Chapter 6

Il Sistema Solare.

6.1 Riconoscimento di un pianeta.

Due sono le differenze evidenti fra stelle e pianeti: questi ultimi, essendo enormemente più vicini, non sono talvolta assimilabili ad oggetti puntiformi, e possono essere parzialmente risolti. L'estensione apparente dell'immagine di un pianeta non è quindi solo dovuta alla diffrazione e, soprattutto, al *seeing.* A titolo di esempio, consideriamo il caso di Giove all'opposizione (v. la definizione nel seguito). Il diametro di Giove è dell'ordine di $10^5 km$; essendo la distanza dalla Terra di circa $6 \cdot 10^8 km$, Giove sottende un angolo $\alpha \simeq 1.5 \cdot 10^{-4} rad$ ossia circa 30" d'arco. Al telescopio Giove appare quindi come un oggetto esteso. Ad occhio nudo Giove appare sostanzialmente ancora come un punto, ma, essendo l'immagine ben piú grande del normale *seeing* l'effetto visibile di scintillazione è più ridotto: i pianeti maggiori (Venere, Marte, Giove, Saturno) sono riconoscibili ad occhio nudo dall'immagine **più ferma**. Il discorso non vale ovviamente per i corpi minori (satelliti, pianetini, comete lontane dal Sole), la cui estensione angolare torna sotto il secondo d'arco.

In secondo luogo il *moto proprio* e la *parallasse* dei corpi planetari sono enormemente piú grandi degli equivalenti stellari. Peraltro per i corpi del Sistema Solare questi concetti, pur tecnicamente corretti, non sono di solito neppure usati: il moto di un pianeta è la risultante dei moti della Terra e del pianeta stesso intorno al Sole, ed è l'effetto combinato ad essere studiato.

Per esempio, visto dal Sole, rispetto alle stelle Giove descrive (in un'orbita poco ellittica) un angolo giro in poco meno di 12 anni, ossia oltre 30^o all'anno, un grado ogni circa 10 giorni, o 15" all'ora. Enorme è quindi il suo *moto proprio*, che risulta ovviamente, essendo misurato dalla Terra, meno uniforme a causa del variare della distanza di osservazione (la distanza fra la Terra e Giove varia di circa il 50%, dalla distanza minima che si ha alla **opposizione**, che si ha quando Giove si trova dalla parte opposta del Sole, a quella relativa alla **congiunzione**). Il moto proprio di Giove è ovviamente rilevabile anche su scale di tempo molto inferiori all'anno. Per quanto riguarda la parallasse, essendo Giove a circa $5 u.a.$ dal Sole, si ha $\pi \simeq 12^o$. La parallasse risulta numericamente minore del moto proprio in virtù della definizione (che introduce un fattore 2π), pur essendo la velocità orbitale della Terra più che doppia di quello di Giove: ricordiamo che la velocità equivalente associata alla parallasse (si veda il Cap.4) è di circa $5 km/s$, molto inferiore ai $30 km/s$ con cui la Terra percorre la sua orbita. I due moti producono un effetto osservabile combinato.

Andando verso l'esterno del Sistema Solare il moto proprio decresce sia per la distanza sia per la minore velocità orbitale, mentre la parallasse diminuisce solo per la aumentata distanza. Di conseguenza l'effetto osservabile della parallasse diviene progressivamente dominante.

Nel caso di pianeti come Giove, l'effetto combinato dei due moti rende quello effettivamente osservato sulla sfera celeste abbastanza complesso (si veda la Fig.6.1). Il moto apparente è caratterizzato da sensibili disuniformità e perfino da una fase retrograda.

La natura planetaria di un corpo come Giove discende naturalmente dall'osservazione di simili moti, e potrebbe essere riconosciuta perfino da misure di *parallasse diurna* (qualche secondo d'arco). In pratica la scoperta di un **nuovo** corpo planetario (i pianeti maggiori sono stati identificati ormai da molto tempo) può avvenire semplicemente osservando una zona di cielo, o confrontando due immagini prese successivamente, con la stessa tecnica del **blinking** usata per le misure di parallasse - ma ora le due immagini possono –anzi debbono– essere prese a distanza di poche ore. Ancora più semplicemente, una immagine di una porzione di sfera celeste ottenuta con una esposizione sufficientemente lunga rivela la presenza di un corpo planetario che non viene rappresentato da una immagine puntiforme, ma da una striscia corrispondente alle sue diverse posizioni durante la ripresa (Fig.6.2).

Mentre i pianeti maggiori erano noti fin dall'antichità, gli ultimi due secoli hanno permesso di scoprire un grande numero di corpi più piccoli, dalla scoperta (1/1/1801) del primo e più grande asteroide (*1 Ceres*) (oggi ne sono note e catalogate decine di migliaia, ed il numero cresce con rapidità quasi esponenziale), a quella di Plutone, vecchia di non molti decenni, e di innumerevoli comete e satelliti. Più recentemente anche i corpi della cosiddetta **Fascia di Kuiper–Edgeworth** si sono aggiunti all'inventario del Sistema Solare. Sia sistematiche osservazioni da Terra sia le imprese spaziali hanno permesso di acquisire dati qualitativamente e quantitativamente incomparabili con quelli posseduti fino a qualche decennio or sono.

6.2 Luminosità di un pianeta; emissione nel visibile e nell'infrarosso.

A differenza delle stelle i pianeti non hanno sorgenti di energia propria (almeno in prima approssimazione), ma sono in gran parte riscaldati dal Sole. Dell'energia radiante che ricevono dal Sole parte viene riflessa, parte assorbita e –in condizioni di regime, quali le presenti– riemessa nell'infrarosso.

Se $L_{\lambda,\odot}$ è la luminosità monocromatica del Sole, un pianeta di raggio R_p a distanza $r_{p\odot}$ dal Sole riceve in quella lunghezza d'onda una energia:

$$\Lambda_{\lambda,p} = \frac{\pi L_{\lambda,\odot} R_p^2}{4\pi r_{p\odot}^2} = 0.25 L_{\lambda,\odot} R_p^2 / r_{p\odot}^2 \qquad (6.1)$$

Ne riflette una percentuale A_λ; la sua luminosità monocromatica (relativamente, come è ovvio, all'emisfero illuminato) sarà quindi

$$L_{\lambda,p} = A_\lambda \Lambda_{\lambda,p} \qquad (6.2)$$

Integrando su tutte le lunghezze d'onda del visibile, si ottiene:

$$L_p = \int_{vis} A_\lambda \Lambda_{\lambda,p} \, d\lambda \stackrel{def\ A}{=} A \int_{vis} \Lambda_{\lambda,p} \, d\lambda \qquad (6.3)$$

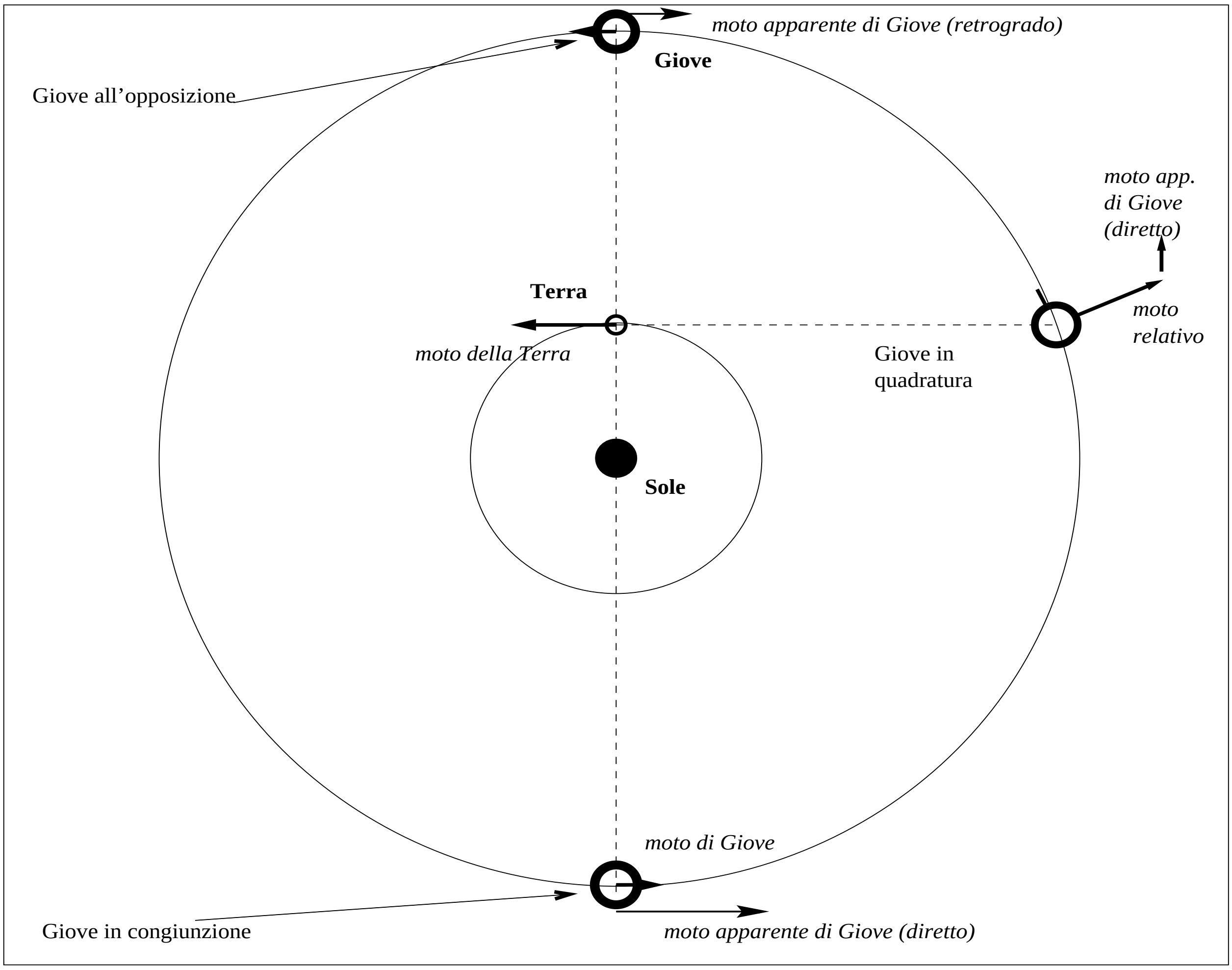

Figure 6.1: Posizioni e moto relativo del sistema Sole-Terra-Giove

dove A prende il nome di **albedo**.

Usando le definizioni del Cap.3 si ottiene quindi, per esempio all'opposizione (concetto ovviamente usabile solo per i pianeti esterni alla Terra), quando vediamo l'intero emisfero illuminato:

$$I_V = \int \frac{S_V(\lambda) D_\lambda(\theta) L_{\lambda,p}}{4\pi r_{pT}^2}\, d\lambda = \int \frac{S_V(\lambda) D_\lambda(\theta) A_\lambda L_{\lambda,\odot} R_p^2}{16\pi r_{pT}^2 r_{p\odot}^2}\, d\lambda \tag{6.4}$$

dove r_{pT} è la distanza Terra–pianeta.

Fissate le unità di misura, è possibile trasformare la (6.4), con semplici passaggi:

$$\begin{aligned} m_V &= -2.5 \log I_V + cost. \\ &= -2.5 \log \left(\int S_V(\lambda) D_\lambda(\theta) A_\lambda L_{\lambda,\odot}\, d\lambda \right) - 5 \log R_p + 5 \log r_{pT} + 5 \log r_{p\odot} + C. \end{aligned} \tag{6.5}$$

Si può anche scrivere:

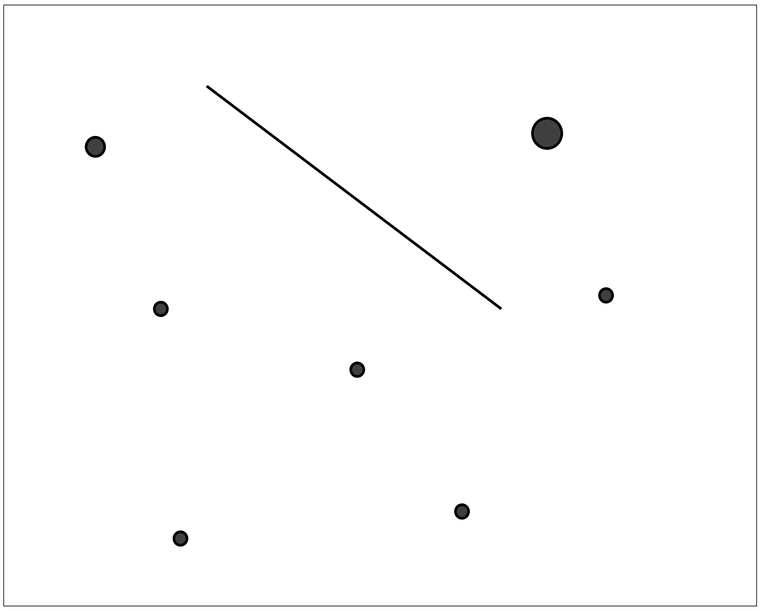

Figure 6.2: Un corpo planetario descrive su una immagine una striscia di lunghezza proporzionale alla sua velocità di spostamento sulla sfera celeste

$$\begin{aligned} m_V &= -2.5 \log I_V + cost. \\ &= -2.5 \log \left(\int S_V(\lambda) D_\lambda(\theta) L_{\lambda,\odot}\, d\lambda \right) - 5 \log \sqrt{A'} R_p + 5 \log r_{pT} + 5 \log r_{p\odot} + C. \end{aligned} \tag{6.6}$$

(con A' si indica il valor medio dell'albedo). Come si vede la magnitudine m_V è determinata essenzialmente da quattro diversi contributi: uno combina insieme luminosità solare e fattori filtro, il secondo è il raggio del pianeta scalato con un coefficiente che è sostanzialmente la radice quadrata dell'albedo (in altri termini abbiamo il **raggio efficace** del pianeta, il terzo e il quarto sono rispettivamente la distanza Terra–pianeta e la distanza pianeta–Sole. Se consideriamo la situazione all'opposizione di fase (il momento migliore per studiare un pianeta esterno alla Terra), quando $r_{pT} = r_{p\odot} - r_{T\odot}$, il terzo e quarto termine della (6.5) diventano:

$$5 \log r_{p\odot}(r_{p\odot} - r_{T\odot}) \tag{6.7}$$

Per un pianeta molto lontano dal Sole, per cui valga la relazione $r_{T\odot} \ll r_{p\odot}$, si ha approssimativamente:

$$m_V = m_{V_0} + 10 \log r_{pT} \tag{6.8}$$

in cui m_{V_0} non dipende dalla distanza e gioca quindi il ruolo della magnitudine assoluta. Si vede quindi che la luminosità di un pianeta decresce all'incirca con la quarta potenza della distanza. Questo spiega, tra l'altro, la lentezza con cui si sono susseguite le scoperte di corpi nel Sistema Solare esterno (Plutone stesso è stato scoperto nel XX secolo).

Abbiamo fin qui parlato della luce solare che viene riflessa, ed il cui spettro, se A_λ non dipende dalla lunghezza d'onda, coinciderà ovviamente con quello solare. In realtà questa ipotesi è abbastanza drastica, e le proprietà di riflessione rendono piuttosto diversi gli spettri dei corpi planetari (non a caso, per esempio, Marte è stato tradizionalmente chiamato "il pianeta rosso"). Parte della luce viene invece assorbita e riemessa. Possiamo ipotizzare una situazione *a regime*, in cui il pianeta non si scaldi o raffreddi in media nel tempo, per concludere che in media l'energia assorbita sarà uguale a quella successivamente riemessa. L'energia sarà però riemessa ad una diversa lunghezza d'onda, secondo uno spettro legato alla temperatura del pianeta. Tale temperatura resterà sempre molto inferiore a quella solare, e lo spettro in questione sarà centrato nel lontano infrarosso.

Un'analisi più dettagliata del problema del riscaldamento dei pianeti da parte del Sole, e la stima delle loro temperature superficiali, richiedono una discussione approfondita.

Per una comprensione di massima, possiamo immaginare due casi estremi. Nel primo l'energia ricevuta si distribuisce uniformemente su tutta la superficie del pianeta, che si assesta quindi ad una ben precisa temperatura. Possiamo in questo caso definire la *temperatura efficace* del pianeta, nella usuale ipotesi di corpo nero. Sarà:

$$4\pi R_p^2 \sigma T_{eff,p}^4 = (1-A)\frac{L_\odot R_p^2}{4 r_{p\odot}^2} = (1-A)\frac{\pi R_\odot^2 \sigma T_{eff,\odot}^4}{r_{p\odot}^2} R_p^2 \tag{6.9}$$

da cui:

$$T_{eff,p}^4 = 0.25(1-A) R_\odot^2 T_{eff,\odot}^4 / r_{p\odot}^2 \tag{6.10}$$

ossia

$$T_{eff,p} = \left(\frac{1-A}{4}\right)^{1/4} \left(\frac{R_\odot}{r_{p\odot}}\right)^{1/2} T_{eff,\odot} \tag{6.11}$$

Ovviamente la realtà è più complessa di questo modello schematico. Effetti diversi e complessi determinano la temperatura superficiale e lo spettro di emissione nell'infrarosso di un pianeta. La temperatura $T_{eff,p}$ così calcolata costituisce comunque una prima importante e significativa indicazione, ma, per come è stata calcolata, tende certamente a sottovalutare la reale temperatura superficiale, almeno delle zone illuminate dal Sole. Una prima correzione è legata all'ipotesi fatta di emissione di corpo nero. Essa è ovviamente in contraddizione con l'assunto precedente, per il quale parte dell'energia viene immediatamente riflessa (un **corpo nero** è tra l'altro un perfetto assorbitore. Una stima più realistica della temperatura può essere ottenuta con il modello di *corpo grigio* ammettendo una distribuzione uguale a quella di un corpo nero ma con una diversa normalizzazione, corretta per tener conto degli effetti di riflessione. In sostanza la temperatura ($T'_{eff,p}$) sarebbe la stessa calcolata in precedenza ma senza il coefficiente $(1-A)^{1/4}$.

Una stima ancora più accurata non può che tener conto delle differenze di temperatura fra regioni diverse del pianeta, illuminate o meno dal Sole. Diventa necessario definire un vero e proprio **modello termico** del pianeta. Intanto le zone polari sono sistematicamente meno illuminate e quindi restano più fredde (ciò almeno è vero per pianeti il cui asse di rotazione è quasi perpendicolare al piano dell'orbita; non vale, ad esempio, per Urano). Il problema più complesso è quello della escursione termica *diurna* nelle zone in cui si alternano le fasi di luce

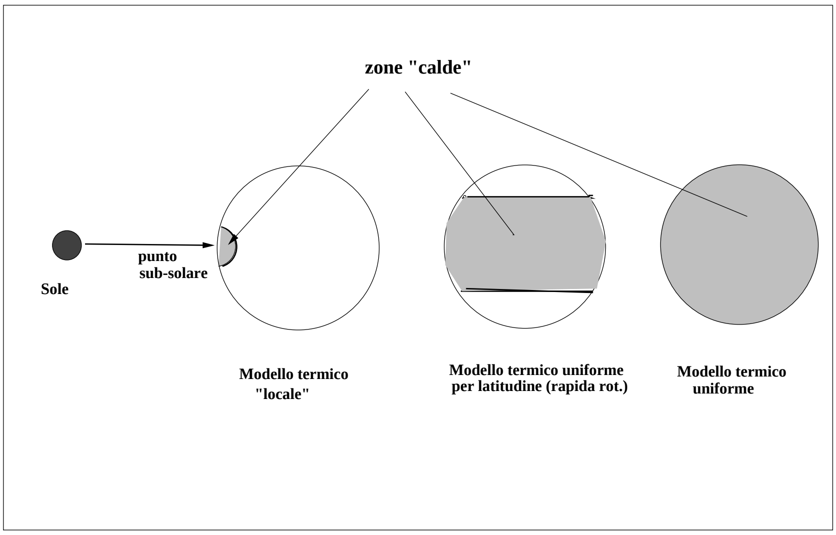

Figure 6.3: Schema dei modelli termici; a sinistra modello "a spot" in cui il riscaldamento solare resta confinato alla zona direttamente illuminata; al centro il caso (realistico per corpi rapidamente rotanti) in cui il calore solare si distribuisce uniformemente nelle zone di uguale latitudine; a destra il caso estremo di riscaldamento uniforme

e di ombra. Per corpi velocemente rotanti o in presenza di una atmosfera l'escursione termica può essere relativamente modesta (sulla Terra è di regola ben sotto al 10%). In caso contrario la zona illuminata può avere una temperatura molto più alta. Al limite si può pensare ad una temperatura legata ad un equilibrio termico **locale**. Ripercorrendo i calcoli discussi in precedenza, è possibile stimare allora una nuova temperatura, funzione della posizione. Nel *punto sub–solare*, vale a dire nel punto che vede il Sole allo zenit, si può allora ottenere una nuova stima della temperatura (T_{ss}) che può essere calcolata come $T'_{eff,p}$ ma togliendo il coefficiente iniziale $4^{-1/4}$:

$$T_{ss} = \left(\frac{R_\odot}{r_{p\odot}} \right)^{1/2} T_{eff,\odot} \tag{6.12}$$

Quest'ultima stima di temperatura costituisce un limite superiore per la temperatura all'esterno di un pianeta. Potrebbe al limite non essere ancora del tutto indicativa della temperatura superficiale, se siamo in presenza di una atmosfera sufficientemente spessa e di alta capacità termica. In tal caso la temperatura superficiale è determinata da un complesso equilibrio Sole–atmosfera planetaria–pianeta ed entrano in gioco effetti complessi ("Greenhouse") Naturalmente la temperatura superficiale effettiva può essere ancora diversa in presenza di una atmosfera sufficientemente consistente. Per molti pianeti in realtà dall'esterno si vede un mix dell'atmosfera in senso stretto e della superficie solida: si pensi anche alle immagini della Terra dallo spazio: in parte nubi, in parte continenti e mari. In generale, comunque, la temperatura superficiale non è calcolabile con un modello elementare, e può essere anche più alta di quanto non ci si aspetti.

6.3 I pianeti maggiori.

La definizione di pianeta contiene un margine intrinseco di ambiguità. Dal punto di vista dinamico infatti potremmo considerare pianeta qualunque corpo in orbita intorno al Sole. La distinzione fra pianeti e corpi minori è dinamicamente priva di senso, ed è basata tradizionalmente sulla differenza di dimensioni. Dopo una lunga storia di scoperte di nuovi pianeti fino a Plutone, la situazione si è complicata quando sono stati scoperti molti corpi in orbita nella zona transnettuniana, alcuni dei quali con orbite molto simili a quella di Plutone, e altri molto grandi. La situazione è precipitata con la scoperta che almeno uno di questi oggetti è probabilmente più grande di Plutone. Dopo lunghe discussioni, l'Unione Astronomica Internazionale (IAU) ha deliberato (non senza opposizioni) nell'estate del 2006 una nuova definizione di pianeta.

Un pianeta è un corpo celeste che:

- è in orbita attorno al Sole (o alla sua stella di riferimento, per un pianeta extrasolare);
- è abbastanza massiccio da essere dominato dalle forze gravitazionali ed ha quindi una forma vicina a quelle di equilibrio definite dall'idrostatica, sferiche o ellissoidali, a seconda dello stato rotazionale (v. Cap.1);
- Ha completamente –o quasi– "ripulito" la regione del Sistema intorno alla sua orbita (nella quale quindi non ci devono essere oggetti di dimensioni confrontabili, nè sistemi di oggetti la cui massa complessiva sia paragonabile a quella del pianeta).

Con questa definizione i pianeti maggiori si riducono al numero di otto.

Non è qui il caso di entrare nei dettagli relativamente alle caratteristiche dei singoli pianeti e dei loro satelliti, la conoscenza dei quali è stata enormemente arricchita dalle esplorazioni condotte, negli ultimi anni, dalle sonde planetarie. I pianeti sono ovviamente i corpi più interessanti del Sistema Solare. Nondimeno il loro modesto numero non permette di compiere un vero e proprio studio comparativo e di classificarli, a parte la banale e nota divisione in *pianeti terrestri* (da Mercurio a Marte) ed *esterni* (da Giove in poi). Alcune proprietà generali saranno discusse nel contesto delle teorie di formazione del Sistema Solare. Ci limitiamo a riprodurre nelle tabelle alcuni dati relativi alle loro caratteristiche generali.

Per immagini dei pianeti maggiori, ottenute dallo spazio, si consulti per esempio l'indirizzo http://photojournal.jpl.nasa.gov/ da cui è tratta, a titolo di esempio, la Figura 6.4, rappresentante un fotomosaico di Mercurio.

Per i commenti sui dati elencati nelle tabelle, si veda [11,cap.14]; si notino in particolare i dati sulle proprietà rotazionali (periodo e inclinazione), la distribuzione dei semiassi maggiori ("legge di Titius–Bode"), la differenza chimico–fisica fra i quattro pianeti interni e quelli esterni (anche nella densità media), e la correlazione, valida per i pianeti interni, fra massa e densità (con l'eccezione di Mercurio).

6.3.1 Pianeti e pianeti nani

Nella assemblea dell'IAU che ha approvato la nuova definizione di pianeta è stata anche decisa la introduzione di una nuova classe di oggetti, i "pianeti nani", che sono essenzialmente quelli che non rispettano il terzo requisito per essere definiti pianeti. Al momento la lista comprende Cerere, Plutone e il corpo indicato con la sigla 2003UB313 (quello che ha provocato la messa

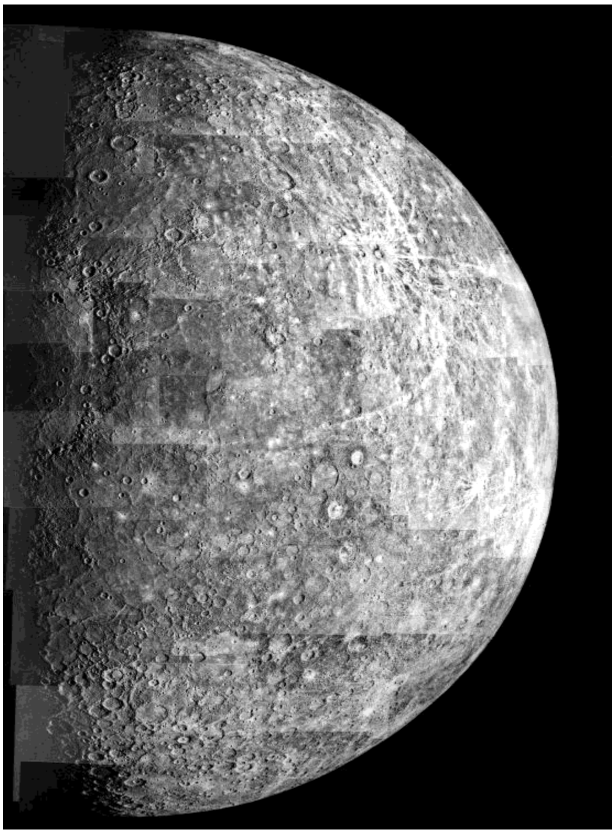

Figure 6.4: Fotomosaico parziale di Mercurio (dall'archivio immagini della NASA)

Pianeta	$r_{p\odot}(\cdot 10^8 km)$	$R_p(\cdot 10^3 km)$	e	$i(gradi)$	A	$T'_{eff,p}$	$P_{rot}(d)$	ϵ	m_V	H
Mercurio	0.58	2.44	0.21	7	0.11	447	58	0.1	—	-0.42
Venere	1.08	6.05	0.007	3.4	0.65	328	243	177	—	-4.40
Terra	1.50	6.38	0.017	0.	0.37	278	0.99	23	—	-3.86
Marte	2.28	3.40	0.093	1.85	0.15	226	1.02	25	-2.01	-1.52
Giove	7.78	71.5	0.048	1.30	0.52	122	0.41	3	-2.70	-9.4
Saturno	14.3	60.0	0.056	2.49	0.47	90	0.44	26.7	+0.67	-8.88
Urano	28.7	25.6	0.046	0.77	0.51	64	0.71	98	+5.52	-7.19
Nettuno	45	24.8	0.009	1.77	0.41	51	0.67	29	+7.84	-6.87

Table 6.1: I pianeti maggiori. Oltre ai dati relativi agli elementi orbitali, alle dimensioni e all'albedo, è riportata la una delle stime di temperatura superficiale discusse nel testo (quella "di corpo grigio"). Si hanno inoltre, ovviamente per i soli pianeti esterni, la magnitudine all'opposizione e H, che per i corpi planetari svolge il ruolo di magnitudine assoluta, essendo calcolata eliminando la dipendenza dalla distanza (è tipicamente la magnitudine all'opposizione –per i pianeti esterni alla Terra– a distanza di 1 U.A.). Vengono infine riportati periodo di rotazione ed inclinazione dell'asse di rotazione rispetto all'orbita.

Pianeta	massa (g)	densità g/cm^3	costituenti dell'atmosfera
Mercurio	$3\ 10^{26}$	5.4	O_2, Na
Venere	$5\ 10^{27}$	5.2	CO_2
Terra	$6\ 10^{27}$	5.5	N_2, O_2
Marte	$6\ 10^{26}$	3.9	CO_2
Giove	$2\ 10^{30}$	1.3	H_2, He
Saturno	$6\ 10^{29}$	0.7	H_2, He
Urano	$9\ 10^{28}$	1.3	H_2, He, CH_4
Nettuno	$1\ 10^{29}$	1.6	H_2, He, CH_4

Table 6.2: I pianeti maggiori. Si riportano stime della massa, della densità media e l'elenco dei principali costituenti dell'atmosfera (dati ripresi da [11,cap.14]).

in discussione del ruolo planetario di Plutone, essendo leggermente più grande di quest'ultimo) e che ha recentemente ottenuto la denominazione definitiva di Eris (Erinni), con il numero d'ordine 136199. Eris è nella mitologia la dea della discordia.

Diversi altri oggetti sono candidati ad aggiungersi a questa lista, che è destinata ad allungarsi sensibilmente in tempi brevi.

Nome	$r_{p\odot}(\cdot 10^8 km)$	$R_p(\cdot 10^3 km)$	e	$i(gradi)$	A	massa (g)	$P_{rot}(d)$	ϵ	m_V	H
Cerere	4.13	0.45	0.1	10	0.1	9 10^{23}	0.37	10		3.34
Plutone	59	1.2	0.25	17	0.55	44	6.38	122	+15.12	-0.81
Eris	101.5	1.3	0.44	44	0.6					$\simeq -1$

Table 6.3: I dati principali (in qualche caso preliminari o incerti) dei pianeti nani.

6.4 Corpi minori del Sistema Solare.

Prendono il nome di *corpi minori* tutti quegli oggetti che non rientrano tra i pianeti veri e propri, indipendentemente dalle loro dimensioni (alcuni corpi minori sono più grandi di alcuni dei pianeti). La classificazione *per esclusione* mette insieme oggetti molto diversi fra di loro, quali i **satelliti**, che differiscono dai pianeti dal punto di vista dinamico, essendo vincolati ad orbitare intorno ad un pianeta (per estensione, possono essere inclusi nella categoria anche gli anelli planetari, presenti intorno a tutti i maggiori pianeti esterni, da Giove a Nettuno) e diversi gruppi di oggetti che sono da un punto di vista dinamico pianeti a tutti gli effetti, ma che non rientrano in questa categoria per ragioni di dimensioni e, in qualche misura, per convenzione. Tra questi gruppi segnaliamo gli **asteroidi**, le **comete**, gli oggetti detti **TNO** ("transnettuniani") o anche della **fascia di Kuiper-Edgeworth**. Dinamicamente rientrerebbero tra i corpi minori anche le **meteoriti** e gran parte delle **polveri interplanetarie**. Questi ultimi oggetti non sono però di diretto interesse astrofisico, in quanto non vengono di solito osservati da distanza, come succede per tutti gli astri, ma rivelati mediante misure *in situ* (nell'ambito di missioni spaziali) o raccolti e studiati quando cadono sulla Terra (come succede per le meteoriti).

Da un punto di vista scientifico l'importanza dei corpi minori è molto grande. Da un lato essi forniscono informazioni essenziali sui processi di formazione (anche se sarebbe semplicistico vederli come quello che resta dei "mattoni" originari); dall'altro il loro grande numero permette un approccio di tipo sistematico e statistico, che non è possibile per i pianeti, dominati dalle specifiche peculiarità. Sempre per lo stesso motivo (il grande numero) lo studio dei corpi minori permette di affrontare con abbondanza di dati e in tutta generalità le principali problematiche che riguardano **l'evoluzione** del Sistema Solare, vale a dire i processi collisionali e dinamici.

In questa sede ci limiteremo solo ad alcuni limitati cenni, rimandando per ulteriori informazioni a testi [11] specialistici o al corso di Sistemi Planetari.

6.4.1 Gli asteroidi; classificazione spettroscopica e dinamica

Gli asteroidi hanno orbite per lo più comprese fra quella di Marte e quella di Giove. Date le loro dimensioni (il più grande, 1 Ceres, ha un diametro di circa 1000 km) essi vengono visti da terra come sorgenti puntiformi, anche se studi di fenomeni di occultazione di stelle o particolari tecniche *(speckle interferometry)* consentono talora stime delle loro dimensioni e forme e caratteristiche superficiali di massima. Lo spettro di riflessione risulta abbastanza diverso tra i vari oggetti e le sue caratteristiche sono, almeno in linea di principio, utilizzabili per ottenere informazioni sulle caratteristiche fisiche e chimiche della superficie (anche se di fatto l'interpretazione dei dati risulta non sempre agevole). Poichè gli asteroidi sono anche la principale sorgente delle meteoriti, si cerca anche di stabilire una correlazione tra la classificazione degli uni e delle altre. Sulla base dell'analisi delle caratteristiche spettrali, e prevalentemente utilizzando degli indici di colore ottenibili da una fotometria multibanda (a sette o otto colori) è possibile distinguere vari gruppi; diverse classificazioni sono state fatte, e sono stati identificate 14 classi diverse. Tra queste i gruppi più importanti sono il **C** (originariamente da *condriti carbonacee*: meteoriti con alcune caratteristiche spettrali analoghe; sono asteroidi scuri (= bassa albedo)), il gruppo **S** (in realtà molto articolato, e la cui controparte meteoritica è tuttora in discussione). Più chiara e consolidata invece è la classificazione dinamica. Buona parte degli asteroidi, come detto, ha orbite comprese tra quella di Marte e quella di Giove. Per ragioni dinamiche, dovute alla grande massa di Giove e quindi alla sua capacità di perturbare il moto dei corpi minori, la **Fascia Principale** si spopola abbastanza prima di arrivare a Giove, e presenta anche lacune (dette **Lacune di Kirkwood**) per valori del semiasse maggiore *risonanti* con quello di Giove (si ha una risonanza importante quando i periodi sono in un rapporto razionale esprimibile con una frazione in cui sia numeratore che denominatore sono non troppo maggiori di uno; es. 1:3). Sono inoltre presenti alcuni gruppi speciali. Tra di essi si distinguono i **Troiani** collocati allo stesso semiasse di Giove, spostati nell'orbita di $+/-60°$ (*punti lagrangiani*) ed i cosiddetti **NEA** (Near Earth Asteroids, a volte chiamati anche NEO, dove O sta per objects), la cui orbita è più interna ed incrocia a volte anche l'orbita della Terra. Ovviamente i NEO sono i progenitori diretti delle meteoriti, che possono anzi essere considerate, prima che cadano sulla Terra, come micro–NEO (o frammenti di essi).

6.4.2 Le comete

Un altro interessante campione osservativo è costituito dalle comete, pianetini ricchi di sostanze volatili immessi per lo più in orbite estremamente eccentriche, e le cui proprietà variano drammaticamente nel processo di avvicinamento al Sole. Tale argomento esula tuttavia dalle problematiche astrofisiche di nostro prevalente interesse. Dal punto di vista dinamico e fisico le comete sono probabilmente originarie di una fascia esterna di corpi minori, compresa fra quella asteroidale e quella dei TNO (v. il prossimo paragrafo), anche se molte, nella successiva evoluzione dovuta prevalentemente a passaggi ravvicinati con i pianeti maggiori, si sono spostate su orbite più interne o, più spesso, in orbite che escono, all'afelio, dalla zona dei pianeti conosciuti e si spingono ai confini del Sistema Solare (dinamicamente il Sistema Solare finisce quando diventa prevalente l'attrazione delle stelle vicine. Ciò succede a circa $10^5 A.U.$, ossia a distanze dell'ordine dell'anno luce).

Tale zona esterna del Sistema prende anche il nome di **nube di Oort**.

6.4.3 La fascia di Kuiper-Edgeworth

Nel Sistema Solare esterno, oltre Giove, ci sono molti altri interessanti corpi minori, anche se per ovvie ragioni osservative la loro scoperta è cominciata negli ultimi venti anni circa. I **Centauri** sono corpi in orbite comprese fra Giove e Nettuno. La zona è dinamicamente instabile e porta spesso in orbite cometarie. Oltre Nettuno si hanno invece i **TNO** (Trans-Neptunian Objects) che costituiscono anche la cosiddetta *Fascia di Kuiper-Edgeworth* (dal nome dei due scienziati che ne avevano suggerito l'esistenza alcuni decenni prima della sua effettiva scoperta). Sono a loro volta distinti in alcuni sottogruppi, il più interessante dei quali è forse quello dei **Plutini**, che sono in risonanza orbitale 3:2 con Nettuno, esattamente come Plutone (che ne è, in un certo senso, il reale capofila).

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 dicembre 2014] risultano scoperti quasi 2000 pianeti extrasolari, in circa 1200 sistemi, pur con tutte le limitazioni e le incertezze di cui parleremo. Un catalogo online è tenuto aggiornato all'indirizzo:

http://exoplanet.eu

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 <u>diretto</u>, consistente nel cercare di osservare qualche pianeta (ovviamente cominciando dai più grandi), sia di tipo <u>indiretto</u>, consistente nell'osservare gli eventuali effetti di un sistema planetario sulla stella centrale.

Nella figura 7.1, adattata da Perryman (2000), aggiornata al 2007 e ricavata dal link

http://www.rssd.esa.int/SA-general/Projects/Staff/perryman/planet-figure.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:

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

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 10*pc* 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. In prospettiva si pensa anche di adottare 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 verrebbe così "annullata". Il pianeta, invece, trovandosi in una posizione diversa, non centrale nell'immagine, potrebbe non essere cancellato e risultare di conseguenza ben visibile. Al momento però possiamo registrare all'attivo poche 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 in corpi planetari. Alla fine del 2014 le osservazioni dirette catalogate si riferiscono a 47 sistemi, per un totale di 51 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

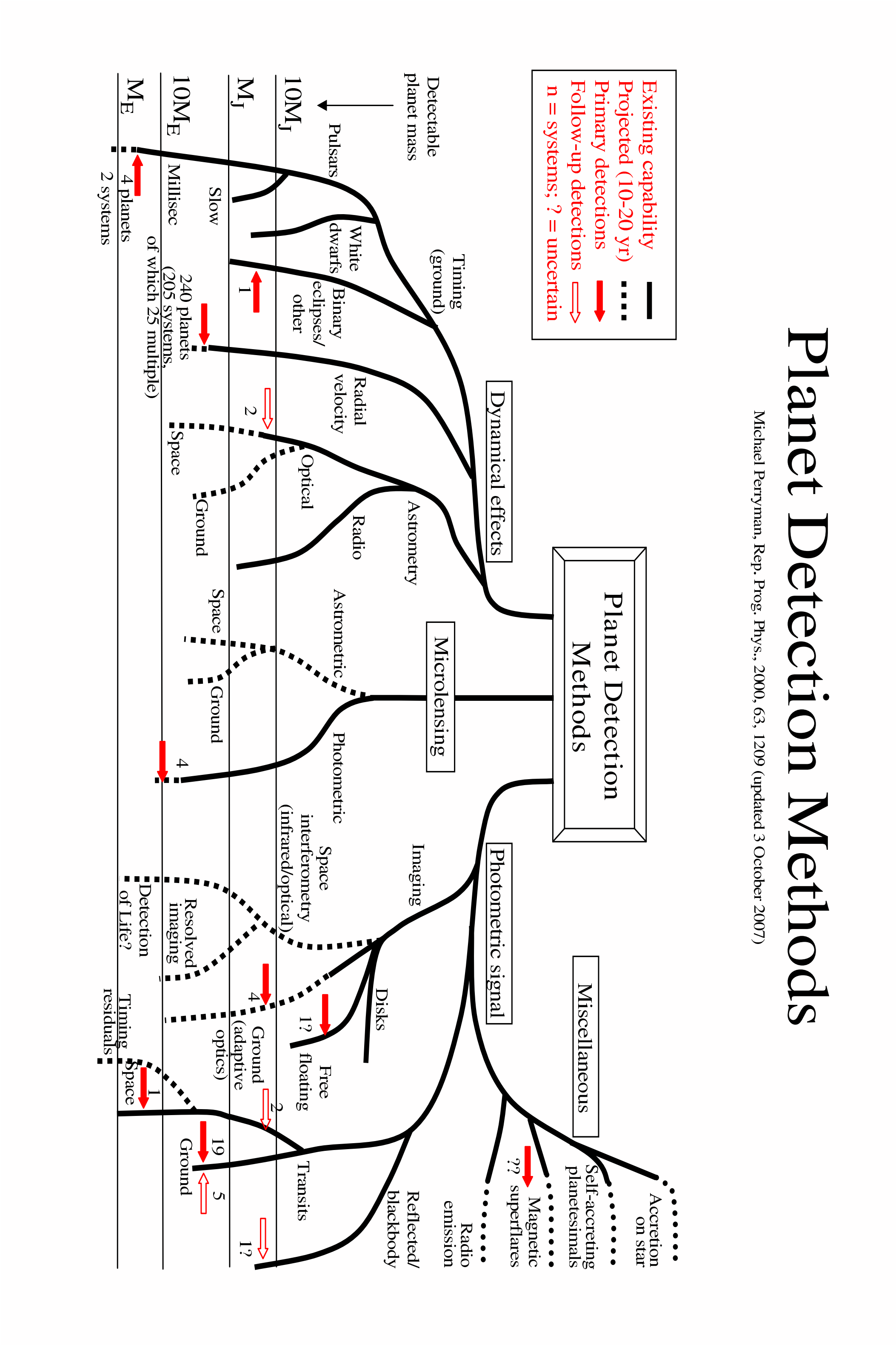

Figure 7.1: Il “Perryman plot”

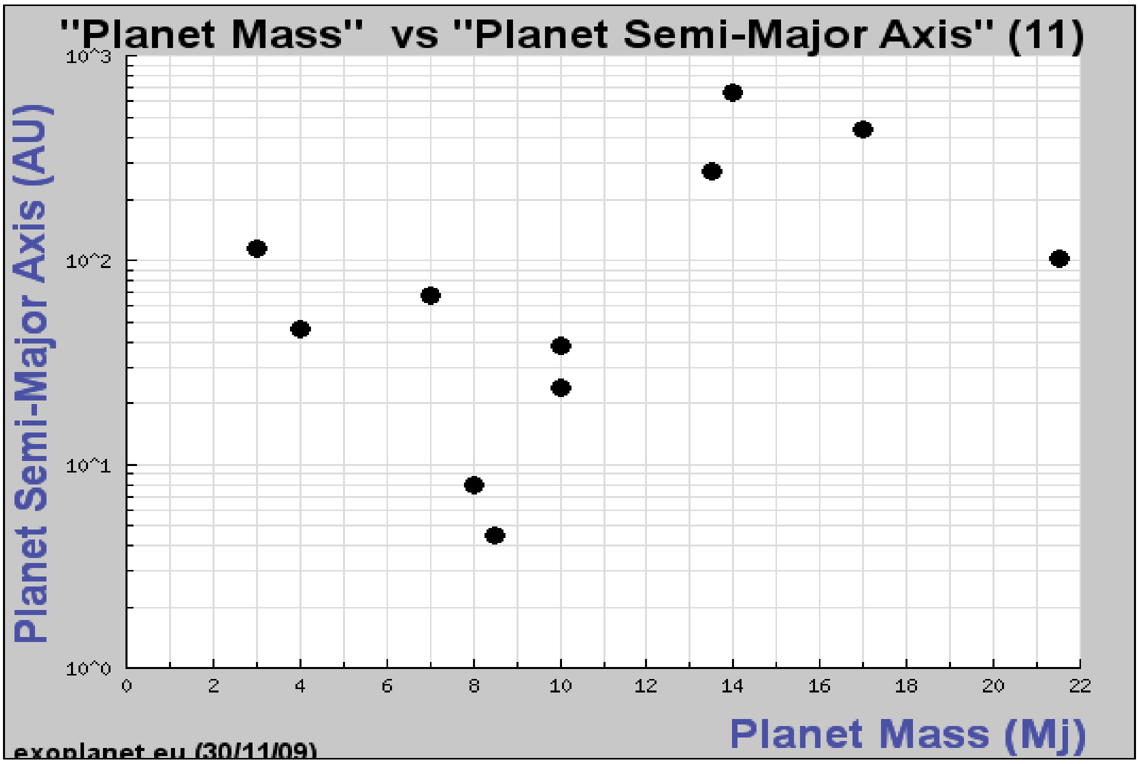

Figure 7.2: Correlazione fra massa (in unità di masse di Giove) e semiasse maggiore (AU, scala logaritmica) per i sistemi osservati tramite imaging - Figura ottenuta dal citato sito exoplanet.eu; agg. dicembre 2010.

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. 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. 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 miglio 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 parallelepipedo di spigoli $2R_E, v_{rel}\Delta t, d$. 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 una trentina di 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 vengono rappresentati massa e semiasse maggiore dei pianeti scoperti tramite microlensing (aggiornata dicembre 2010). 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 clusterizzati, come previsto, intorno ad alcune 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 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.

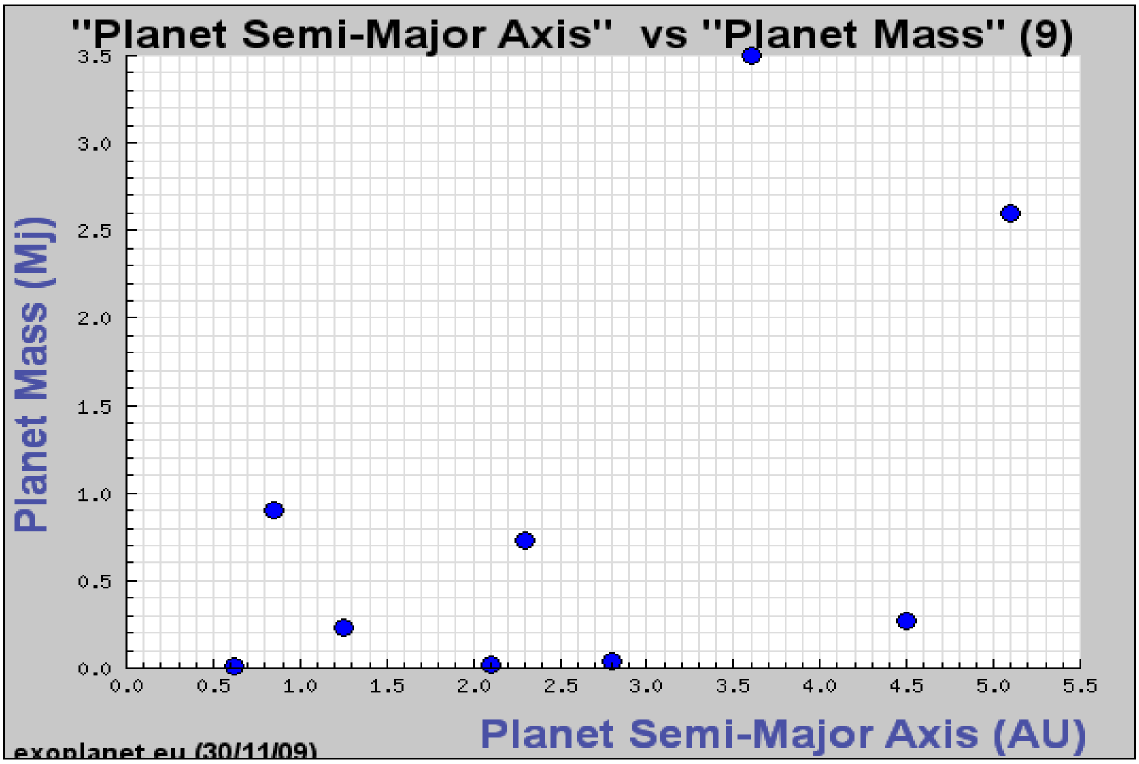

Figure 7.3: Correlazione fra semiasse maggiore (AU) e massa dei pianeti scoperti tramite microlensing. Figura presa dal citato sito exoplanet.eu; agg. dicembre 2010.

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** dovrebbe 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 decennio. 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, quasi 600 pianeti (dato aggiornato a fine 2014), 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. Le missioni spaziali in corso (**Corot** e **Kepler**) stanno scoprendo e/o scopriranno 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 fine 2014) più di mille (per la precisione 1163 in oltre seicento sistemi.

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 quasi invisibili, al momento, 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 tra il 5 e il 10 percento, che suona abbastanza ragionevole. 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

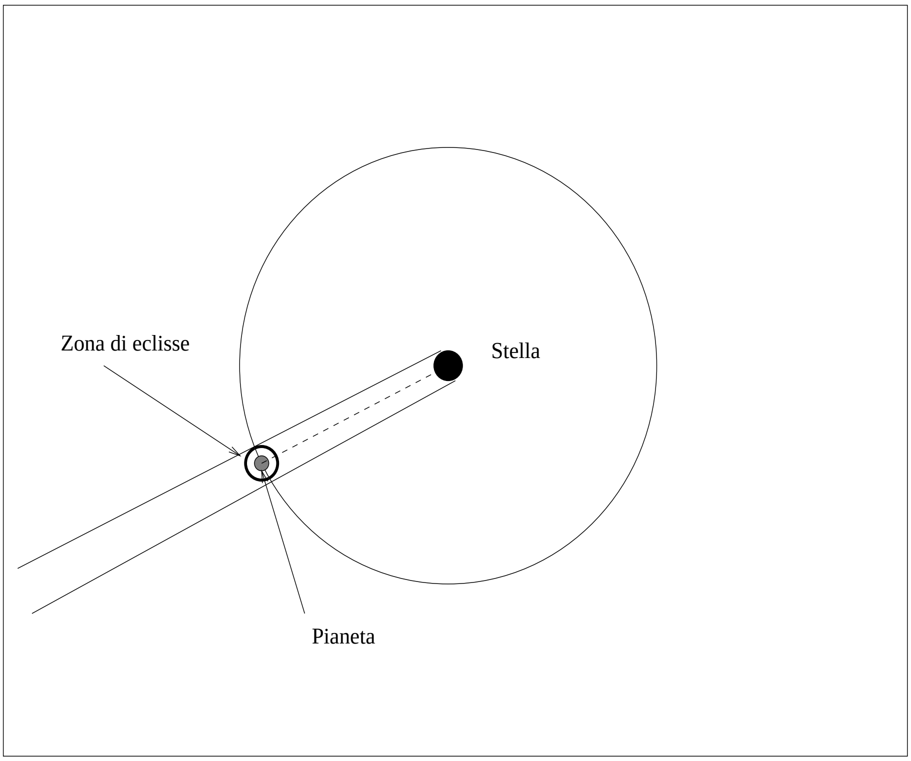

Figure 7.4: La zona in cui una eclisse può essere osservata è definita dal dischetto intorno al pianeta; la probabilità di osservare una eclisse è quindi data dal rapporto tra la superficie di tale dischetto e quella della sfera centrata sulla stella e passante per il pianeta (si trascura per semplicità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

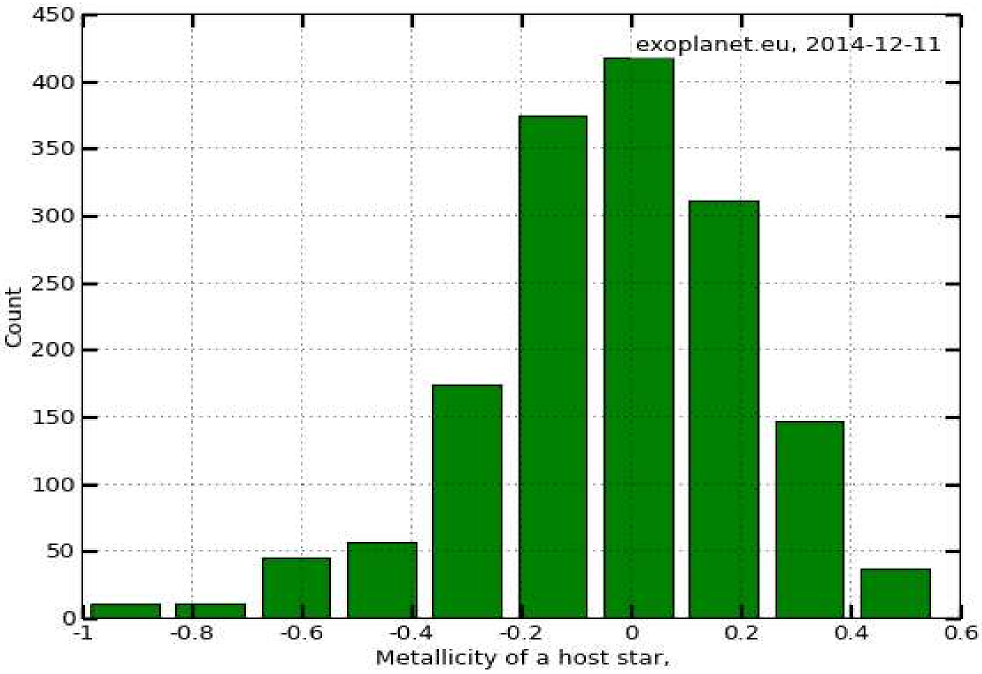

Figure 7.5: Distribuzione di stelle con pianeti osservati in funzione della metallicita' (in unità solari). Dal sito exoplanet.eu, aggiornata a dicembre 2014.

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'istogramam 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).

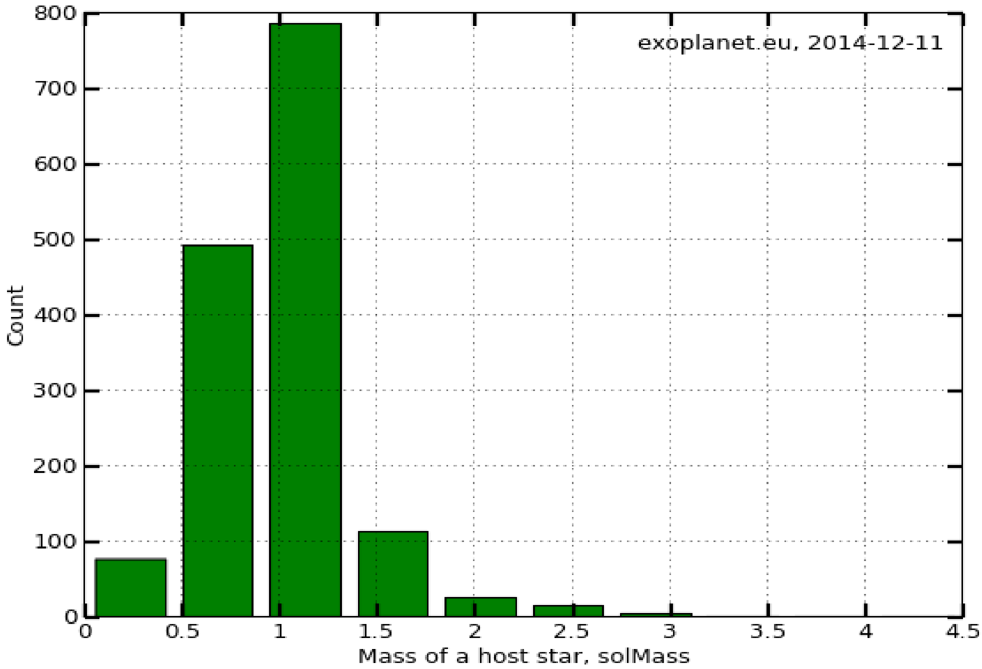

Figure 7.6: Distribuzione della massa delle stelle con pianeti osservati. Dal sito exoplanet.eu, agg. dicembre 2010.

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 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").

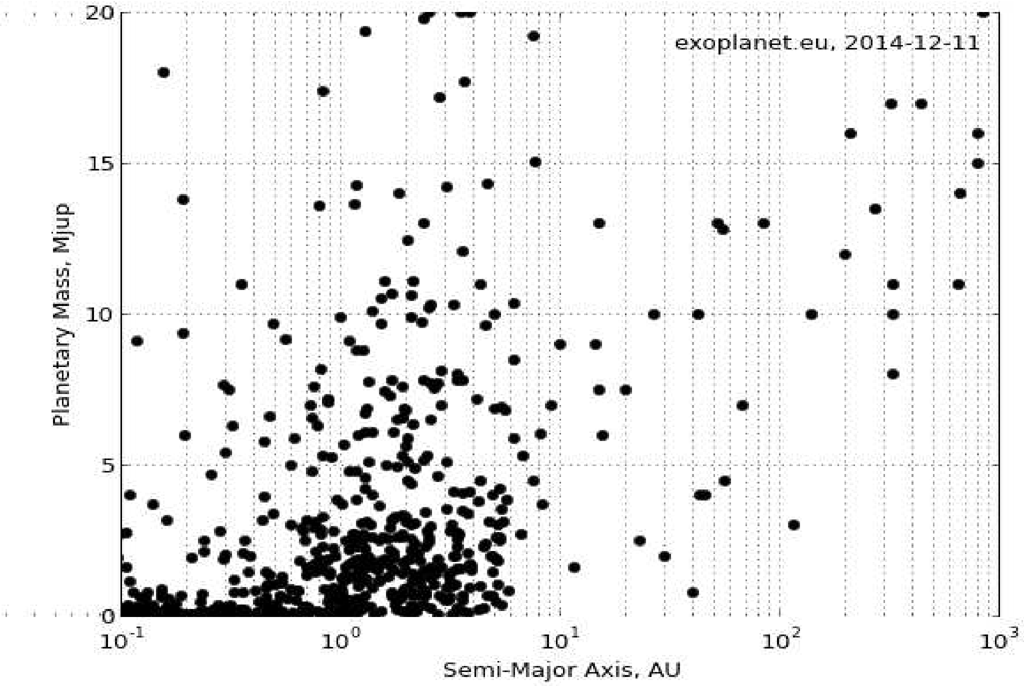

Figure 7.7: Plot semiasse maggiore/ massa per tutti i pianeti catalogati (dal sito exoplanet.eu, agg. dicembre 2010).

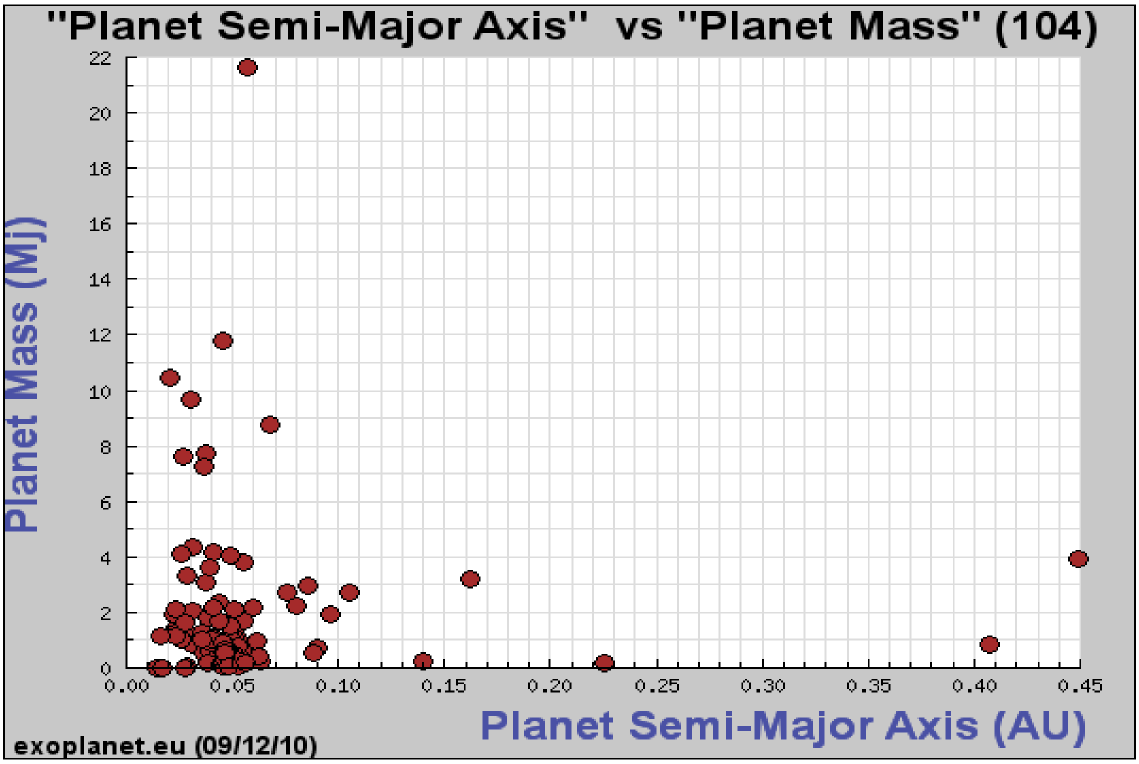

Figure 7.8: Plot semiasse maggiore/ massa per tutti i pianeti catalogati osservati tramite transito(dal sito exoplanet.eu, agg. dicembre 2010).

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 dominate ai processi di migrazione planetaria (v. Cap.6).

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

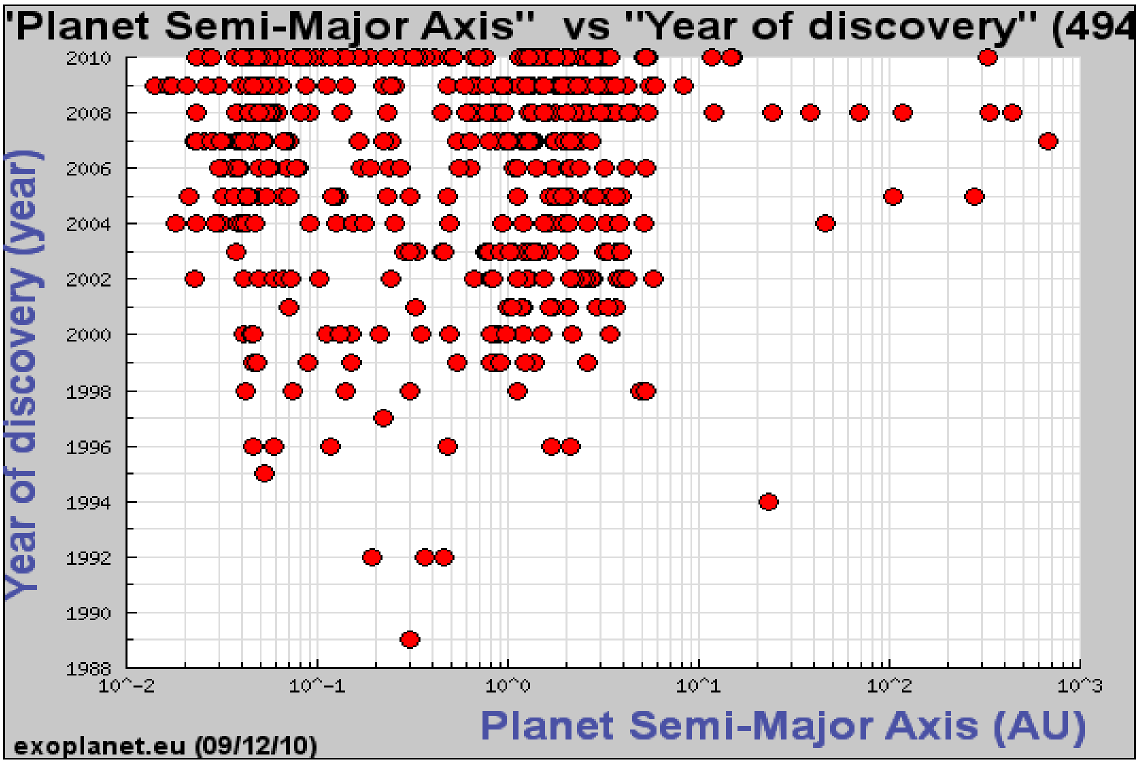

Figure 7.9: Plot semiasse maggiore/ anno di scoperta per tutti i pianeti catalogati (dal sito exoplanet.eu, agg. dicembre 2010).

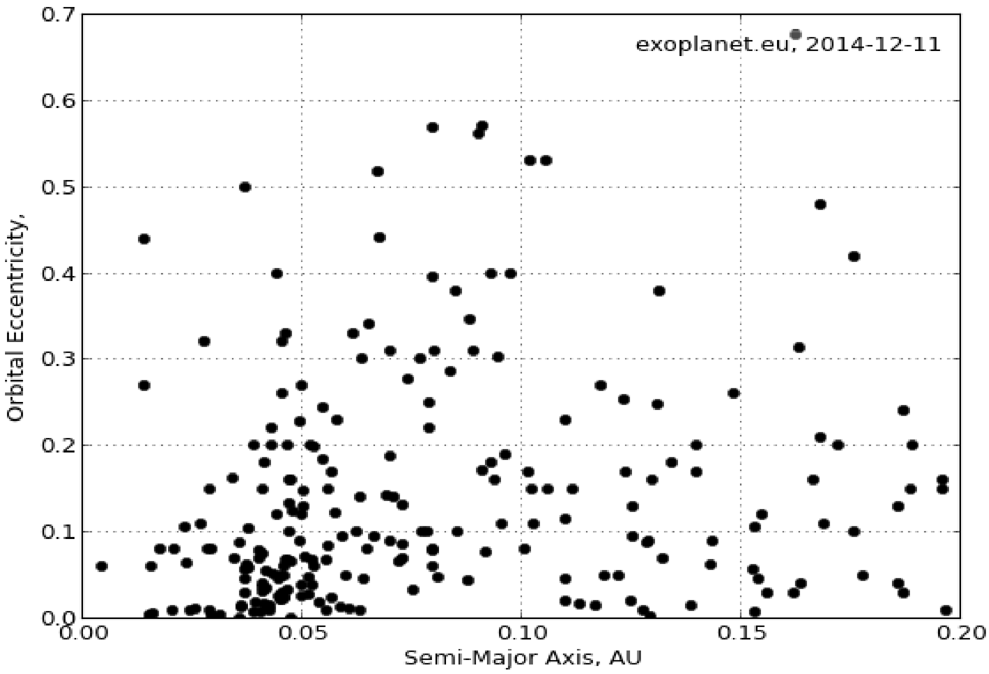

Figure 7.10: Vengono rappresentate le orbite dei pianeti extrasolari in un piano semiasse-eccentricità, limitatamente a quelli più vicini di $0.2 A.U.$. Come si vede i valori di quest'ultima sono abbastanza dispersi, ma i sistemi più stretti hanno spesso orbite meno eccentriche; ciò può essere spiegato come conseguenza di processi di tipo mareale (dal sito exoplanet.eu, agg. dicembre 2014).

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.

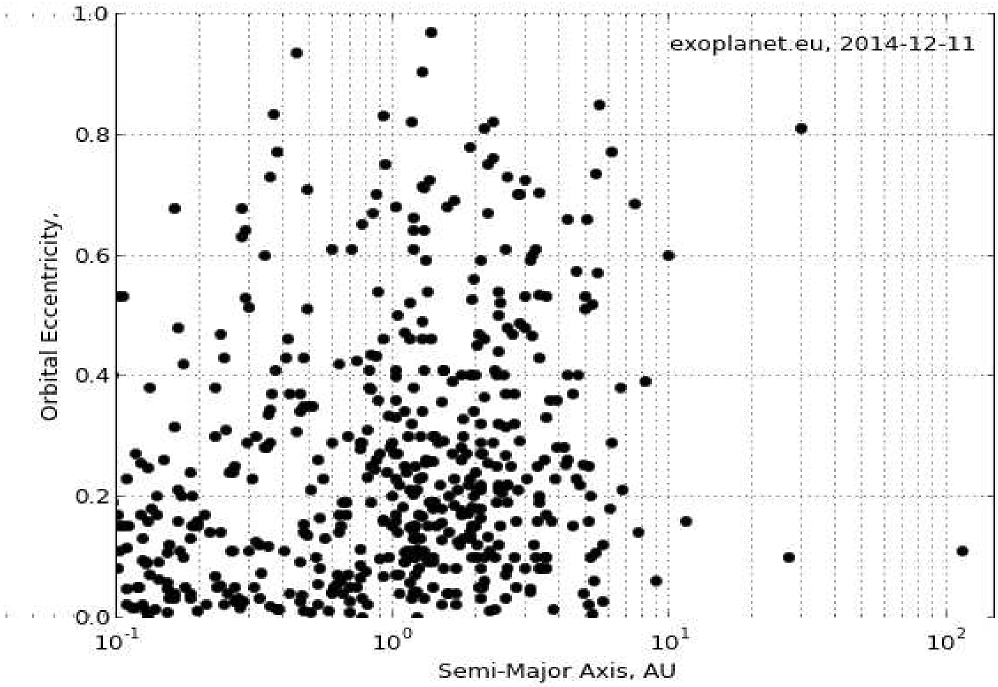

Figure 7.11: Vengono rappresentate le orbite dei pianeti extrasolari in un piano semiasse-eccentricità. Come si vede i valori di quest'ultima sono abbastanza dispersi e scorrelati dal semiasse maggiore; orbite molto eccentriche, presenti da semiassi maggiori medio–bassi a semiassi non troppo alti sono un elemento –indiziario– a favore del modello dei Jumping Jupiters (dal sito exoplanet.eu, agg. dicembre 2014).