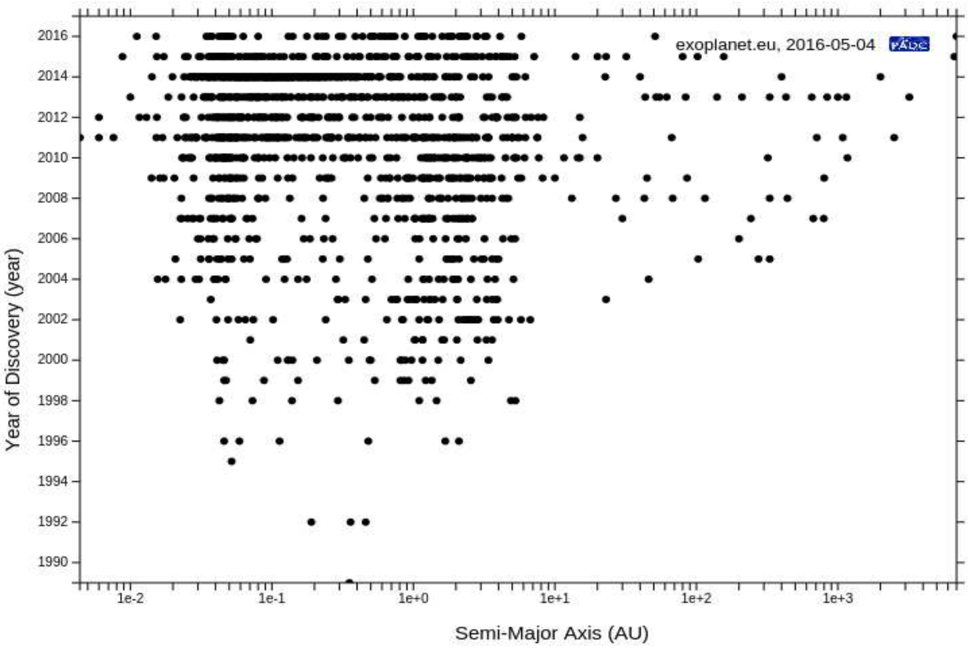

Figure 7.9: Plot semiasse maggiore/ anno di scoperta per tutti i pianeti catalogati (dal sito exoplanet.eu, agg. 2016).

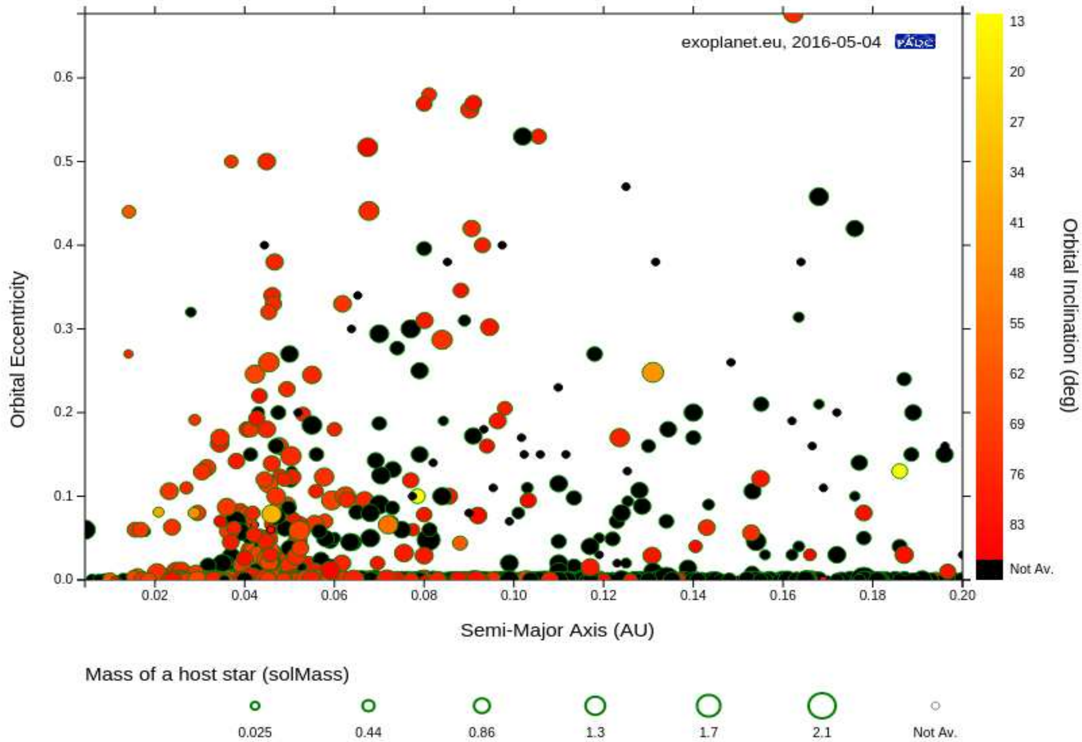

Figure 7.10: Vengono rappresentate le orbite dei pianeti extrasolari in un piano semiasse-eccentricità, limitatamente a quelli più vicini di $0.2 A.U.$. Come si vede i valori di quest'ultima sono abbastanza dispersi, ma i sistemi più stretti hanno spesso orbite meno eccentriche; ciò può essere spiegato come conseguenza di processi di tipo mareale (dal sito exoplanet.eu, agg. 2016).

con i pianeti in formazione oppure a processi dinamici a più corpi (*Jumping Jupiters*). Questo processo potrebbe tra l'altro rendere anche molto eccentriche le orbite. Ciò non dovrebbe coinvolgere i pianeti più vicini alla stella sia perchè il processo dinamico citato non sembra permettere una migrazione a distanza troppo piccola, sia perchè, nelle immediate vicinanze della stella, l'interazione mareale stella–pianeta dovrebbe implicare una forte circolarizzazione delle orbite. Il plot $a - e$ rappresentato nelle figure 7.10/11 sembra qualitativamente in accordo con le idee qui esposte, anche certamente un ulteriore approfondimento è necessario, anche per verificare se l'accordo sussista anche a livello più quantitativo. Il lavoro interpretativo richiede quindi più dati e ulteriori analisi.

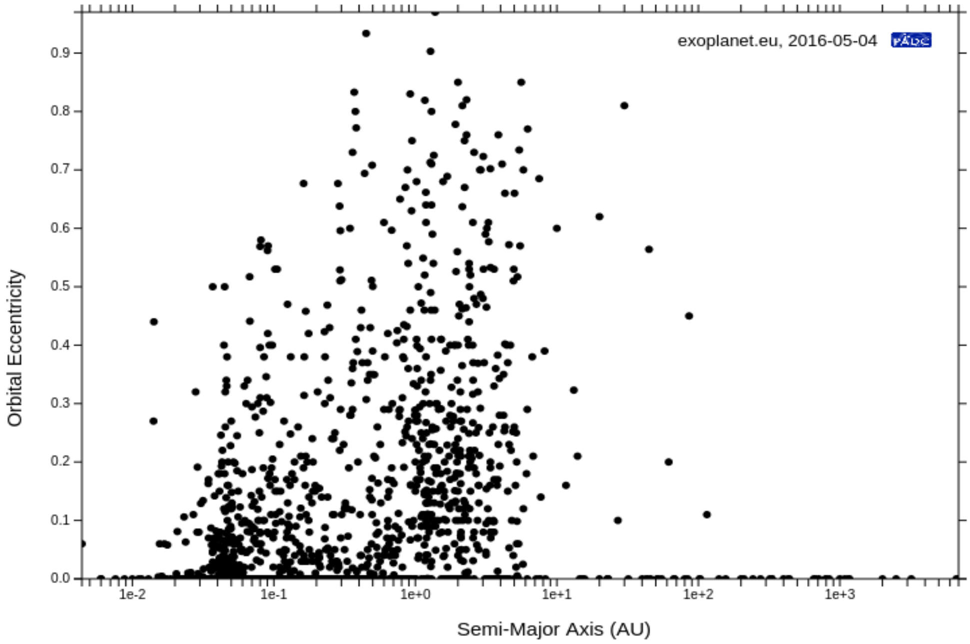

Figure 7.11: Vengono rappresentate le orbite dei pianeti extrasolari in un piano semiasse-eccentricità. Come si vede i valori di quest'ultima sono abbastanza dispersi e scorrelati dal semiasse maggiore; orbite molto eccentriche, presenti da semiassi maggiori medio–bassi a semi-assi non troppo alti sono un elemento –indiziario– a favore del modello dei Jumping Jupiters (dal sito exoplanet.eu, agg. 2016).