



La ricerca e la scoperta di pianeti extrasolari, cioè di pianeti che orbitano attorno a stelle diverse dal nostro Sole, è un campo molto recente dell'astronomia: solo negli ultimi 20-30 anni i progressi delle tecniche osservative, e soprattutto della spettroscopia, hanno permesso di osservare oggetti di questo tipo. Nella maggior parte dei casi il termine "osservare" non deve essere inteso in senso letterale, in quanto la prova dell'esistenza e la determinazione delle caratteristiche di questi oggetti non avviene attraverso un'immagine, ma con metodi più indiretti. Tuttavia anche in questo campo le tecniche strumentali stanno facendo progressi inimmaginabili fino a poco tempo fa, e di alcuni pianeti extrasolari è oggi possibile avere anche immagini telescopiche.

Ordini di grandezza

Distanza

Luminosità

Massa

Iniziamo richiamando alcuni concetti generali sulle unità di misura di lunghezza (distanza), luminosità e massa usate in astronomia, soprattutto per dare un'idea degli ordini di grandezza dei fenomeni di cui stiamo trattando.

Unità di distanza

1 Unità Astronomica (AU) = 1.496×10^8 km = 149.6 milioni di km
(dimensioni del Sistema Solare \approx 30-40 AU)

1 anno luce = 63241 AU
(distanza stella più vicina \approx 4.22 anni luce)
(diametro della Galassia \approx 10^5 anni luce)
(distanza della galassia più vicina \approx 2×10^6 anni luce)

1 parsec (parallasse secondo) = 3.26 anni luce

La difficoltà di osservazione dei pianeti extrasolari è dovuta principalmente alla grande distanza a cui si trovano. All'interno del nostro Sistema Solare siamo abituati a misurare le distanze usando come unità di misura l'*Unità Astronomica* (AU), pari alla distanza media della Terra dal Sole, cioè circa 150 milioni di chilometri. Usando questa unità la dimensione del Sistema Solare è di circa 30-40 AU: ad esempio l'orbita di Nettuno, il più distante dal Sole tra i pianeti principali, ha un raggio di circa 30 AU. Le distanze tra le stelle sono invece molto più grandi, tanto da richiedere unità di misura diverse: *l'anno luce* (la distanza che la luce percorre in un anno) oppure il *parsec* (la distanza a cui una lunghezza pari a una Unità Astronomica appare con una dimensione angolare di un secondo d'arco). Le distanze delle stelle più vicine al Sole sono pari ad alcuni anni luce, cioè sono di 5 ordini di grandezza (centinaia di migliaia di volte) superiori rispetto alle distanze interne al Sistema Solare.

Luminosità La scala di *magnitudine*

Magnitudine ("grandezza stellare") = luminosità della stella espressa in scala logaritmica

$$m = -2.5 \log_{10} L/L_0$$

5 magnitudini = luminosità x 100

Il primo effetto della distanza è quello di diminuire la luminosità apparente dei corpi celesti. Per misurare le luminosità degli astri gli astronomi utilizzano una scala logaritmica, chiamata scala di *magnitudine stellare*, la cui definizione è scelta in modo che le stelle più brillanti abbiano una magnitudine di circa 0 (zero) e le stelle al limite della visibilità a occhio nudo una magnitudine di circa 6. La costante moltiplicativa 2.5 che compare davanti al logaritmo fa sì che a una differenza di 5 magnitudini corrisponda un rapporto di luminosità pari a 100; il fatto che essa abbia segno negativo fa sì che a valori di magnitudine più grandi (in senso algebrico) corrispondano luminosità inferiori. Il motivo per cui le luminosità si esprimono in questo modo, che a prima vista può sembrare arbitrario, è sia storico (gli antichi greci usavano una scala simile), sia fisiologico (la sensibilità dell'occhio umano, come del resto quella di tutti gli organi di senso, segue una scala logaritmica).

Luminosità La scala di *magnitudine*

Oggetto	Magnitudine apparente
Sole	-27
Luna piena	-13
Venere	-4
Stelle più luminose	-1, 0
Limite occhio nudo	6 (???)
Limite telescopio 10 cm	13
Limite HST	30

La tabella riporta i valori di magnitudine che corrispondono alla luminosità di alcuni corpi celesti e al limite di sensibilità di alcuni strumenti di osservazione. Dopo il Sole e la Luna, l'astro più luminoso del cielo è il pianeta Venere; la stella fissa più luminosa è Sirio, con una magnitudine di circa -1.5. Il limite teorico di visibilità a occhio nudo è la magnitudine 6, anche se vedere una stella così debole richiede un cielo limpido e perfettamente buio, condizione quest'ultima che purtroppo in Italia si verifica molto raramente (da una città è già un successo vedere stelle di magnitudine 2).

Difficoltà dell'osservazione diretta

Esercizio: come apparirebbe un pianeta del Sistema Solare se fosse osservato alla distanza di una delle stelle più vicine?

Leggi di scala:

$$\text{diametro apparente (angolare)} \propto \frac{1}{R}$$

$$\text{luminosità} \propto \frac{1}{R^2}$$

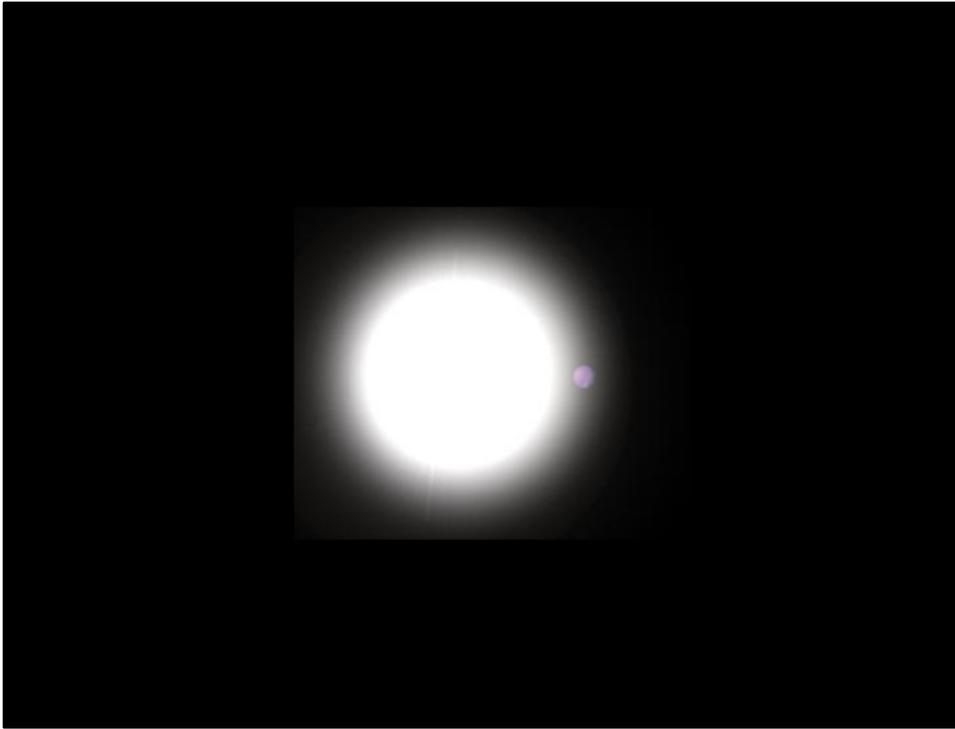
Le dimensioni e la luminosità apparenti di un oggetto si scalano in modo molto semplice con la distanza. La dimensione apparente (cioè angolare) è inversamente proporzionale alla distanza, mentre la luminosità è proporzionale alla superficie *apparente*, cioè inversamente proporzionale al quadrato della distanza.

Difficoltà dell'osservazione diretta

Come apparirebbe **Venere** se fosse osservata alla distanza di una delle stelle più vicine al Sole?

	Sole	Stella a 1 pc	Stella a 10 pc
Distanza dalla Terra	1 AU	200,000 AU	2,000,000 AU
Angolo stella-pianeta	50°	5''	0.5''
Luminosità relativa	1	1×10^{-10}	1×10^{-12}
Magnitudine	-4	23	28

Per renderci conto delle difficoltà che presenta l'osservazione di un pianeta extrasolare possiamo fare un semplice esercizio, e cioè calcolare come apparirebbe Venere, il pianeta più luminoso dei nostri cieli, se lo osservassimo da una distanza pari a quella delle stelle più vicine al Sole, cioè per esempio da una distanza di 1 o 10 parsec. Facendo i conti si vede che la luminosità di Venere diminuirebbe fino a sfiorare i limiti di osservabilità dei telescopi più potenti. Inoltre la sua distanza angolare dalla stella sarebbe così piccola da essere ai limiti delle capacità di risoluzione dei telescopi. In questi due dati ...



... sta tutta la difficoltà di osservazione dei pianeti extrasolari: oggetti di luminosità molto debole vicinissimi a stelle di luminosità enormemente più grande.

Massa: unità di misura e limiti

massa terrestre (M_E) = 5.97×10^{24} kg

massa di Giove (M_J) = $318 M_E$

massa del Sole (M_S) = $333000 M_E = 1047 M_J$

pianeta: $M < 13 M_J$

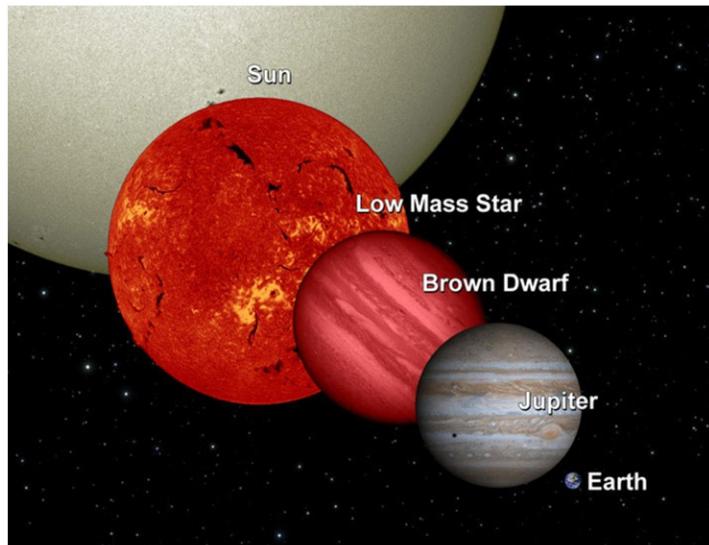
nana bruna: $13 M_J < M < 70-80 M_J$

stella : $70-80 M_J < M$

Un altro parametro fisico da considerare è la massa del pianeta. Per non usare numeri troppo grandi, come unità di misura delle masse planetarie si usa spesso la massa della Terra oppure quella del pianeta Giove, più di 300 volte maggiore di quella della Terra. La massa del Sole è ancora circa 1000 volte superiore a quella di Giove, cioè circa 300 mila volte superiore a quella della Terra.

La massa è importante nella caratterizzazione di un astro perché da essa dipendono direttamente anche altre proprietà, come la pressione e la temperatura interne, e quindi anche la possibilità che all'interno dell'astro si inneschino le reazioni termonucleari che producono energia e permettono all'astro di irraggiare luce e calore; in altre parole, la differenza tra un pianeta e una stella è principalmente una differenza di massa. Quando un corpo celeste ha una massa superiore a circa 70-80 masse di Giove, al suo interno si innescano le reazioni termonucleari tipiche delle stelle "normali" (quelle che gli astronomi chiamano stelle "di sequenza principale"), cioè la fusione dell'idrogeno in elio, la stessa reazione che produce l'energia nelle bombe all'idrogeno. Per valori più piccoli di massa, nell'intervallo tra circa 13 e 70-80 masse di Giove, l'astro produce energia secondo meccanismi molto meno efficienti (ma che richiedono pressioni e temperature inferiori), come la fusione del litio e del deuterio. Questi oggetti, di caratteristiche intermedie tra le stelle e i pianeti, sono chiamati *nane brune* (*brown dwarf*), hanno una temperatura più bassa delle stelle ed emettono radiazioni rosse e infrarosse. Al di sotto del limite di 13 masse di Giove l'oggetto è un pianeta e non produce quantità rilevanti di energia.

Stella, nana rossa, nana bruna, pianeta



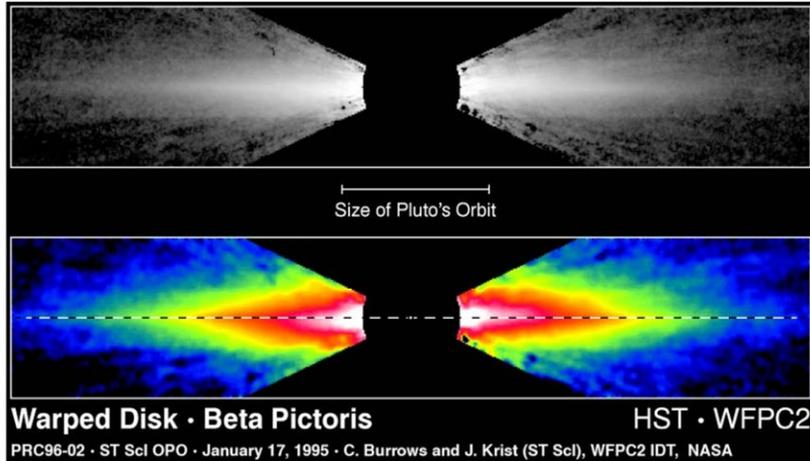
Nel disegno sono rappresentate, in scala, le dimensioni del Sole, di una *nana rossa* (la categoria più piccola di stelle di sequenza principale), di una nana bruna, di un pianeta gigante (Giove) e della Terra.

Tappe della scoperta

- 1984:** anello di polveri attorno a β Pictoris
- 1988:** prima scoperta di un pianeta extrasolare (γ Cephei, conferma 2003)
- 1992:** primo pianeta attorno a una pulsar
- 1995:** prima scoperta sicura (51 Pegasi)
- 2004:** prima osservazione ottica diretta
- 2015:** 1890 pianeti, 1189 sistemi planetari

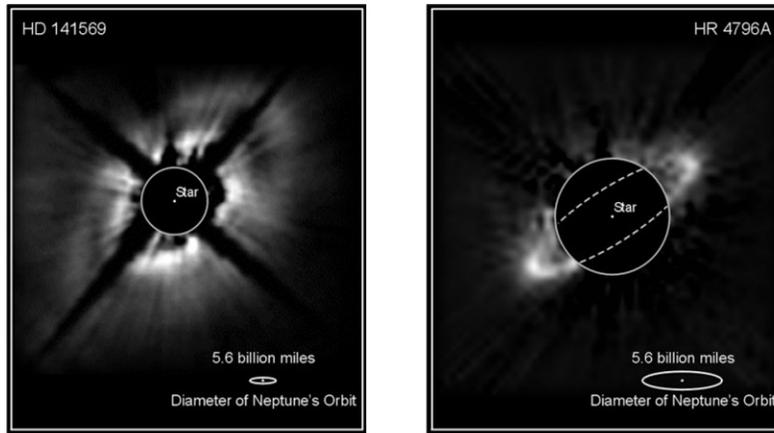
Benché l'esistenza di pianeti orbitanti attorno a stelle diverse dal nostro Sole fosse stata supposta da molto tempo, a causa delle difficoltà osservative a cui si è accennato la prima scoperta sicura di un pianeta extrasolare risale solo al 1995, anche se negli anni immediatamente precedenti erano state fatte scoperte "incerte" (cioè non considerate sicure da tutta la comunità degli astronomi) di pianeti e osservazioni (attorno ad alcune stelle) di anelli di gas e polveri, considerati i precursori di un sistema planetario. Dopo il 1995 diversi gruppi di astronomi si sono dedicati a questo campo e le scoperte si sono succedute a un ritmo sempre più accelerato, tanto che oggi (febbraio 2015) conosciamo quasi duemila pianeti extrasolari.

Anelli di polvere
attorno ad altre stelle



Gli anelli di gas e polveri presenti attorno ad alcune stelle sono un indizio indiretto dell'esistenza di pianeti extrasolari perché, come vedremo più avanti, si pensa che sia proprio dalla condensazione di queste nubi che nascono i sistemi planetari. L'osservazione di queste strutture è molto difficile perché, come nel caso dei pianeti stessi, si tratta di oggetti di luminosità molto debole che si trovano nelle immediate vicinanze di una stella, molto più luminosa. Il primo anello circumstellare fu osservato direttamente solo nel 1984 attorno alla stella β Pictoris. In questa immagine (che non è quella della scoperta, ma è stata ottenuta alcuni anni dopo con il telescopio spaziale Hubble) l'intensa luminosità dell'astro centrale è coperta da un apposito diaframma (la sagoma nera a forma di farfalla al centro delle immagini) in modo che non interferisca con l'osservazione del disco circumstellare, che in questo caso ci appare quasi di taglio.

Anelli di polvere
attorno ad altre stelle



Dopo β Pictoris sono stati scoperti dischi circumstellari anche attorno ad altre stelle (anche in queste immagini le sagome nere e la croce al centro delle fotografie sono diaframmi che fanno parte dello strumento di osservazione, e non strutture astronomiche) ...

Dischi protoplanetari



... e oggi se ne conoscono alcune decine.

Meccanismo di formazione dei sistemi planetari

La grande quantità di dati osservativi raccolti sulla struttura e composizione del Sole e dei pianeti che orbitano attorno ad esso ha permesso di farci un'idea sul modo in cui deve essersi formato il nostro Sistema Solare; un'idea che, benché abbia ancora molti punti incerti e da investigare, si pensa sia valida nelle sue linee generali.



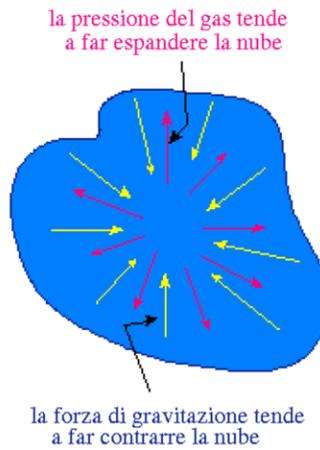
La maggior parte delle stelle non sono distribuite a caso nell'Universo ma fanno parte di sistemi più vasti chiamati *galassie*. Una galassia (anche la nostra Galassia, la Via Lattea) è un agglomerato di diverse centinaia di miliardi di stelle, tenute insieme dall'attrazione gravitazionale reciproca, di forma vagamente lenticolare o discoidale. Oltre alle stelle, una galassia contiene una grande quantità di gas e polveri, che costituiscono la materia prima da cui le stelle si formano. In questa immagine di una galassia è ben visibile una vasta fascia di gas e polveri disposta lungo il disco della galassia; la zona luminosa centrale non è un oggetto singolo ma è costituita dall'insieme di miliardi di stelle che, a causa della distanza, non possono essere viste separatamente, nello stesso modo in cui una spiaggia, vista da lontano, sembra una distesa ininterrotta di materia, anche se in realtà è costituita da un agglomerato di granelli di sabbia.

Nubi molecolari giganti



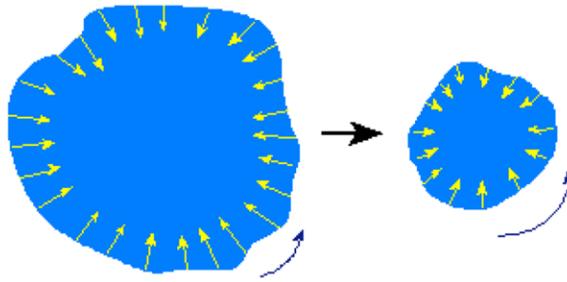
Il gas e le polveri contenuti in una galassia sono distribuiti soprattutto in grandi strutture chiamate *nubi molecolari giganti*: nubi *molecolari*, in quanto il materiale si trova non solo allo stato atomico ma anche sotto forma di molecole di diverso tipo (anche di composti organici); *giganti*, perché le dimensioni tipiche di questi oggetti sono alcuni anni luce, e le loro masse dell'ordine delle centinaia di migliaia o milioni di masse solari. Ogni nube molecolare gigante contiene quindi abbastanza materia da poter formare milioni di stelle.

Formazione del Sistema Solare - 1



Le nubi molecolari giganti sono in uno stato di equilibrio instabile tra l'effetto di due forze contrastanti: la pressione interna del gas, che tenderebbe a far espandere la nube, e la forza di attrazione gravitazionale della materia, che tenderebbe a farla contrarre. Il punto di equilibrio è legato soprattutto alla densità della nube cioè, a parità di massa, alle sue dimensioni.

Formazione del Sistema Solare - 2

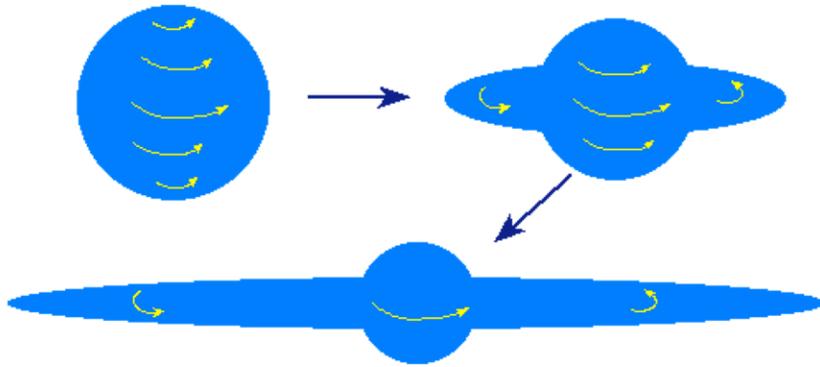


Collassando la nube accelera la sua velocità di rotazione per la conservazione del momento angolare

Se, per qualsiasi motivo, la densità di una nube molecolare gigante supera un certo valore critico, la forza di gravità prende il sopravvento sulla pressione e la nube inizia a contrarsi. La contrazione produce un aumento di densità e quindi un ulteriore aumento della gravità rispetto alla pressione, e quindi il processo di contrazione, una volta avviato, tende a procedere a velocità sempre più rapida. Nel corso della contrazione piccole regioni interne alla nube, che hanno densità maggiore delle regioni circostanti, si contraggono a velocità più elevata: in questo modo la nube si frammenta in nubi più piccole, che hanno dimensioni diverse ma in genere una massa caratteristica dell'ordine delle masse stellari (da una frazione ad alcune decine di masse solari).

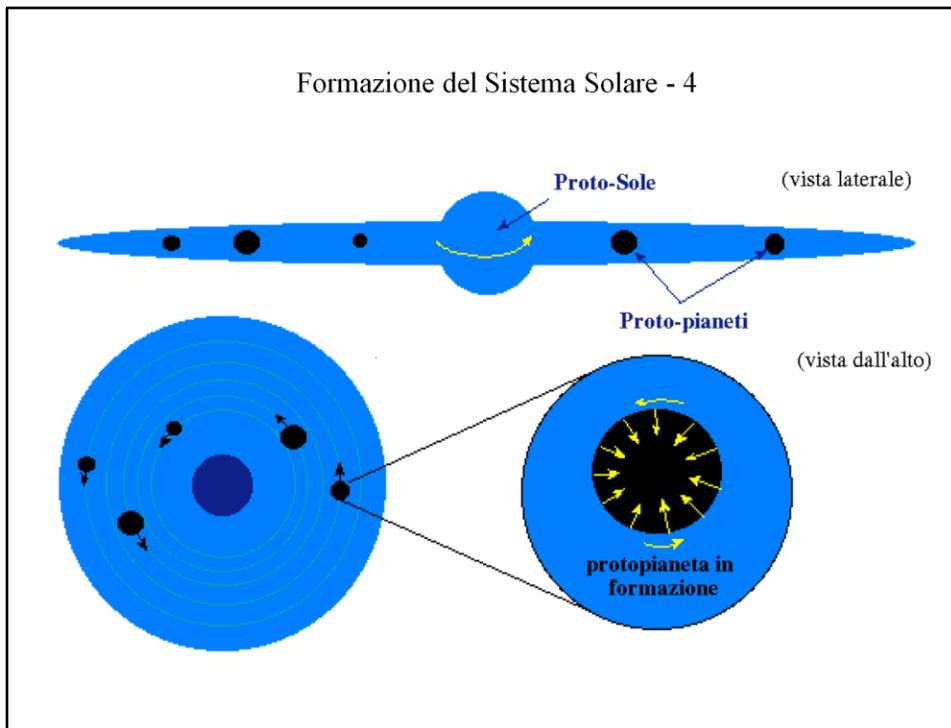
Inizialmente la nube possiede una piccola velocità di rotazione, che deriva dal suo movimento di rivoluzione attorno al centro della galassia; nel corso della contrazione, per la legge di conservazione del momento angolare, la velocità di rotazione continua ad aumentare.

Formazione del Sistema Solare - 3



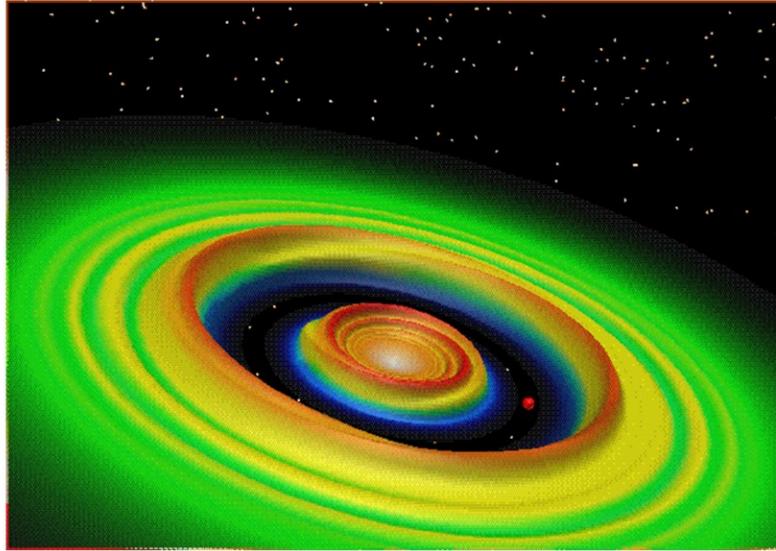
Formazione del disco (veduta laterale)

Quando la nube, nel corso della sua contrazione, diventa sufficientemente piccola, la sua rotazione diventa così veloce che la forza centrifuga riesce a controbilanciare l'attrazione gravitazionale, almeno per una frazione del materiale. Mentre la parte centrale della nube si contrae sempre di più, dando origine a una stella, il resto del materiale si dispone a forma di disco attorno alla proto-stella, dando origine al sistema planetario.



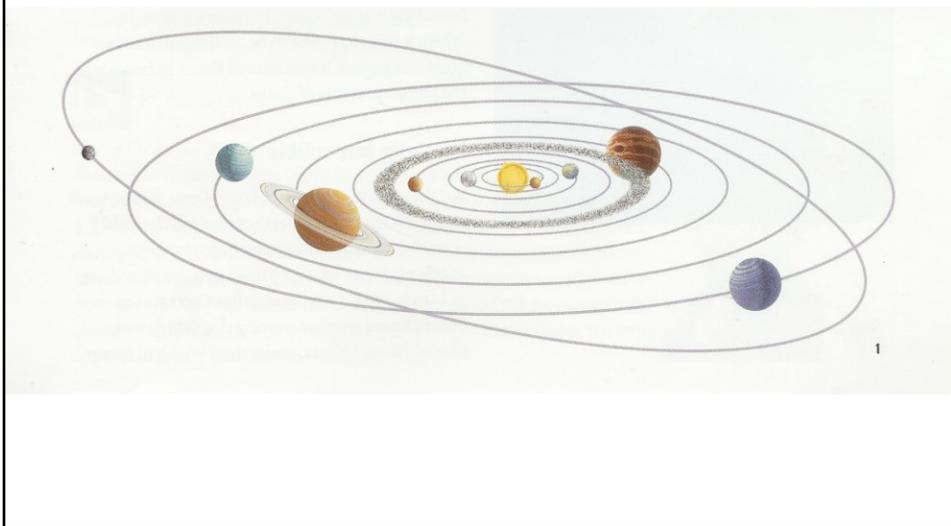
La formazione dei pianeti avviene per gradi successivi di condensazione della polvere e del gas che formano il disco circumstellare. Inizialmente i granelli di polvere, di dimensioni dell'ordine del micron, si condensano in granelli più grandi (millimetri, centimetri, poi metri) unicamente per effetto di forze superficiali di coesione di tipo elettrostatico e chimico: è lo stesso fenomeno per cui i granelli di polvere sui pavimenti delle nostre case tendono ad aggregarsi in "batuffoli" di sporco. Quando questi nuclei di formazione dei pianeti (chiamati *planetesimi*) raggiungono dimensioni dell'ordine della decina di chilometri, anche l'attrazione gravitazionale reciproca inizia ad avere un ruolo importante e il procedimento di accrezione continua a ritmo accelerato fino a portare alla formazione di grossi embrioni planetari (di massa dell'ordine di un centesimo o un decimo dei pianeti attuali).

Formazione del Sistema Solare - 5



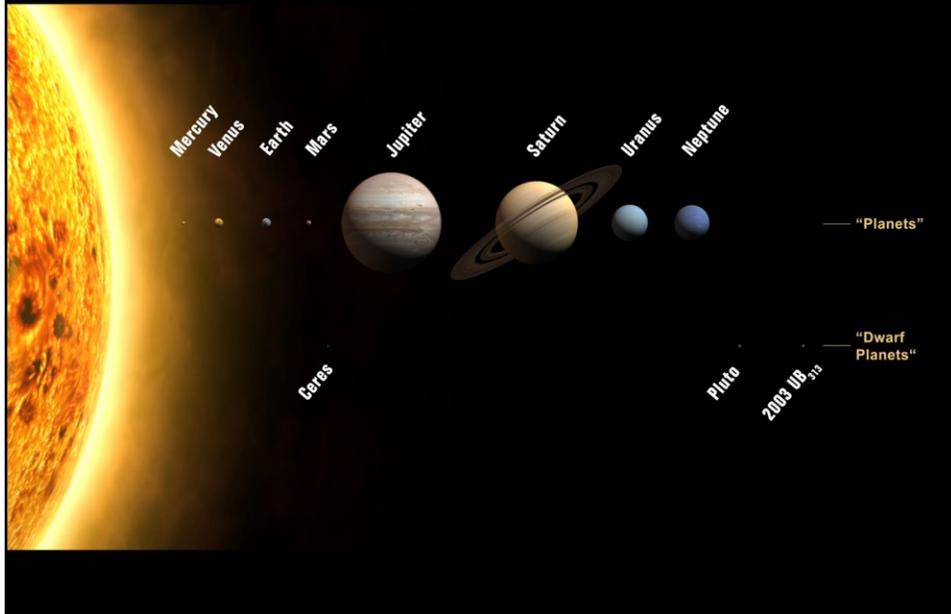
Tra gli embrioni planetari inizia un processo di competizione e di “cannibalismo” reciproco di tipo quasi darwiniano, che porta alla sopravvivenza finale solo degli oggetti più grandi, che con la loro attrazione gravitazionale svuotano le regioni prossime alla loro orbita, attirando e inglobando gli oggetti più piccoli o perturbando le loro orbite al punto da espellerli dal Sistema Solare. I pianeti rimasti occupano quindi tutte le nicchie di stabilità orbitale possibili. Se tra le orbite di due pianeti consecutivi esistesse una regione di stabilità, il materiale originariamente presente in essa si sarebbe potuto accumulare in un altro pianeta intermedio; al contrario se un pianeta venisse a trovarsi troppo vicino all’orbita di un pianeta più grande, la sua traiettoria verrebbe perturbata ed esso sarebbe espulso dalla regione. Il vento solare prodotto dal Sole primordiale ha poi completato l’opera di “pulizia”, spazzando via i resti di gas e polveri, per cui il Sistema Solare attuale non ne contiene più.

Struttura del Sistema Solare



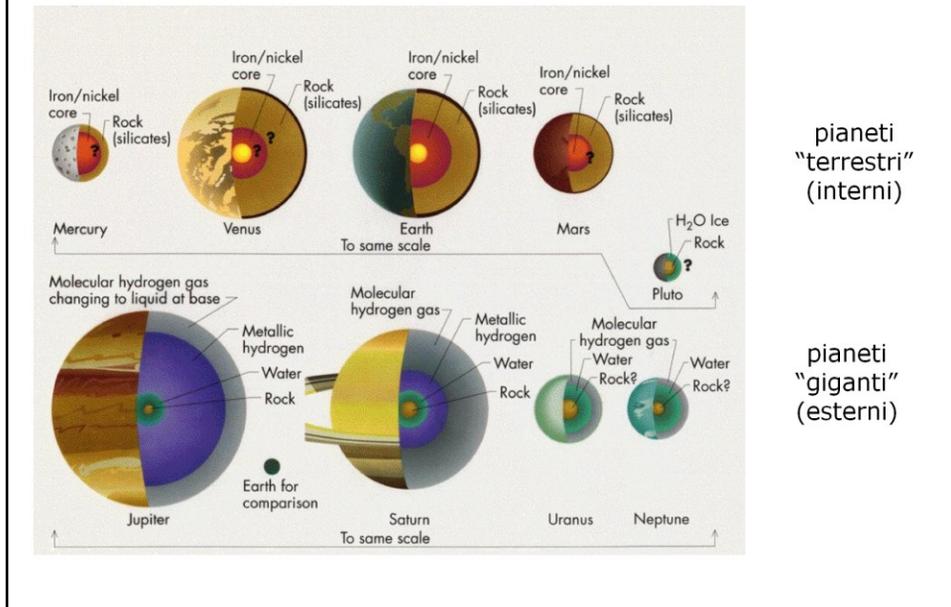
Questo meccanismo di formazione spiega l'aspetto attuale delle orbite dei pianeti del Sistema Solare, che si svolgono tutte quasi sullo stesso piano (le inclinazioni orbitali reciproche sono al massimo di pochi gradi), che è poi il piano della nebulosa primordiale, sono quasi circolari e spaziate con regolarità tra di loro.

Struttura del Sistema Solare



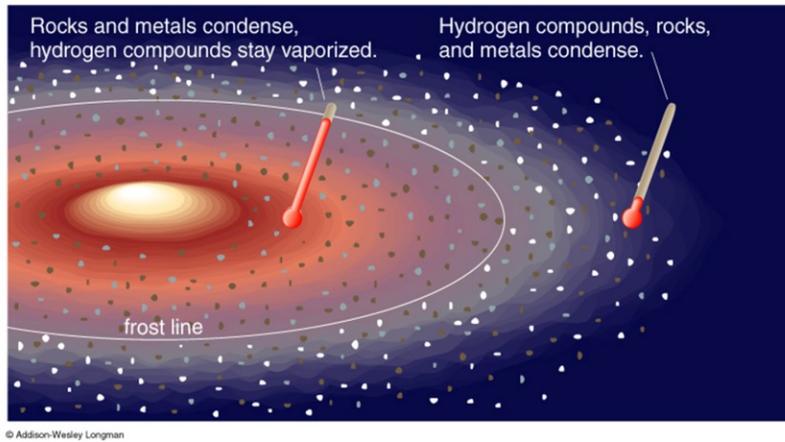
Lo stesso meccanismo spiega anche alcune delle caratteristiche fisiche dei pianeti, e in particolare la netta distinzione esistente tra i *pianeti interni* (Mercurio, Venere, Terra e Marte), detti anche *pianeti terrestri*, e i *pianeti esterni* (Giove, Saturno, Urano e Nettuno), o *pianeti giganti*. (Nell'interpretare la figura si tenga presente che essa rappresenta in scala le dimensioni fisiche dei pianeti, ma non le loro distanze dal Sole.)

Differenze di composizione interna



I pianeti terrestri sono infatti composti principalmente da materiale solido e roccioso (silicati e ferro), hanno un'atmosfera molto sottile e densità elevate (tra i 4 e i 5.5 g/cm³). Al contrario i pianeti giganti hanno atmosfere molto spesse, formate da elementi leggeri (idrogeno ed elio) che costituiscono la maggior parte della massa del pianeta, e di conseguenza densità medie molto inferiori (da 0.7 a 1.8 g/cm³). Si pensa che il nucleo dei pianeti giganti non sia molto diverso da un pianeta terrestre, sia in dimensioni che in composizione; ma i pianeti terrestri mancano dello spesso strato di gas leggeri che avvolge i pianeti giganti. Si noti che la composizione chimica media dell'Universo, e quindi della protonebula solare, è molto ricca di elementi leggeri (circa 70% di idrogeno, quasi il 30% di elio, e solo una piccola frazione, 1-2%, di elementi più pesanti) e quindi corrisponde alla composizione dei pianeti giganti piuttosto che a quella dei pianeti terrestri.

Gradiente di temperatura



La differenza di composizione tra pianeti terrestri e pianeti giganti diventa comprensibile se si tiene conto del fatto che l'accrescimento dei pianeti si è svolto mentre il Sole si stava formando e cominciava a emettere luce e calore, creando quindi un gradiente di temperatura tra le zone interne ed esterne del Sistema Solare. A causa della temperatura più elevata nelle zone interne (quelle dove si sono formati i pianeti terrestri) gli elementi più leggeri si trovavano allo stato gassoso, e quindi non hanno potuto prendere parte al processo di accrescimento. I pianeti interni hanno potuto formarsi accumulando solo quella piccola percentuale (1-2%) di elementi pesanti che era presente nella nebulosa: essi sono quindi rocciosi e molto più piccoli dei pianeti esterni. Al contrario, al di là dell'orbita di Marte la temperatura della protonebula era abbastanza bassa da permettere la condensazione di idrogeno ed elio: i pianeti esterni hanno potuto accumulare anche questi elementi leggeri, molto più abbondanti, e raggiungere quindi masse molto maggiori.

Metodi di detezione

- spettroscopia (velocità radiale)
- fotometria (occultazioni)
- ritardi nei segnali di *pulsar*
- astrometria di precisione
- *microlensing* gravitazionale
- immagini dirette:
 - ottiche adattive
 - interferometria (da terra e dallo spazio)
 - immagini nell'infrarosso termico

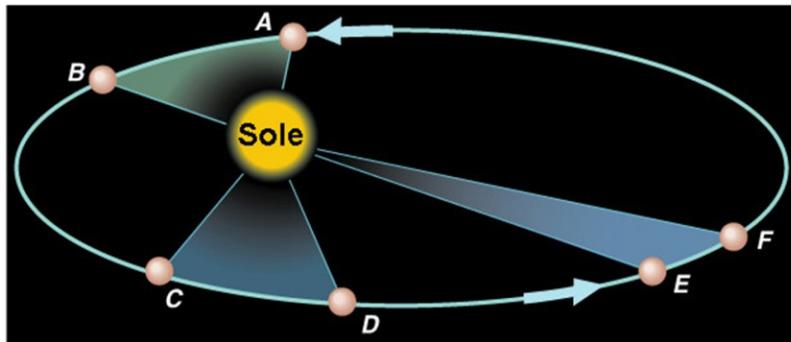
I pianeti extrasolari sono stati cercati e trovati utilizzando parecchi metodi diversi. In questa sede non possiamo descriverli tutti, e ci limiteremo a presentare i due più importanti: il metodo delle velocità radiali, che è stato il primo ad essere utilizzato con successo e che, fino a pochi anni fa, ha prodotto la maggior parte delle scoperte; e il metodo fotometrico, ad esso complementare e che sta acquistando importanza crescente, soprattutto per mezzo dell'utilizzo di satelliti artificiali dedicati.

Metodi di detezione

Misure di velocità radiale

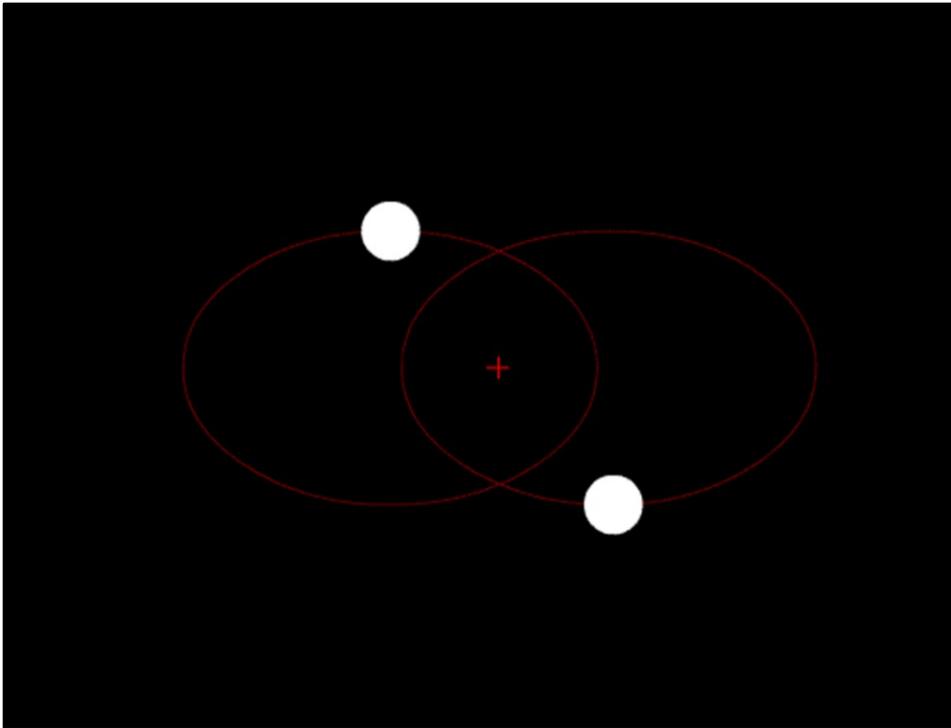
Il metodo delle velocità radiali cerca di scoprire l'esistenza di un pianeta misurando lo spostamento che l'attrazione del pianeta produce *sulla posizione della stella*.

I pianeti si muovono attorno al Sole

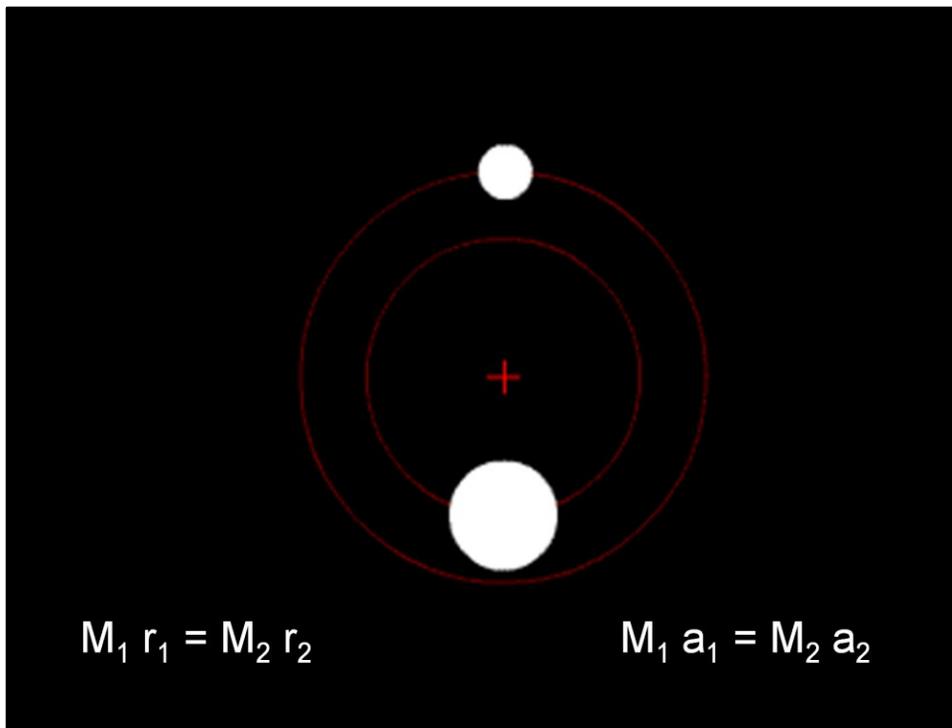


Ma è proprio vero che il Sole è immobile?

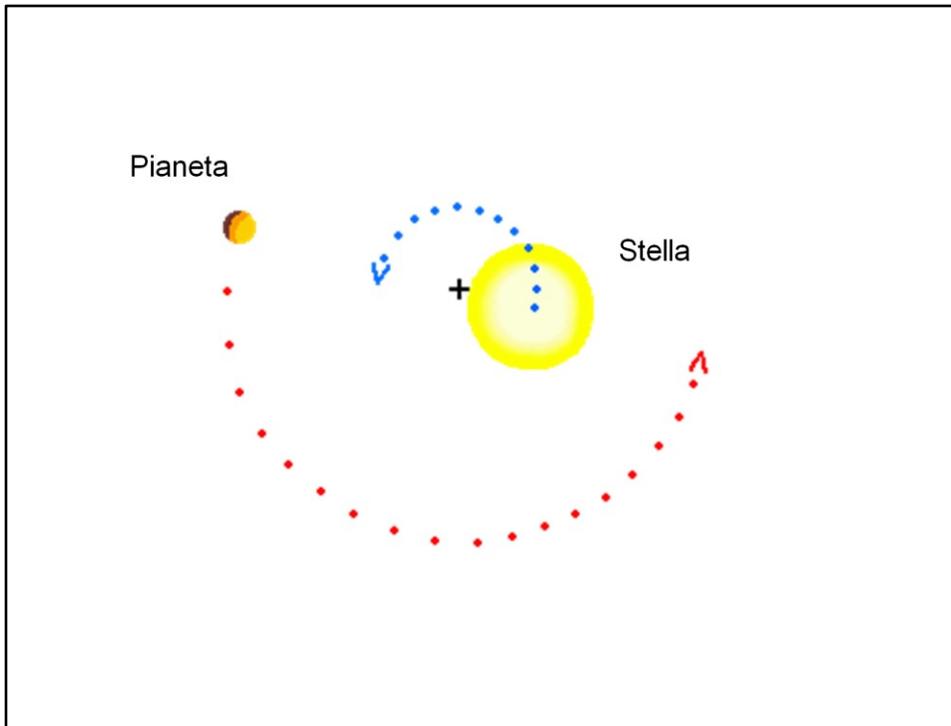
Per capire come il metodo funziona dobbiamo rivedere il concetto familiare (soprattutto quando si descrive il passaggio dalla visione tolemaica del mondo a quella copernicana) che il Sole stia fermo al centro del Sistema Solare e che siano i pianeti a orbitargli attorno, notando che questa è una descrizione solo approssimata di quanto succede nella realtà.



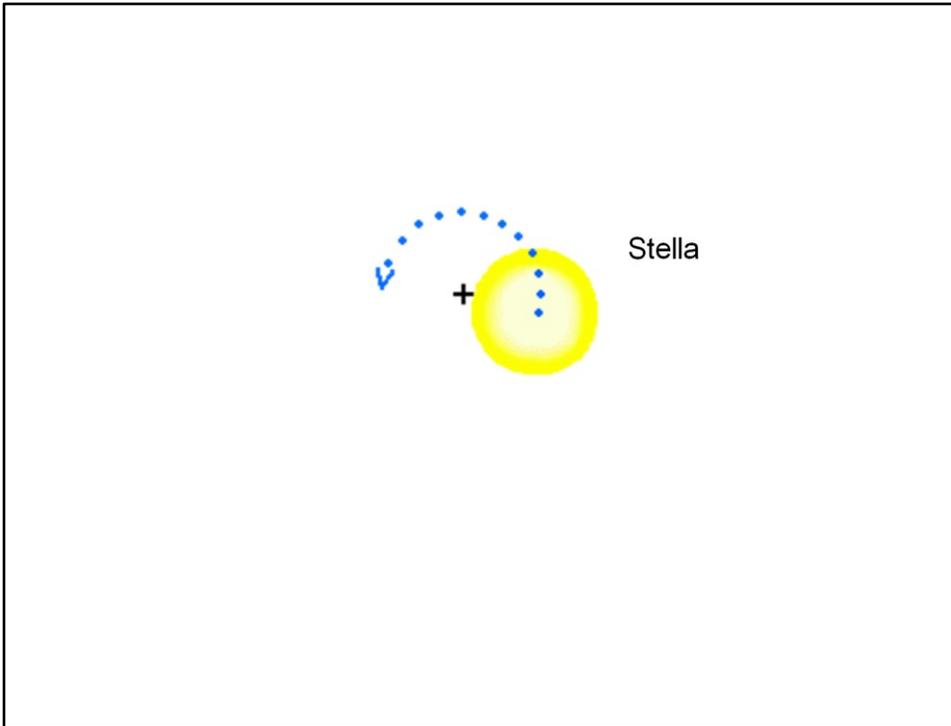
Per capire questo punto, consideriamo il caso in cui i due corpi che si muovono sotto la reciproca attrazione gravitazionale non siano così differenti in dimensioni, come nel caso del Sole e di un pianeta, ma siano esattamente uguali; questo caso, tra l'altro, si presenta effettivamente in natura, con una buona approssimazione, nei sistemi stellari binari, ossia nei sistemi formati da due stelle legate gravitazionalmente. In questo caso naturalmente non ci sarebbe una ragione fisica plausibile per cui uno dei due corpi dovrebbe restare fermo e l'altro muoversi. Quello che succede in realtà è che nessuno dei due corpi sta fermo, ma entrambi si muovono lungo orbite uguali, in modo che ciò che rimane fermo (o si muove di moto rettilineo uniforme) è il loro punto intermedio.



Nel caso di corpi di massa differente succede una cosa simile: i due corpi si muovono in modo tale che la posizione del loro centro di massa segua una traiettoria inerziale, cioè sia immobile o si muova di moto rettilineo uniforme. In ogni istante di tempo i due corpi si trovano in punti opposti rispetto al centro di massa del sistema, a distanze che sono inversamente proporzionali alla massa di ciascuno (ossia il prodotto della massa per la distanza dal centro è uguale per i due corpi). Ognuno dei due corpi si muove lungo un'orbita kepleriana (ellittica) attorno alla posizione del centro di massa. Per mantenere fisso il centro di massa, le orbite kepleriane dei due oggetti devono essere *simili* in senso geometrico (cioè avere la stessa forma e dimensioni in proporzione) e percorse con la stessa velocità angolare, con uno sfasamento di 180° una rispetto all'altra. In particolare, le eccentricità delle due orbite saranno uguali e i semiassi maggiori a_1 e a_2 avranno tra loro proporzione inversa al rapporto delle masse: $a_1/a_2 = M_2/M_1$.

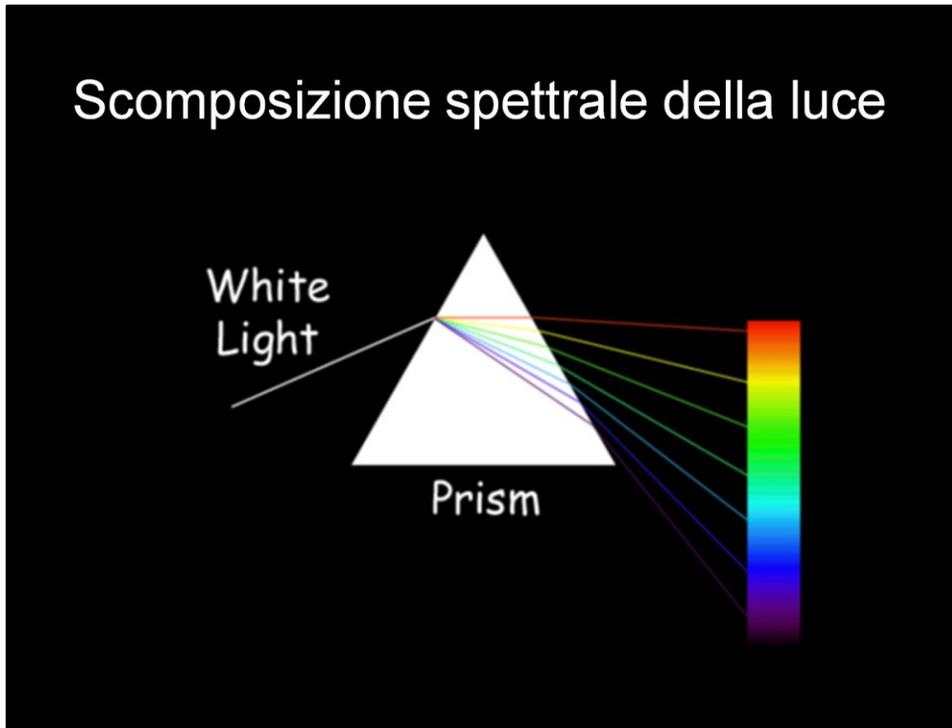


Questo è ciò che succede anche nel caso di pianeti in orbita attorno a una stella, ad esempio per i pianeti del Sistema Solare, tranne che in questo caso il rapporto tra la massa del pianeta e quella della stella è così piccolo che le dimensioni dell'orbita della stella possono in molti casi essere trascurate, e in prima approssimazione si può ritenere che la stella sia “ferma”. Consideriamo ad esempio il caso del sistema formato dal Sole e Giove (il pianeta più grande del nostro Sistema Solare): il semiasse maggiore dell'orbita di Giove è di circa 5 AU e la sua massa pari a circa un millesimo dei quella del Sole. Ciò significa che il semiasse maggiore dell'orbita del Sole causata dall'attrazione di Giove è pari a solo 0.005 AU (cinque millesimi di Unità Astronomica), cioè circa 750 mila chilometri, valore di poco superiore a quello del raggio fisico del Sole (circa 700 mila chilometri): possiamo dire che il Sole è *quasi* immobile.



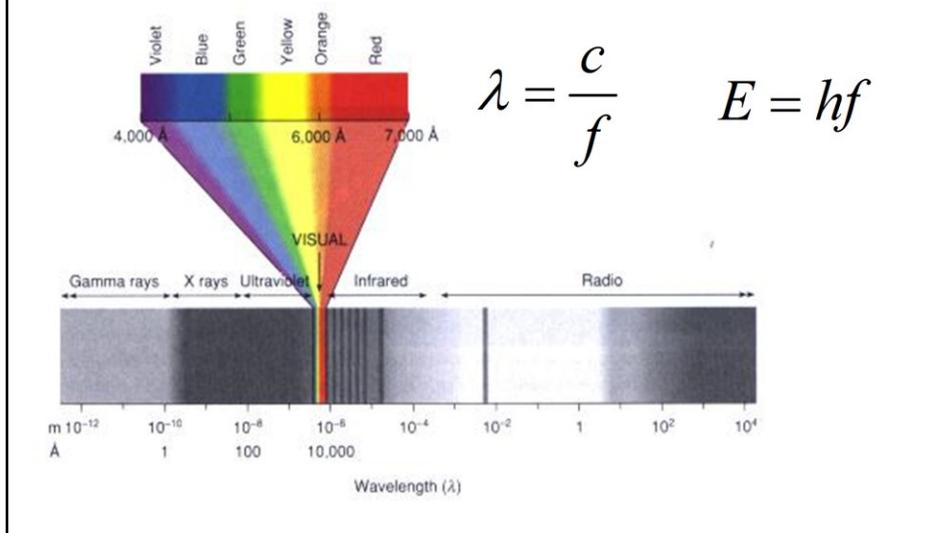
Nel caso di un sistema planetario extrasolare, anche se il pianeta non è visibile direttamente, è possibile cercare di rivelarne l'esistenza evidenziando il piccolo moto orbitale della stella attorno al centro di massa del sistema stella-pianeta. L'esiguità dell'effetto che si cerca di misurare spiega perché la scoperta di pianeti extrasolari richieda metodi di osservazione estremamente raffinati, che sono disponibili solo da pochi anni. In particolare il metodo delle velocità radiali cerca di misurare le variazioni di *velocità* della stella utilizzando l'effetto Doppler. Cerchiamo di capire di cosa si tratta e come funziona.

Scomposizione spettrale della luce

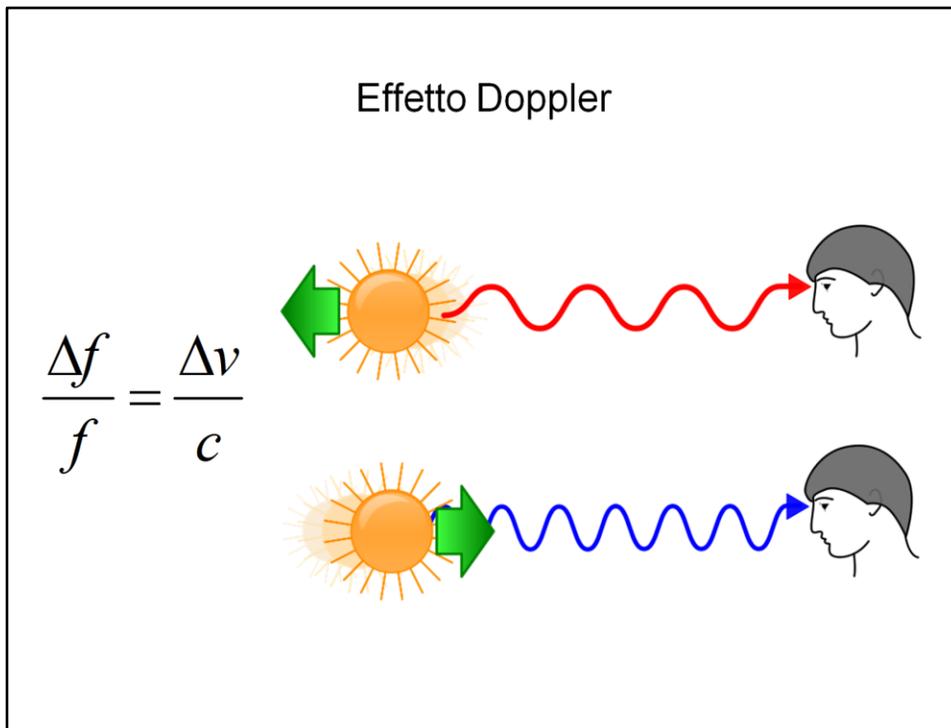


La luce che ci proviene da una stella (ad esempio dal Sole) è formata dalla sovrapposizione di *radiazioni elettromagnetiche* aventi diverse lunghezze d'onda; questa mescolanza può essere evidenziata da un prisma (o da un reticolo di diffrazione) che separa le radiazioni di diversa lunghezza d'onda, che l'occhio percepisce come *luce* avente colori differenti.

La luce come forma di radiazione elettromagnetica

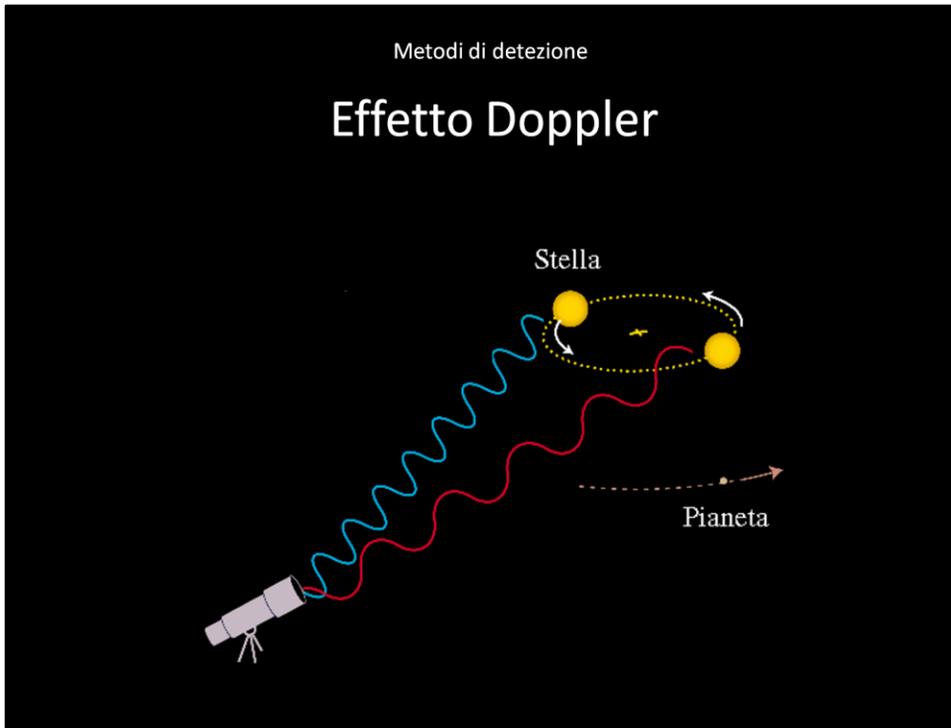


In realtà la radiazione luminosa visibile è solo una piccola parte dello spettro delle radiazioni elettromagnetiche, che si estende dai raggi gamma e X (radiazioni di piccola lunghezza d'onda), la radiazione ultravioletta, la luce visibile, fino alla radiazione infrarossa e le onde radio. La lunghezza d'onda λ di ogni forma di radiazione (in questo caso, la radiazione elettromagnetica) è legata alla sua frequenza f da una relazione di proporzionalità inversa $\lambda=c/f$, dove la costante di proporzionalità c è uguale alla velocità di propagazione della radiazione (in questo caso, la velocità della luce). La radiazione elettromagnetica è trasportata da particelle elementari, i *fotoni*, ciascuno dei quali ha un'energia E proporzionale alla frequenza: $E=hf$, dove h è una costante fisica fondamentale chiamata *costante di Planck*.



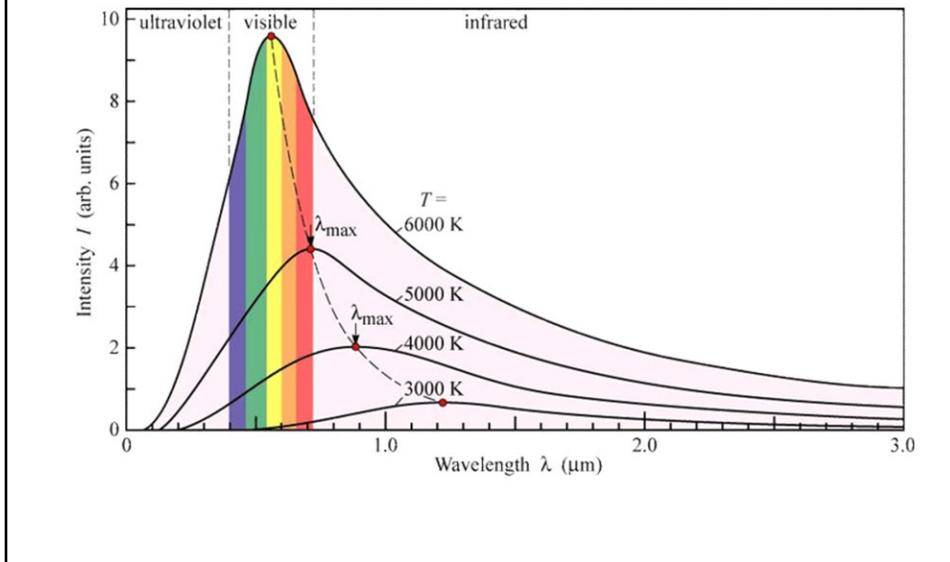
Quando la sorgente della radiazione si muove rispetto all'osservatore, la frequenza della radiazione percepita dall'osservatore differisce da quella emessa, e la differenza Δf tra i due valori di frequenza è proporzionale alla componente *radiale* della velocità relativa sorgente-osservatore Δv : la frequenza appare aumentata quando la sorgente si avvicina all'osservatore, e diminuita quando se ne allontana. Questo effetto, chiamato *effetto Doppler*, si verifica con ogni tipo di radiazione che si propaghi in modo ondulatorio, anche con le onde sonore: è il ben noto fenomeno per cui il suono della sirena di un'ambulanza sembra avere un tono più acuto (frequenza maggiore) quando il mezzo si muove verso di noi rispetto a quando si allontana. Si noti che solo la *componente radiale* (di avvicinamento o allontanamento) della velocità relativa produce effetto Doppler: le componenti della velocità ortogonali alla direzione sorgente-osservatore non producono variazioni di frequenza. Nel caso di luce visibile (bianco-gialla) l'aumento di frequenza dovuto a un avvicinamento della sorgente si trasforma in un cambiamento di colore della luce verso il blu (*blue shift*), mentre un allontanamento produce un arrossamento (*red shift*) della luce.

Effetto Doppler



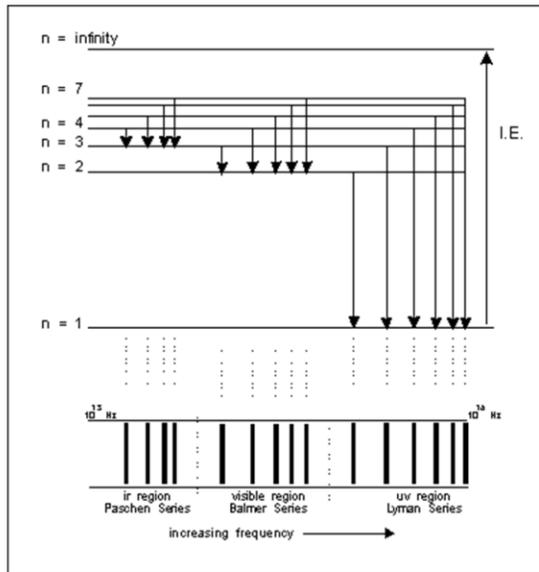
L'idea del metodo delle velocità radiali è quella di utilizzare i cambiamenti nello spettro di una stella per evidenziare, tramite l'effetto Doppler, le variazioni della sua velocità radiale dovute all'attrazione di un eventuale pianeta. Per poter effettuare una misura del genere ho però bisogno di punti di riferimento nello spettro di una stella; in altre parole, come posso identificare una certa regione dello spettro in modo da capire che la sua frequenza è diversa da quella alla quale è stata emessa o, comunque, è cambiata rispetto allo spettro ottenuto a un tempo differente?

Radiazione di corpo nero



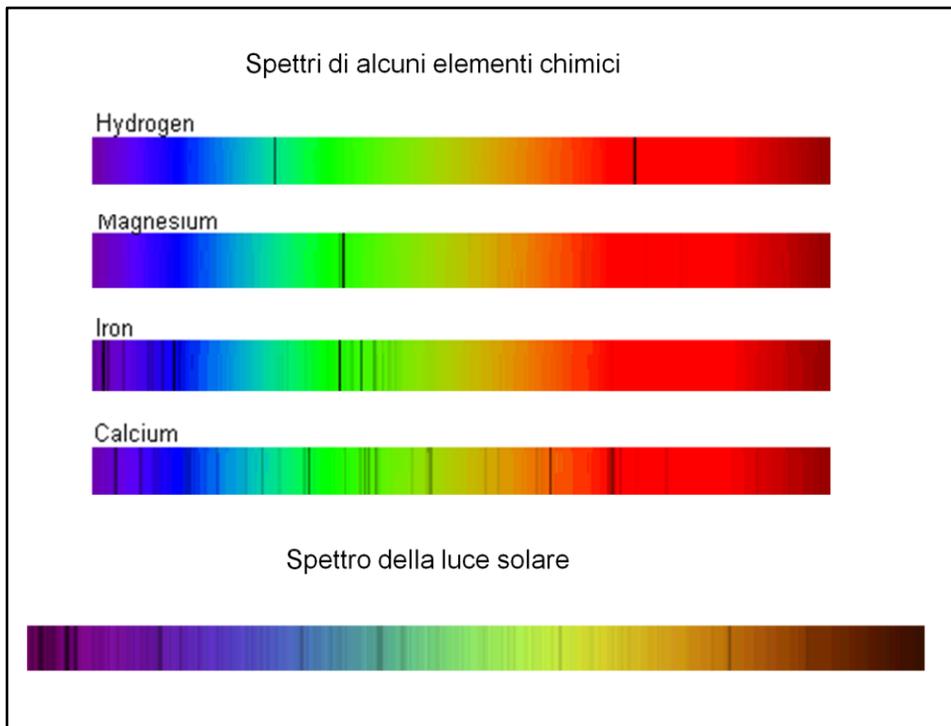
Occorre ricordare a questo punto che una stella emette radiazioni elettromagnetiche principalmente secondo due meccanismi distinti. Il primo di essi è l'*irraggiamento termico*, in cui i fotoni sono generati dalle accelerazioni delle particelle cariche contenute nel gas (principalmente elettroni) a causa del loro moto disordinato per effetto della temperatura. Questo tipo di meccanismo, detto *radiazione di corpo nero*, produce uno *spettro continuo*, cioè una radiazione in cui sono presenti tutte le lunghezze d'onda (all'interno di un certo intervallo). Ciò non significa che tutte le lunghezze d'onda siano presenti nella stessa misura. Lo spettro di corpo nero ha un massimo di intensità in corrispondenza di una regione di lunghezze d'onda che dipende dall'energia cinetica media delle particelle del gas (cioè dalla loro temperatura): questo effetto permette anzi di misurare la temperatura della sorgente luminosa sulla base dello spettro emesso (è in questo modo che gli astronomi conoscono le temperature superficiali delle stelle). Tuttavia questo massimo è molto allargato e non si presta a una determinazione precisa come quella richiesta da una misura di velocità radiale.

Radiazione generata da transizioni atomiche



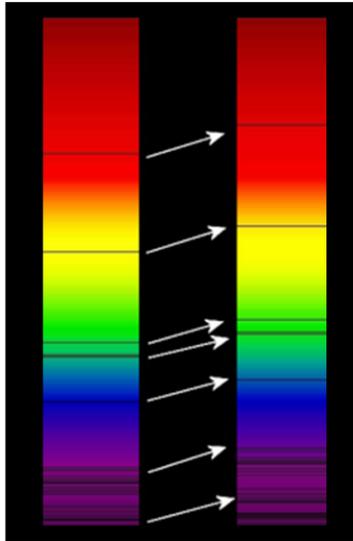
$$\Delta E = hf$$

Il secondo meccanismo di emissione della radiazione elettromagnetica è *l'emissione a righe*, prodotta dalla transizione degli elettroni tra diversi livelli energetici (orbitali) all'interno dell'atomo. Quando un elettrone passa da un livello di energia superiore a uno inferiore, la differenza di energia viene emessa nella forma di un fotone che ha frequenza f corrispondente alla differenza di energia secondo la formula $\Delta E = hf$, dove h è la costante di Planck. Poiché i livelli di energia di un atomo sono ben determinati e sempre uguali (per atomi della stessa specie), la frequenza della radiazione che può essere emessa in questo modo non è qualsiasi ma può corrispondere solo a certi valori determinati: lo spettro ha quindi l'aspetto discreto di uno *spettro a righe*, in cui è presente solo la radiazione avente frequenze corrispondenti alle transizioni atomiche (*spettro di emissione*). Inversamente, quando un fotone avente l'energia corrispondente a una transizione atomica colpisce un elettrone, può esserne assorbito, provocando il passaggio dell'elettrone a un livello energetico superiore. Quando ad esempio una radiazione di corpo nero attraversa uno strato di gas, parte dei fotoni aventi frequenze corrispondenti alle transizioni atomiche vengono assorbiti e lo spettro appare come uno spettro quasi continuo, mancante delle sole componenti corrispondenti alle righe atomiche (*spettro di assorbimento*). In generale lo spettro emesso da una stella appare quindi come uno spettro continuo (di corpo nero) a cui sono sovrapposte righe sia di emissione che di assorbimento.



I livelli di energia degli elettroni sono differenti per ogni specie atomica e quindi ogni elemento chimico produce uno spettro a righe (sia in emissione che in assorbimento) che gli è caratteristico. Gli spettroscopisti sono allenati a riconoscere queste configurazioni tipiche di righe, anche quando si trovano mescolate insieme nello spettro di una sorgente avente una composizione chimica complessa. La spettroscopia permette quindi di effettuare un'analisi chimica a distanza della sorgente luminosa, ed è questo l'interesse maggiore che questo metodo osservativo presenta in astrofisica.

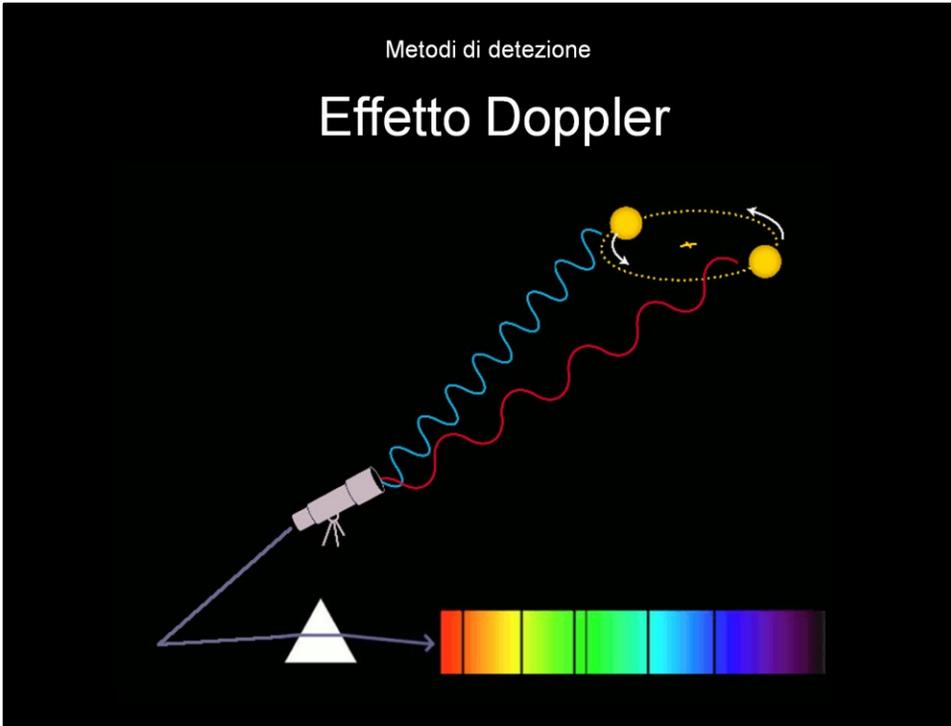
Effetto Doppler (spostamento delle righe spettrali)



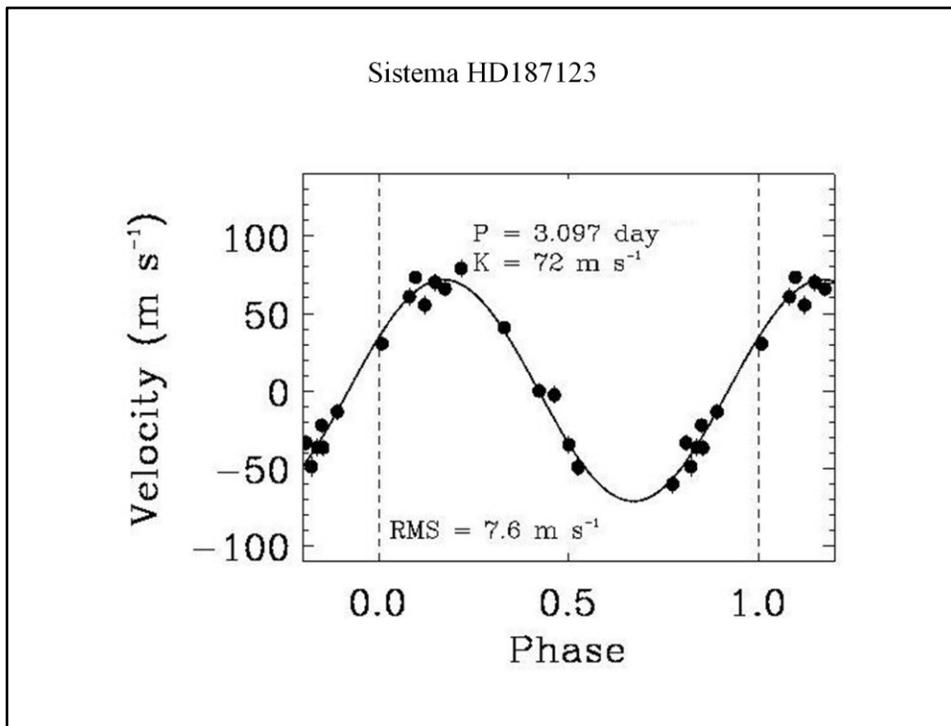
$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta v}{c}$$

Nello stesso tempo, poiché le righe spettrali costituiscono un riferimento molto preciso all'interno dello spettro di una sorgente, cioè identificano in modo esatto una frequenza, esse sono utilissime nella misurazione della velocità radiale della sorgente tramite l'effetto Doppler. Misurando la frequenza di una riga in tempi successivi è possibile evidenziare variazioni nella velocità radiale; addirittura, confrontando la frequenza della riga con quella ottenuta in laboratorio (da una sorgente in quiete rispetto all'osservatore) è possibile determinare il valore assoluto della velocità stessa.

Effetto Doppler



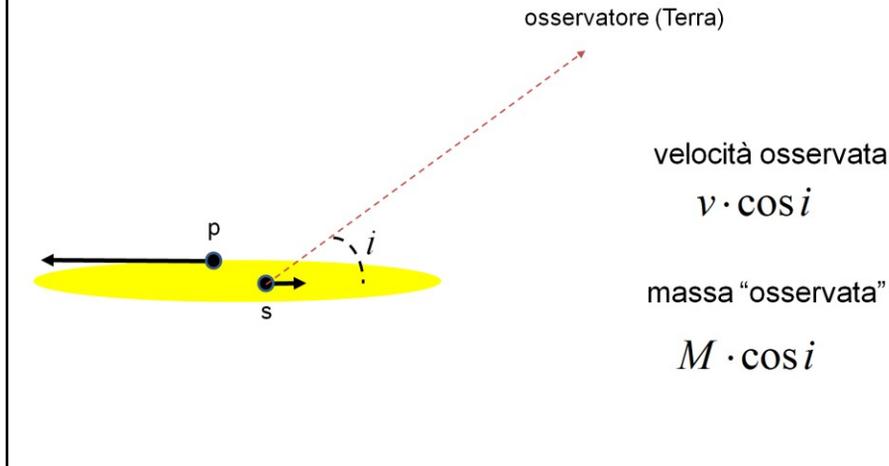
In definitiva, il metodo spettroscopico per la rivelazione di pianeti extrasolari consiste nel misurare in istanti di tempo successivi la frequenza apparente di una o più righe spettrali. Se la frequenza delle righe varia nel tempo, questa variazione viene interpretata come una variazione della componente radiale della velocità relativa stella-osservatore. Un'analisi della forma di questa variazione in funzione del tempo permette poi di capire se la variazione di velocità è spiegabile come conseguenza del moto orbitale della stella, e quindi a inferire l'esistenza di un oggetto (pianeta) che sia la causa di tale moto, e a determinarne alcune caratteristiche.



Il risultato di una serie di osservazioni di questo tipo è quindi una *curva di velocità radiale*, cioè un grafico che riporta la variazione del valore della velocità radiale in funzione del tempo. Se questo grafico è periodico, il suo periodo coincide con il periodo orbitale della stella, e la sua ampiezza fornisce il valore massimo della sua velocità nel corso dell'orbita. Usando la terza legge di Keplero, dal periodo orbitale del pianeta si può calcolare il semiasse maggiore della sua orbita e la sua velocità orbitale. Questo calcolo richiede di conoscere la massa della stella, ma questa è nota con buona approssimazione dalle sue caratteristiche spettroscopiche (come abbiamo visto, la massa determina la temperatura superficiale della stella, e questa è misurabile dallo spettro). Il rapporto tra le velocità orbitali della stella (misurata) e del pianeta (calcolata nel modo sopra spiegato) è uguale al rapporto tra le masse dei due corpi ($v_s/v_p = M_p/M_s$), e quindi dalla massa della stella è possibile calcolare quella del pianeta.

a parte un piccolo problema ...

... non si conosce l'orientazione dell'orbita



La catena di deduzioni sopra descritta in realtà nasconde un piccolo problema tecnico, perché assume che la velocità misurata con l'effetto Doppler sia la velocità orbitale v della stella, mentre invece è uguale solo alla sua *componente radiale* v_r , cioè alla proiezione della velocità orbitale lungo la linea di vista stella-osservatore; tra le due quantità esiste la relazione $v_r = v \cos i$, dove i è l'inclinazione della linea di vista sul piano dell'orbita della stella, la cui orientazione è ignota. La "massa" del pianeta determinata con il metodo spettroscopico è più precisamente il prodotto $M \cos i$, dove il valore di i è sconosciuto, e quindi è in realtà un *limite inferiore* alla vera massa del pianeta.

Effetto Doppler: aspetti quantitativi

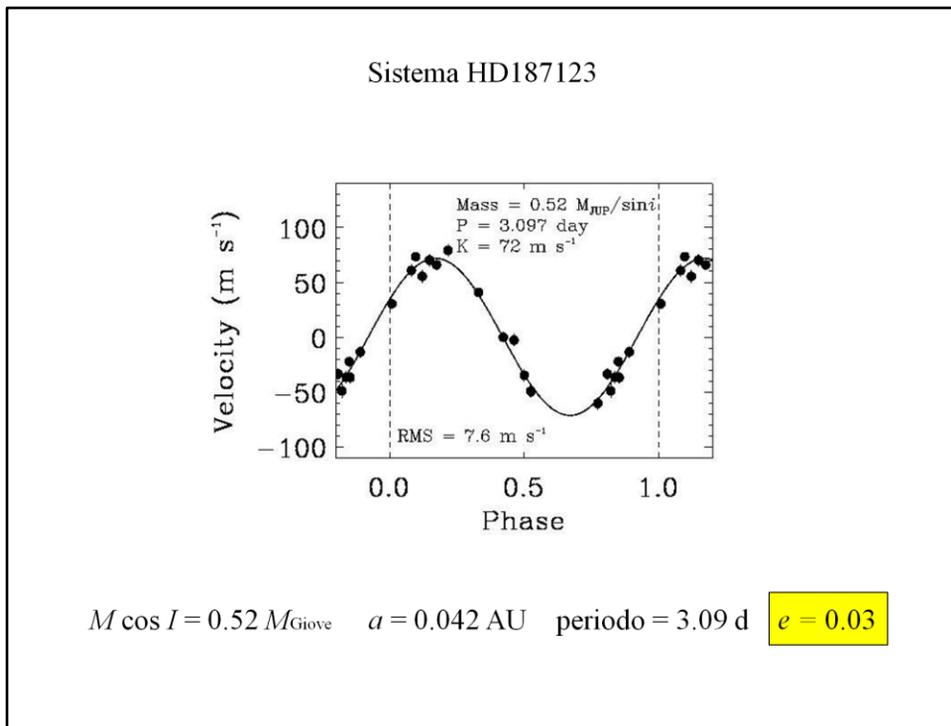
La variazione di velocità radiale della stella:

- 1) è proporzionale alla massa del pianeta;
- 2) è maggiore per pianeti vicini alla stella (terza legge di Keplero)
- 3) non dipende dalla distanza della stella da noi (ma ...)
- 4) dipende dall'inclinazione dell'orbita rispetto alla linea di vista

Elenchiamo ora alcuni aspetti *quantitativi* del metodo spettroscopico, cioè studiamo in che modo la quantità misurata (la velocità radiale) dipende dai parametri fisici del sistema, soprattutto allo scopo di capire quali sono i sistemi planetari più facilmente individuabili con questo metodo. Questi aspetti si traducono in *effetti di selezione* osservativi: il catalogo dei pianeti extrasolari conterrà cioè un maggior numero di oggetti che hanno caratteristiche tali da poter essere rivelati con più facilità. La velocità radiale della stella

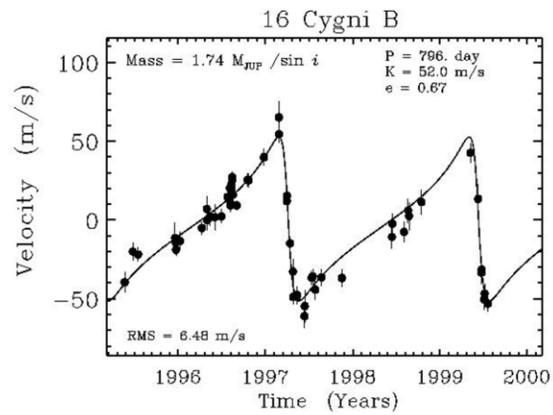
1. è tanto maggiore quanto *maggiore* è la massa del pianeta (effetto di selezione che favorisce la scoperta dei pianeti più grandi);
2. è tanto maggiore quanto *minore* è il raggio orbitale del pianeta; infatti per la terza legge di Keplero la velocità orbitale diminuisce al crescere della distanza del pianeta dalla stella (effetto di selezione a favore delle orbite di raggio più piccolo e di periodo orbitale più breve);
3. non dipende direttamente dalla distanza del sistema dalla Terra; tuttavia all'aumentare della distanza diminuisce la quantità di luce che riceviamo dalla stella e, di conseguenza, la precisione delle misure spettroscopiche, e ciò introduce un effetto di selezione (seppur indiretto) a favore dei sistemi più vicini a noi;
4. è tanto maggiore quanto più l'orbita è vista di taglio (effetto di selezione sull'inclinazione dell'orbita del pianeta).

Da un certo punto di vista, si può considerare lo sforzo per il miglioramento della precisione e della sensibilità delle tecniche osservative come una “corsa” verso pianeti di massa sempre più piccola e non troppo vicini alla stella, condizioni che tra l'altro rendono il pianeta più compatibile con la possibilità di ospitare forme di vita.



Oltre a una misura del periodo orbitale, del semiasse maggiore e della massa del pianeta, il metodo spettroscopico fornisce anche informazioni sulla forma dell'orbita, e precisamente sulla sua *eccentricità*. Ricordiamo che l'*eccentricità* orbitale è una misura dell'allungamento dell'orbita: vale 0 (zero) per un'orbita perfettamente circolare ed è via via maggiore per orbite sempre più allungate, fino a raggiungere il valore limite di 1 (uno) per orbite così allungate da diventare simili a segmenti (allungamento massimo: la dimensione "trasversale" è trascurabile rispetto a quella "longitudinale"). Una curva di velocità radiale dall'aspetto sinusoidale è caratteristica di un'orbita quasi circolare; com'è noto, la proiezione laterale di un moto circolare uniforme produce un *moto armonico*, cioè un moto in cui la variazione della posizione in funzione del tempo è descritta da una funzione sinusoidale (seno o coseno). (L'orbita del sistema la cui curva di velocità radiale è riportata in figura ha un valore di eccentricità pari a 0.03, quindi molto prossimo a zero).

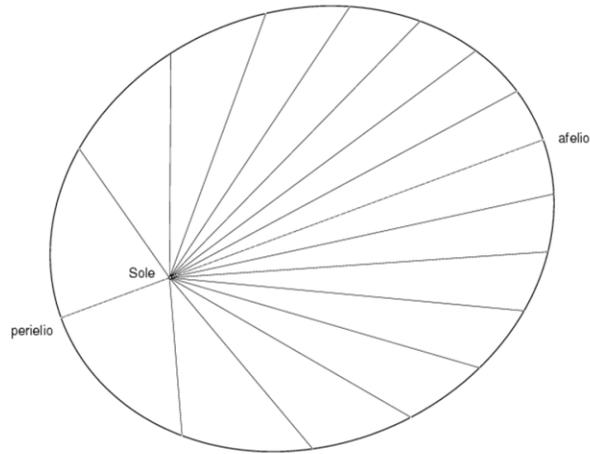
Sistema 16 Cyg B



$$M \cos I = 1.5 M_{\text{Giove}} \quad a = 1.72 \text{ AU} \quad \text{periodo} = 804 \text{ d} \quad e = 0.63$$

Se invece l'orbita ha eccentricità elevata (è un'ellisse molto allungata), la forma della curva di velocità radiale risulta asimmetrica (la figura illustra il caso di un pianeta che ha eccentricità orbitale pari a 0.63).

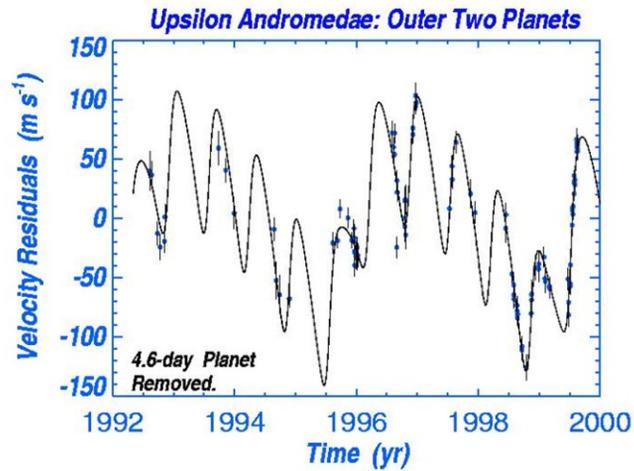
Seconda legge di Keplero



(velocità *areolare* costante → velocità *lineare* maggiore al periastro)

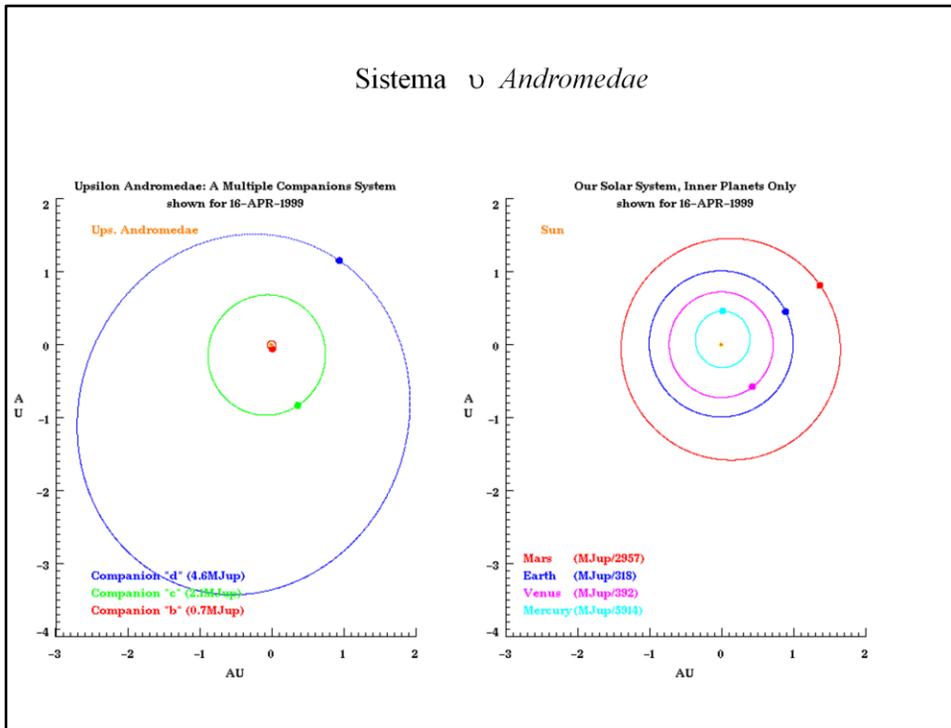
Infatti per la seconda legge di Keplero un pianeta si muove lungo la propria orbita in modo che il *raggio vettore* (il segmento stella-pianeta) spazza aree uguali in tempi uguali, cioè in modo da mantenere costante non la velocità angolare, ma la *velocità areolare*, che è il prodotto della velocità angolare per la distanza dalla stella. Ciò significa che la velocità angolare del pianeta è tanto maggiore quanto più esso è vicino alla stella. È proprio questa non uniformità nella velocità angolare che provoca la deformazione della curva di velocità radiale rispetto a una sinusoide; dall'entità di questa deformazione si può risalire al valore dell'eccentricità orbitale (attraverso una serie di calcoli che non è possibile descrivere in questa sede).

Sistema υ Andromedae

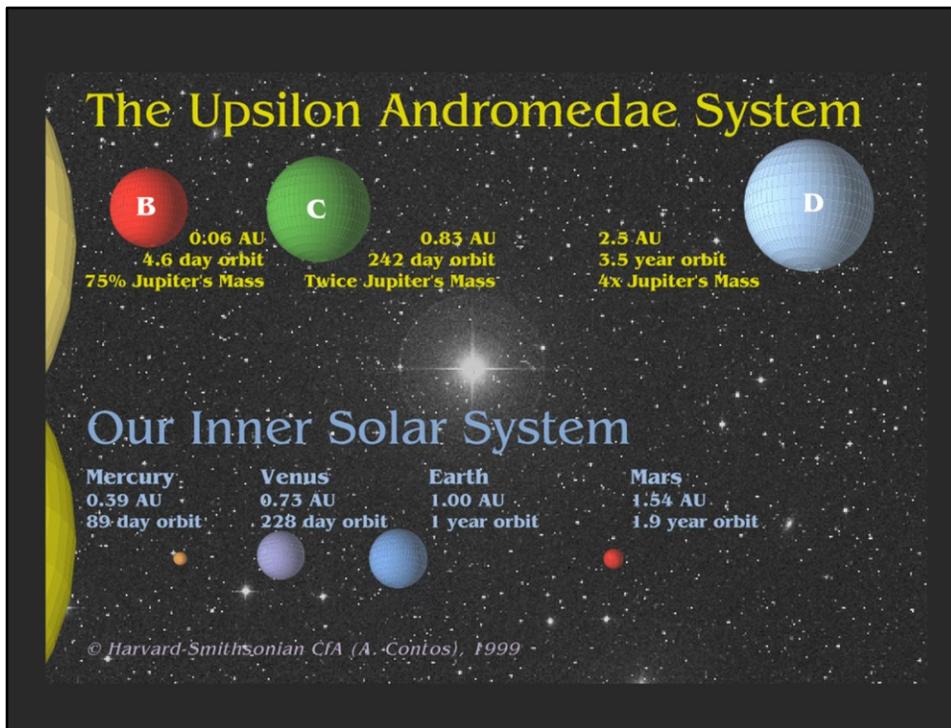


Se il sistema planetario è formato da più pianeti aventi periodi orbitali differenti, la velocità della stella sarà composta dalla somma delle velocità prodotte dai singoli pianeti; la curva di velocità radiale avrà quindi una forma complicata in cui però, utilizzando opportune tecniche matematiche (analisi di Fourier), è possibile separare le componenti periodiche dovute ai singoli pianeti, e procedere poi alla determinazione delle caratteristiche orbitali e della massa per ciascuno di essi.

Sistema υ *Andromedae*



In questo modo sono stati scoperti parecchi sistemi multipli, come il sistema di tre pianeti attorno alla stella υ (ypsilon) *Andromedae*, le cui orbite sono rappresentate nella figura (a sinistra). Nella parte destra sono riportate per confronto (e alla stessa scala) le orbite dei pianeti interni del nostro Sistema Solare.



I pianeti del sistema di υ *Andromedae*, di cui in figura sono mostrate in modo schematico (non in scala) le dimensioni e le distanze dalla stella centrale, presentano una caratteristica che, come vedremo nel seguito, è tipica di molti sistemi extrasolari, di comprendere cioè pianeti giganti (di massa paragonabile a quella di Giove) su orbite di dimensioni molto ridotte, anche più piccole dell'orbita di Mercurio (il pianeta del Sistema Solare più vicino al Sole).

Cosa è possibile determinare con il metodo spettroscopico?

Grandezza	Determinabile?
Periodo orbitale	sì
Semiasse maggiore	sì
Diametro	no
Forma dell'orbita (eccentricità)	sì
Orientazione dell'orbita (inclinazione)	no
Massa	sì (*)

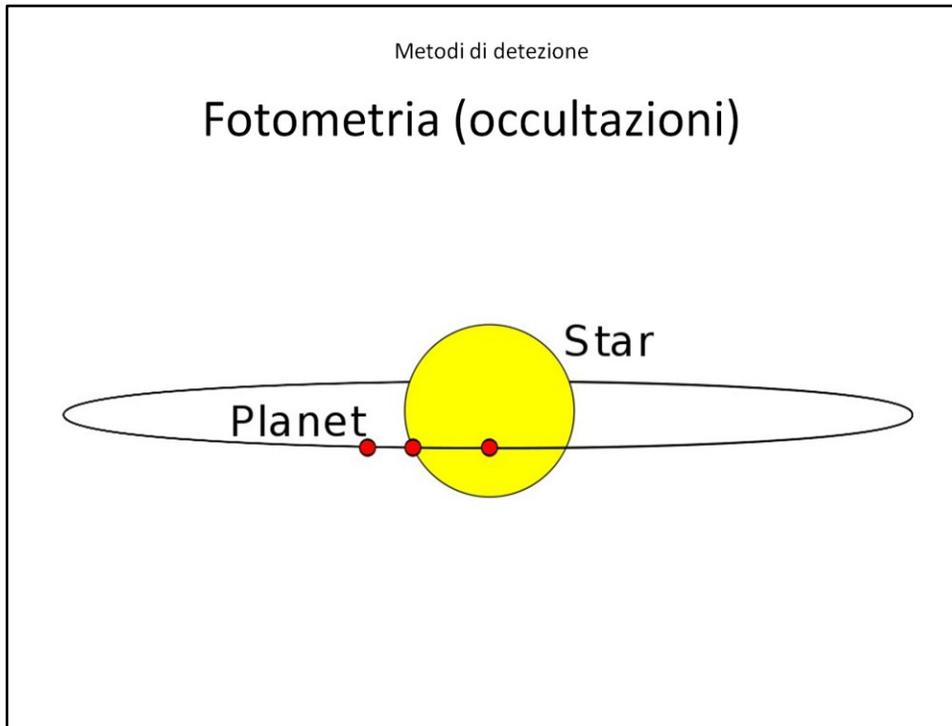
La tabella riassume le caratteristiche di un pianeta extrasolare che possono essere determinate con il metodo spettroscopico (delle velocità radiali). L'asterisco a fianco del *sì* alla determinazione della massa vuole ricordare che il valore di massa ottenibile è solo un limite inferiore al valore reale, a causa dell'indeterminazione dell'orientazione del piano orbitale.

Metodi di detezione

Metodo fotometrico (occultazioni)

Un altro metodo molto importante per la scoperta di pianeti extrasolari e la determinazione delle loro caratteristiche è il metodo fotometrico, che si basa su misure di precisione della luminosità della stella.

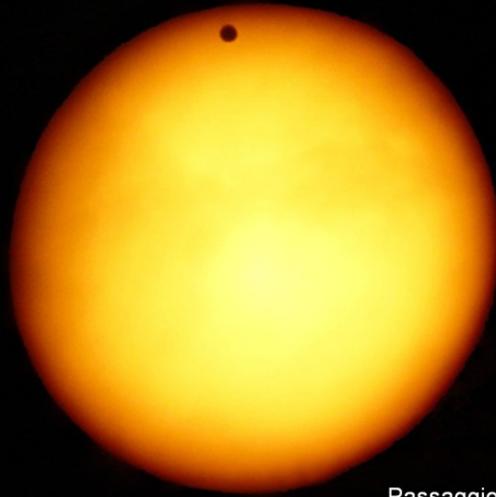
Fotometria (occultazioni)



Il metodo fotometrico si può applicare solo a quei sistemi che, a causa dell'orientazione dell'orbita, a noi capita di osservare quasi "di taglio", cioè lungo la direzione del piano orbitale, in modo che il pianeta passi periodicamente davanti al disco della stella, occultandola parzialmente.

Metodi di detezione

Fotometria (occultazioni)

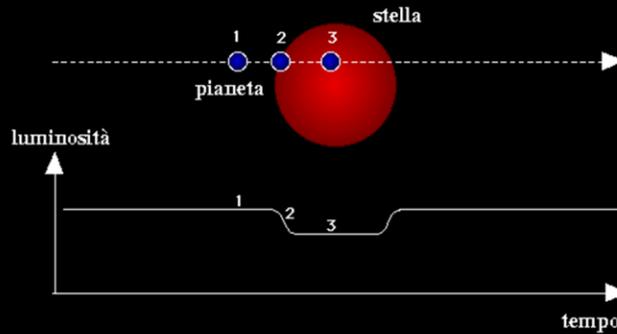


Passaggio di Venere sul Sole

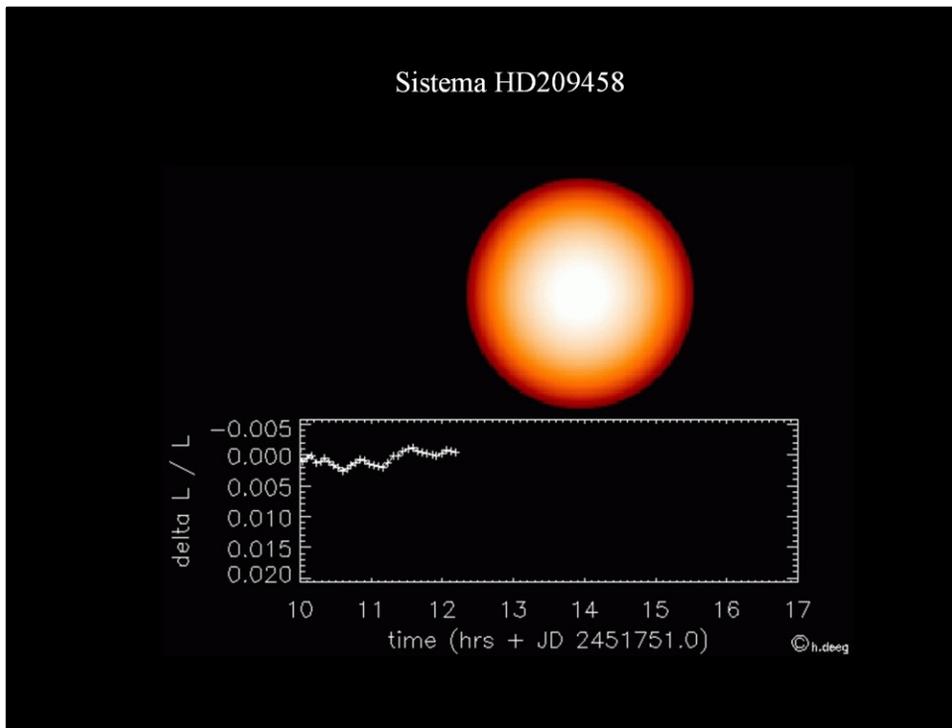
Nel Sistema Solare si può assistere direttamente ai transiti periodici dei pianeti inferiori (Mercurio e Venere) sul disco del Sole. L'immagine mostra una fotografia del Sole ripresa durante un transito di Venere (visibile come una macchia circolare scura in alto).

Si noti come in questa immagine la luminosità della superficie solare non è uniforme, ma appare minore alla periferia rispetto al centro del disco. Questo effetto (chiamato *oscuramento al bordo*) è dovuto al fatto che, quando osserviamo il bordo del Sole, la luce ci giunge attraverso l'atmosfera solare in senso tangenziale, e quindi ciò che vediamo è uno strato più superficiale (e quindi più freddo e meno luminoso) della fotosfera.

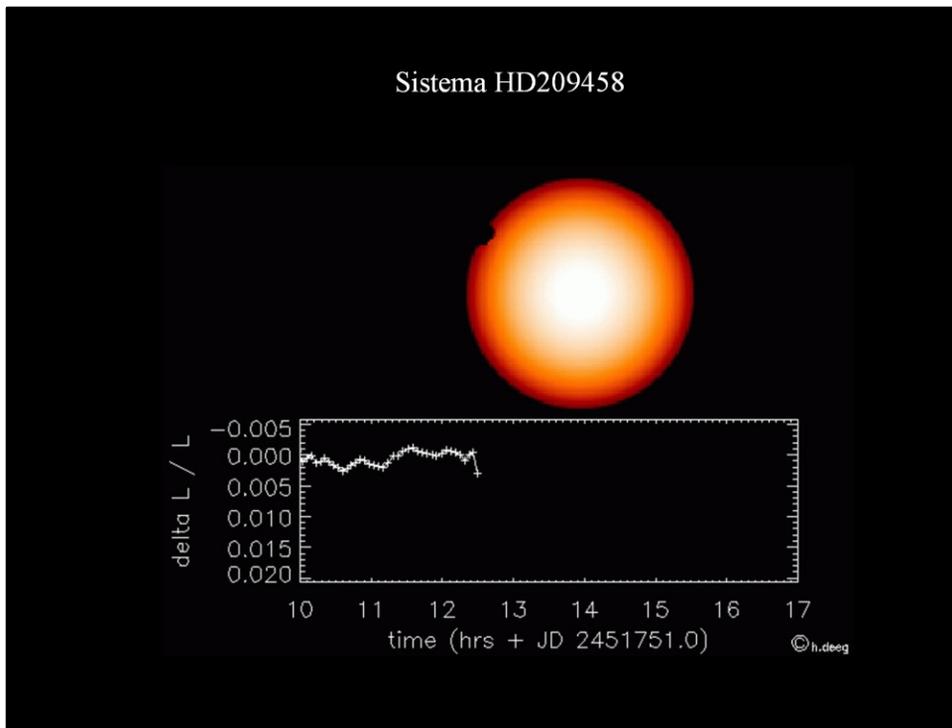
Fotometria (occultazioni)



Nel caso di stelle diverse dal nostro Sole è impossibile osservare direttamente eventuali transiti di pianeti sul disco della stella. Alla distanza da cui noi osserviamo il sistema la stella ha un aspetto del tutto puntiforme e non è possibile apprezzare l'estensione del suo disco, e tantomeno distinguere su di esso la sagoma scura del pianeta. Tuttavia l'eclissi provoca una piccola diminuzione della luminosità della stella, corrispondente alla frazione di luce che viene intercettata dal disco del pianeta, che può essere rivelata attraverso misure di precisione della luminosità della stella, ripetute nel tempo.

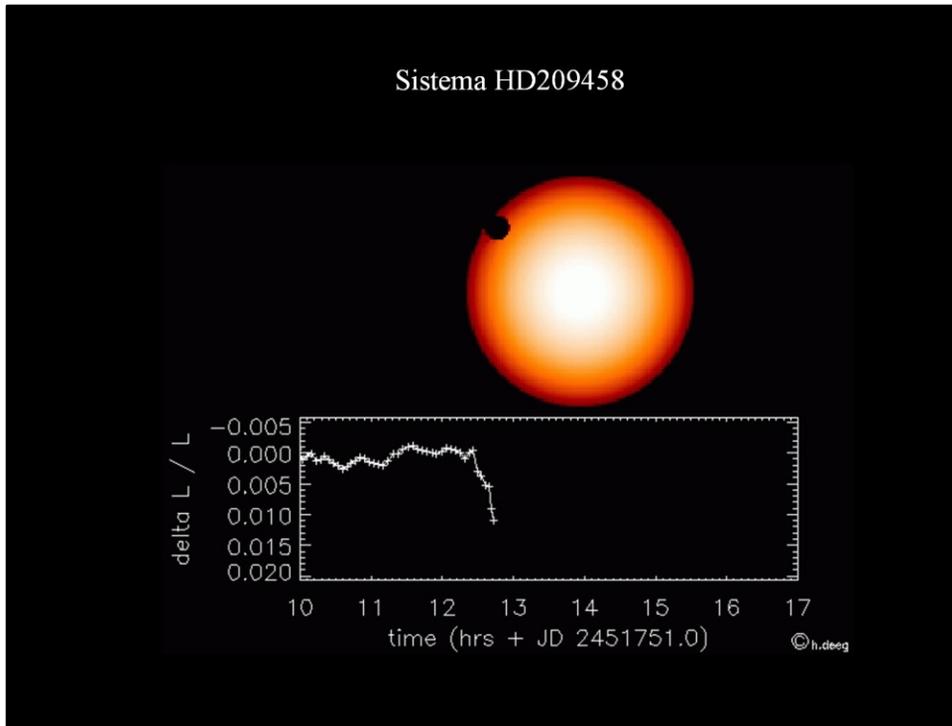


Possiamo descrivere nel modo seguente ciò che succede nel corso di un'eclissi. Si noti che in questa figura e nelle successive la curva di luce (cioè il grafico della variazione di luminosità della stella) riportata nella parte bassa delle immagini è l'unico dato accessibile all'osservazione diretta; l'immagine della stella nella parte alta delle figure è un'interpretazione delle osservazioni, la rappresentazione schematica di ciò che avviene in realtà e che, a causa della distanza, non è osservabile direttamente. Quando il pianeta non occultava la stella, la luce che riceviamo ha un'intensità costante, che presenta solo piccole fluttuazioni dovute agli errori strumentali e a effetti atmosferici.



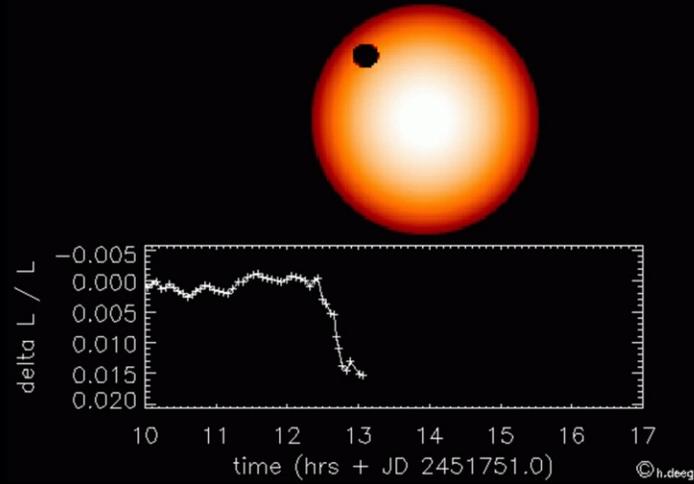
Appena il disco del pianeta inizia a coprire la stella, l'intensità luminosa inizia a diminuire. Tecnicamente questo istante è chiamato *primo contatto* dell'eclissi: il disco del pianeta è tangente *esternamente* al disco della stella.

Sistema HD209458



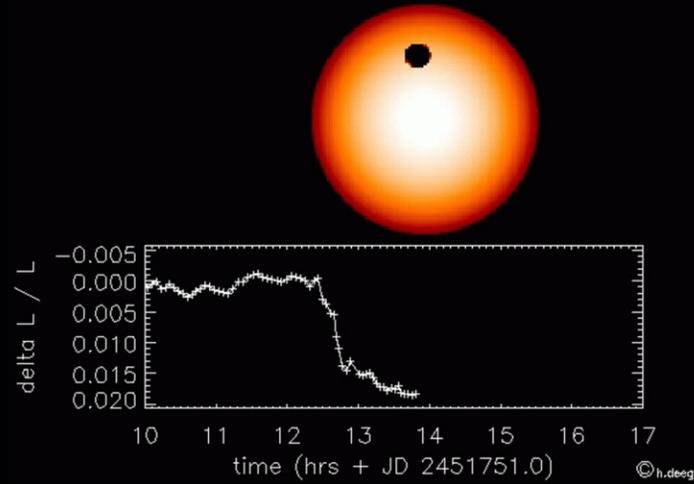
La diminuzione di luminosità della stella continua fino a quando il disco del pianeta non arriva a essere completamente interno al disco stellare (*secondo contatto*: il disco del pianeta è tangente *internamente* al disco della stella). Si noti che la durata della prima fase di discesa della curva di luce (l'intervallo di tempo tra il primo e il secondo contatto) dipende dal diametro apparente del disco del pianeta e può essere usato per calcolarne il diametro reale, se si conoscono alcune informazioni accessorie (velocità angolare del pianeta e distanza della stella dalla Terra).

Sistema HD209458



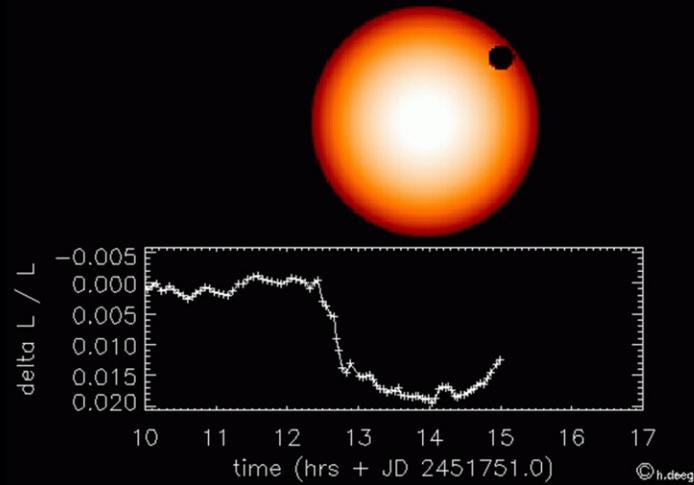
Dopo il secondo contatto, e per tutto il tempo in cui il disco del pianeta è interno al disco della stella, la luminosità osservata rimane quasi costante (*fase di minimo*).

Sistema HD209458



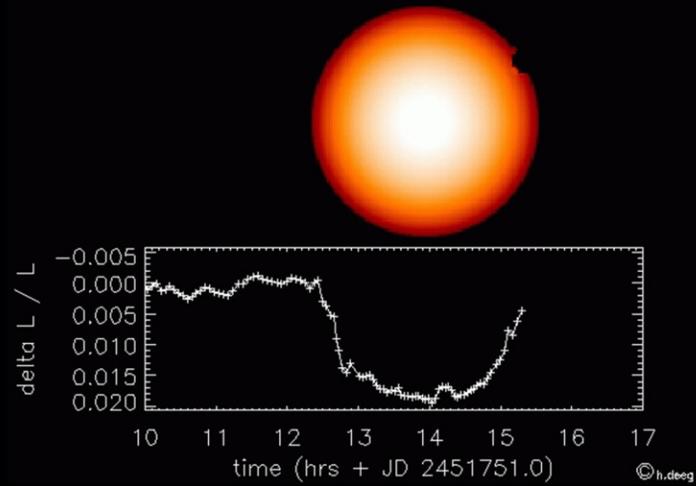
In realtà anche nel corso della fase di minimo c'è una piccola variazione di luminosità dovuta al fatto che il disco stellare non ha luminosità costante per effetto dell'oscuramento al bordo.

Sistema HD209458



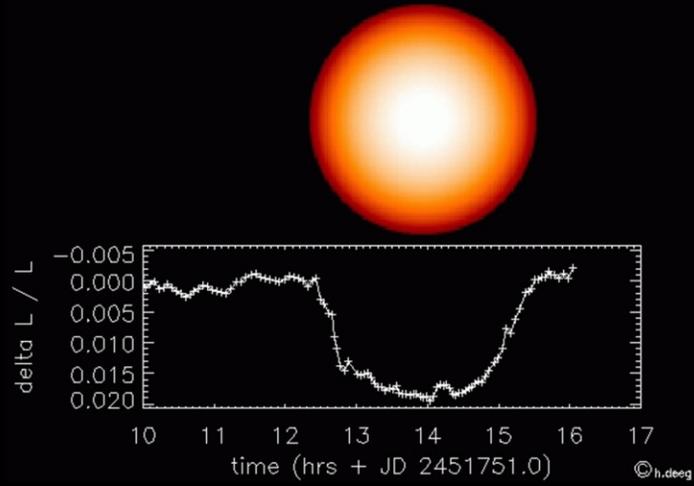
Quando il pianeta raggiunge il bordo del disco della stella dalla parte opposta da cui è entrato, la fase di minimo finisce e la luminosità inizia nuovamente a crescere (*terzo contatto*: il disco del pianeta è tangente internamente al disco della stella).

Sistema HD209458



Infine il disco del pianeta esce completamente dal disco stellare e l'eclissi ha termine (*quarto contatto*: il disco del pianeta è tangente esternamente al disco della stella).

Sistema HD209458



La luminosità della stella ritorna al valore che aveva prima dell'eclissi.

Fotometria: aspetti quantitativi

La variazione di luminosità della stella:

- 1) dipende dal diametro del pianeta (non dalla massa)
- 2) non dipende dalla distanza del pianeta dalla stella
- 3) non dipende dalla distanza della stella da noi (ma ...)
- 4) suggerisce l'inclinazione dell'orbita

Gli aspetti quantitativi del metodo fotometrico sono alquanto differenti da quelli che abbiamo visto per il metodo spettroscopico:

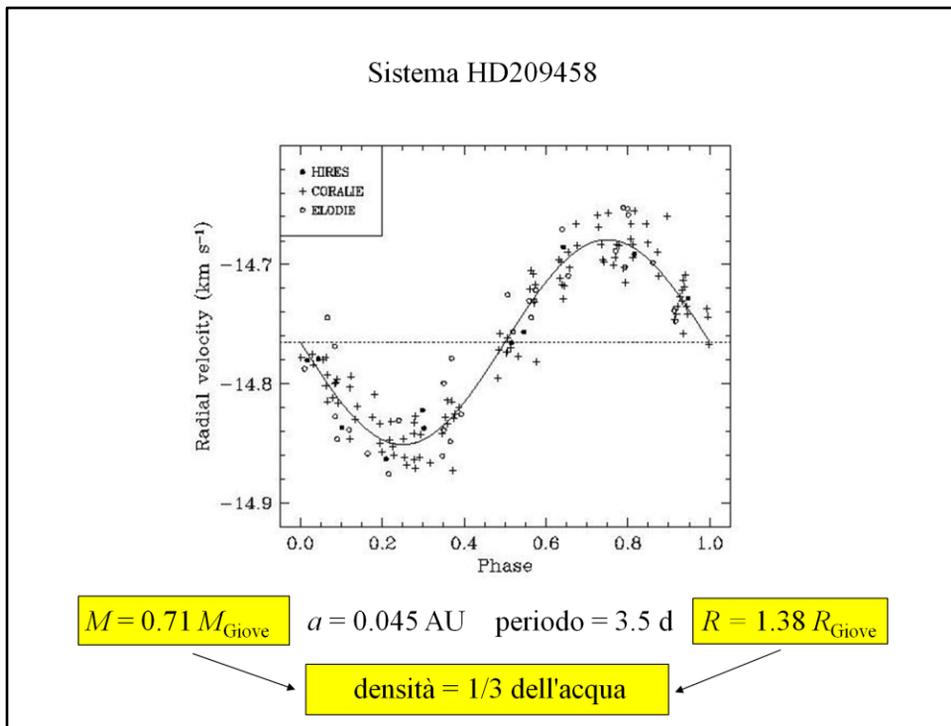
1. il metodo è sensibile al diametro angolare del pianeta ma non alla sua massa (le due quantità sono ovviamente legate dalla densità media, che però può variare in modo significativo da un pianeta a un altro);
2. il metodo misura il periodo orbitale del pianeta (l'intervallo di tempo che passa tra due eclissi successive) ma non la sua distanza dalla stella (da qui segue l'impossibilità a determinare la massa);
3. anche in questo caso l'ampiezza della curva di luce non dipende dalla distanza tra il sistema extrasolare e la Terra, ma al crescere della distanza la quantità totale di luce che riceviamo dalla stella si riduce, e quindi la precisione nella misura fotometrica diminuisce;
4. il metodo (quando è applicabile) ci dice anche che stiamo vedendo l'orbita quasi "di taglio" ($\cos i \cong 1$), altrimenti non si verificherebbe alcuna eclissi.

Anche il metodo fotometrico è soggetto a effetti di selezione che sono simili, anche se non del tutto uguali, a quelli del metodo spettroscopico. Anche in questo caso è favorita la scoperta di pianeti "grandi" (in diametro), che producono una maggior variazione nella luminosità della stella, e pianeti dal periodo orbitale breve e quindi, per la terza legge di Keplero, dal semiasse maggiore piccolo, che producono eclissi più frequenti e più facili da osservare. Ad esempio, un pianeta che avesse un periodo orbitale di 50 anni produrrebbe un'eclissi ogni 50 anni, e quindi la probabilità di osservarlo nel corso di una campagna osservativa della durata di 5 anni sarebbe solo del 10%.

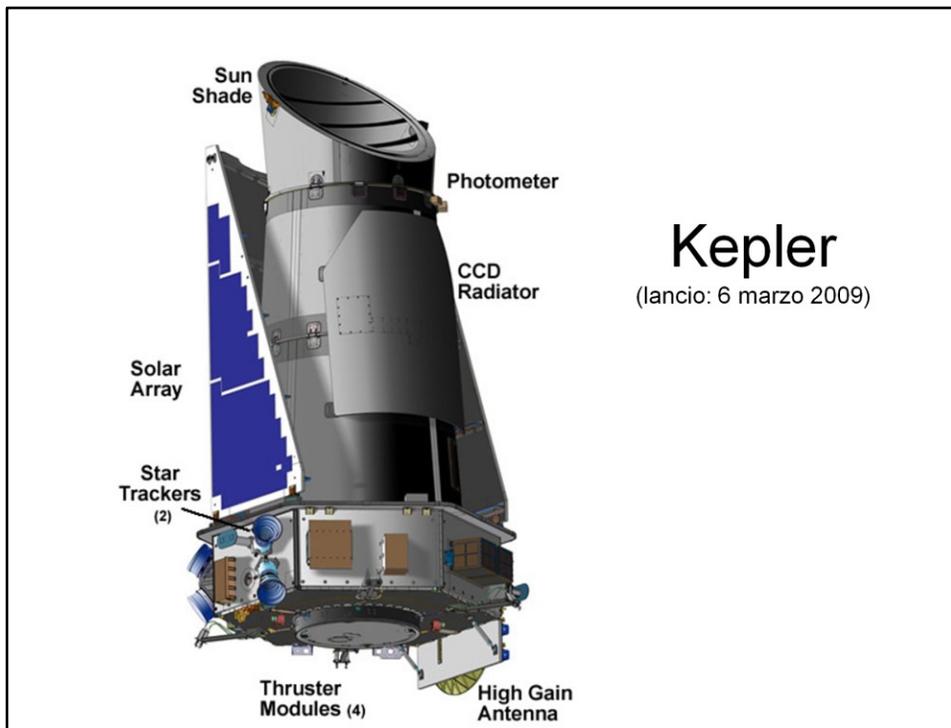
Cosa è possibile determinare con il metodo fotometrico?

Grandezza	Determinabile?	
	Spettroscopia	Fotometria
Periodo orbitale	sì	sì
Semiasse maggiore	sì	sì
Diametro	no	sì
Forma dell'orbita (eccentricità)	sì	no
Orientazione dell'orbita (inclinazione)	no	sì
Massa	sì (*)	no

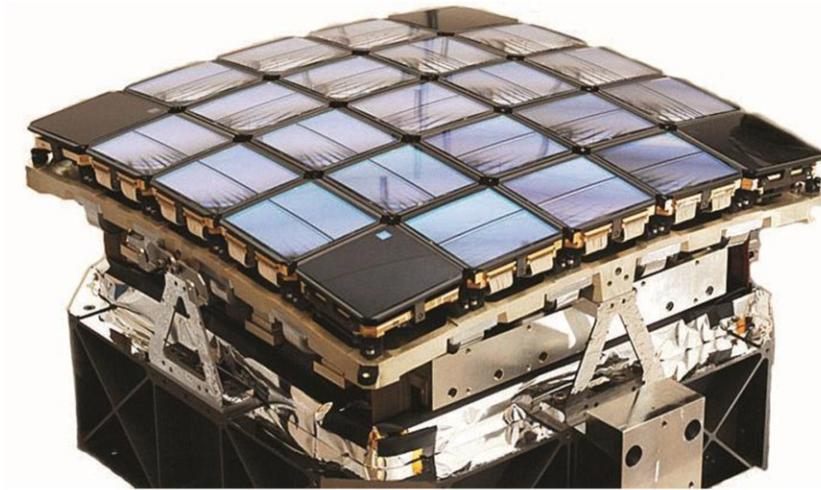
I metodi spettroscopico e fotometrico sono capaci di misurare grandezze fisiche diverse del pianeta extrasolare e quindi risultano in qualche modo complementari.



Il caso migliore è quello in cui un sistema risulta osservabile con entrambi i metodi (spettroscopico e fotometrico). In tal caso il metodo fotometrico fornisce non solo il raggio del pianeta ma anche l'inclinazione dell'orbita, che permette di eliminare l'incertezza nel valore della massa fornita dal metodo spettroscopico. Raggio e massa permettono di calcolare la densità del pianeta, che fornisce importanti informazioni sulla sua composizione (permette ad esempio di distinguere agevolmente un pianeta di tipo terrestre da uno di tipo gigante/gassoso).

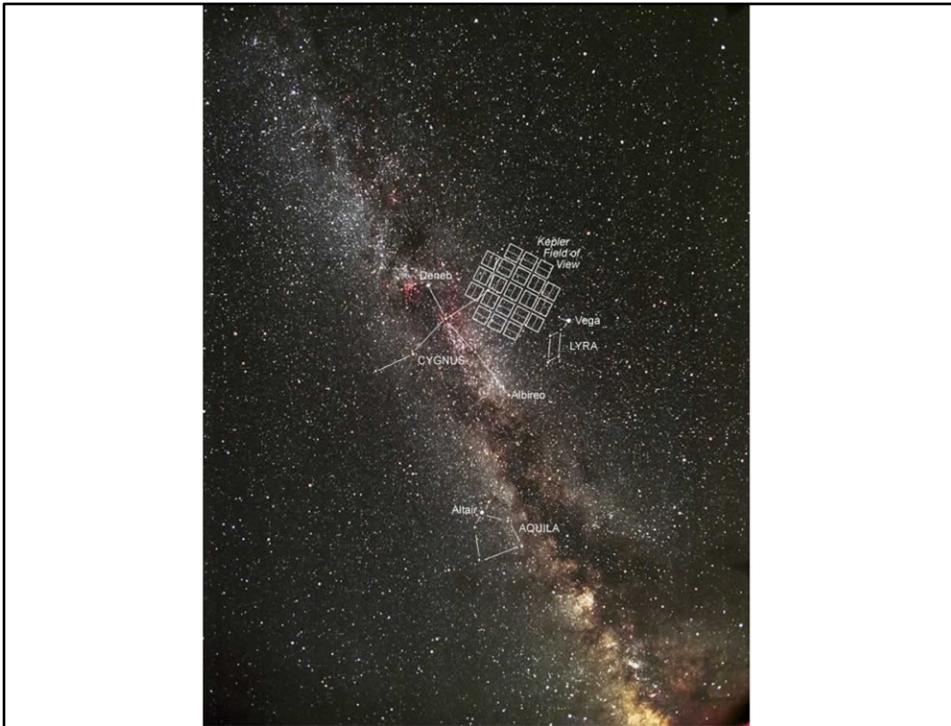


La precisione raggiungibile con qualsiasi metodo osservativo è limitata dai disturbi introdotti dall'atmosfera terrestre; perciò gli astronomi hanno ideato diverse missioni spaziali per poter effettuare la ricerca dei pianeti extrasolari al di fuori dell'atmosfera. Forse la più interessante tra queste è *Kepler*, una sonda lanciata dalla NASA nel 2009.

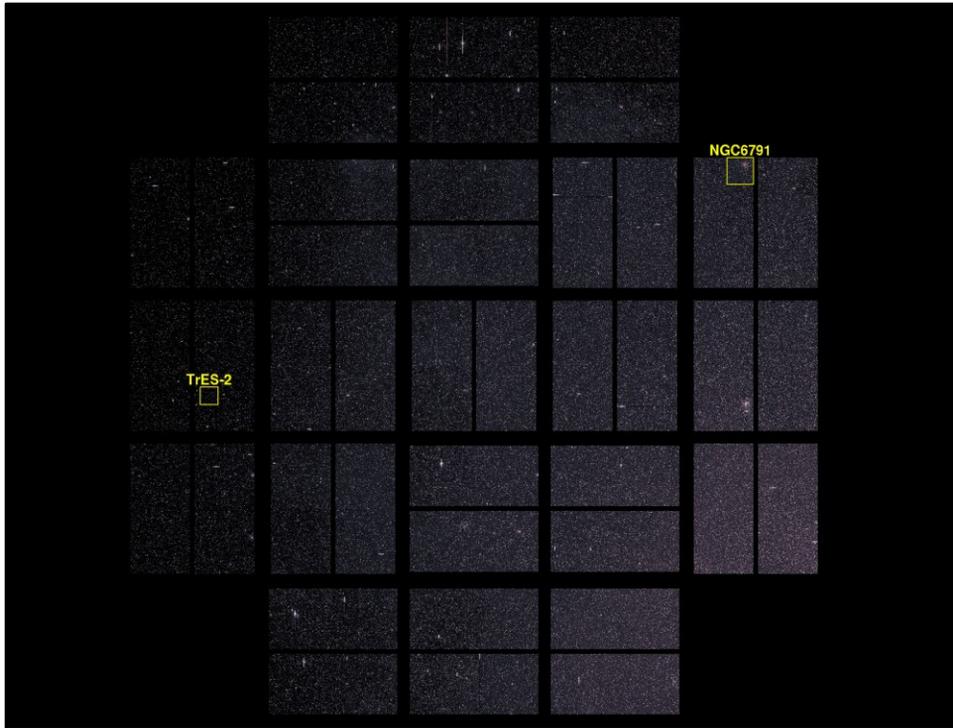


Matrice di 42 CCD di 2200×1024 pixel ciascuno (95 Megapix)

Kepler è un telescopio spaziale dedicato interamente alla ricerca di pianeti extrasolari con il metodo fotometrico. Il telescopio di Kepler è dotato di un enorme CCD (un sensore fotografico dello stesso tipo di quelli usati nelle macchine fotografiche digitali) che è formato da un mosaico di 42 elementi, per un totale di 95 milioni di pixel.



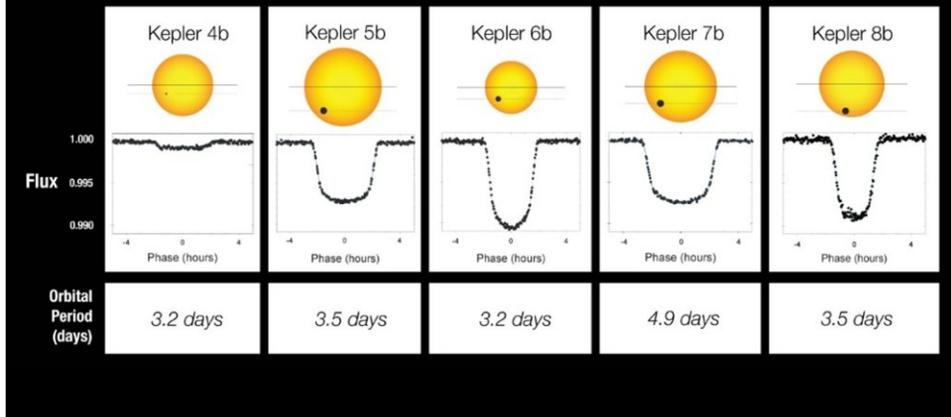
Il telescopio di Kepler è rimasto puntato per cinque anni su un campo stellare della costellazione del Cigno, scelto appositamente lungo la Via Lattea in modo che la densità stellare (e quindi il numero totale di stelle esaminate) fossero molto alti.



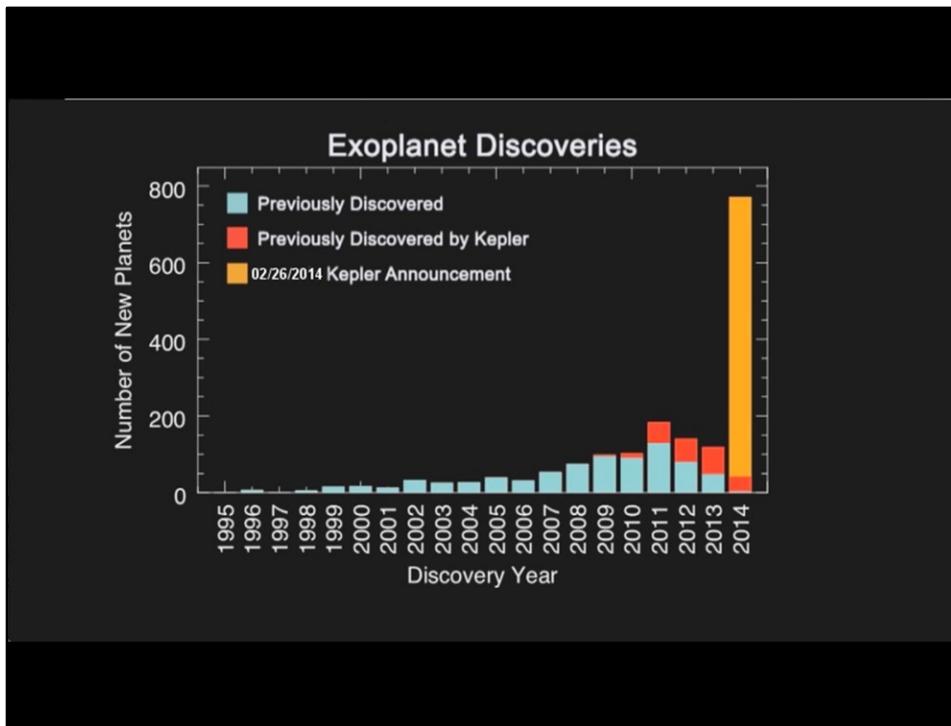
Osservando costantemente la stessa immagine, Kepler ha misurato la luminosità di ogni stella ogni 30 minuti (con grandissima precisione) e ogni minuto (con una precisione un po' inferiore) per tutto il corso della missione.

Kepler

Transit Light Curves



Il risultato è un grande numero di curve di luce molto precise e campionate con regolarità, senza i “buchi” nelle sequenze di misura che sono tipici delle osservazioni condotte da Terra (ad esempio a causa dei periodi di tempo nuvoloso o della indisponibilità dei telescopi).



Questa mole di dati ha permesso un grande numero di nuove scoperte. Come si vede dall'istogramma, in cui per ogni anno è riportato il numero totale di scoperte di pianeti extrasolari, il numero di pianeti rivelati da Kepler è quasi uguale a quello dei pianeti trovati da tutti gli altri progetti di ricerca messi assieme nel corso di quasi 20 anni! La maggioranza delle scoperte di Kepler è stata annunciata nel febbraio 2014 (barra arancione), quando è terminato il lavoro di analisi dei dati raccolti.

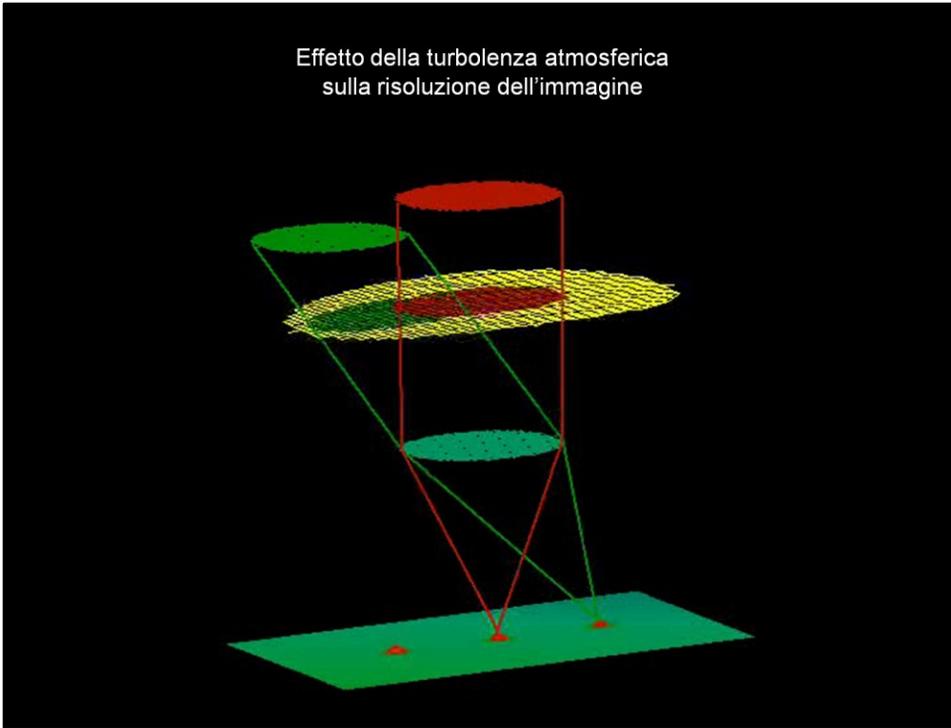
Un vantaggio delle scoperte di Kepler è che esse, essendo state effettuate su un campione ben definito di candidati e con un metodo uniforme, sono soggette a effetti di selezione noti e quantificabili con precisione e perciò si prestano a estrapolazioni statistiche. I risultati di Kepler permettono di dedurre che la maggioranza delle stelle della nostra Galassia possiede un sistema planetario, e che anche i pianeti simili alla Terra (per dimensioni e condizioni fisiche) sono estremamente comuni.

Metodi di detezione

Osservazione diretta (ottico o infrarosso)

Molto recentemente sono state sviluppate tecniche osservative che permettono di *vedere direttamente* (nel senso di vere immagini) i pianeti extrasolari, anche se questi metodi sono soggetti a limitazioni e non sono efficienti per la scoperta di nuovi pianeti. Osservazioni di questo tipo possono essere eseguite nella luce visibile o ancora meglio nell'infrarosso: poiché infatti i pianeti hanno superfici più fredde di quelle delle stelle ed emettono preferenzialmente nell'infrarosso, il rapporto di luminosità tra pianeta e stella è meno sfavorevole in questa banda spettrale.

Effetto della turbolenza atmosferica
sulla risoluzione dell'immagine



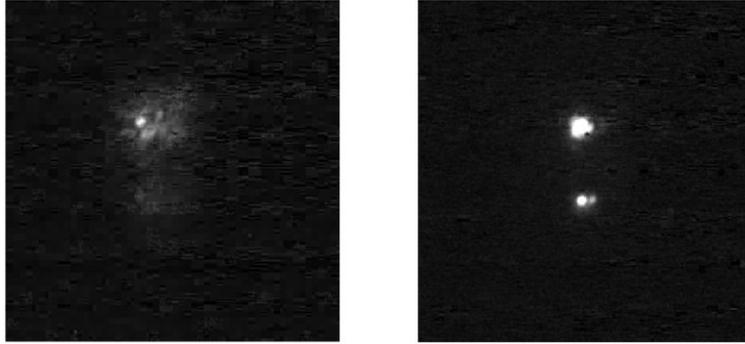
La precisione delle osservazioni effettuate da Terra è limitata dalla presenza dell'atmosfera, che interpone tra noi e la stella osservata una successione di strati d'aria di indice di rifrazione differente e che si muovono molto velocemente, con tempi scala dell'ordine di piccole frazioni di secondo, per effetto della turbolenza dell'aria. Questi strati si comportano come lenti deformanti di forma rapidamente variabile. Di conseguenza l'immagine di un oggetto extraterrestre, osservata a forti ingrandimenti, non appare immobile, ma è affetta da un continuo tremolio o *scintillazione*; è una situazione simile a quando si osserva un sasso sul fondo di un torrente, dietro uno strato d'acqua in continuo movimento.

Effetti della turbolenza atmosferica



Quando un'immagine così tremolante viene registrata fotograficamente, il movimento dell'immagine nel corso della durata dell'esposizione produce uno sfuocamento che porta a una significativa perdita di dettagli. La figura sopra riprodotta mostra il deterioramento dell'immagine puntiforme di una stella causato da gradi crescenti (da sinistra verso destra) di turbolenza atmosferica.

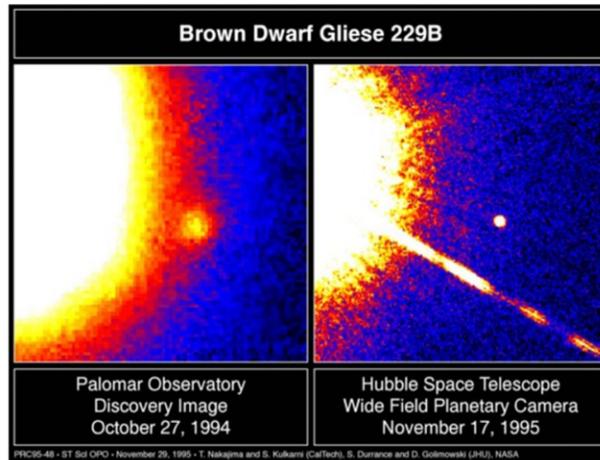
Miglioramento della risoluzione dell'immagine
per mezzo di *ottiche adattive*



Alcuni dei telescopi terrestri più avanzati sono dotati di sistemi di *ottica adattiva*, cioè di dispositivi che analizzano l'immagine e producono nello specchio del telescopio piccole deformazioni (con una frequenza di parecchie centinaia di volte al secondo) in modo da controbilanciare ed eliminare le deformazioni prodotte dell'atmosfera. La figura mostra la differenza tra le immagini di uno stesso sistema stellare multiplo riprese con il meccanismo di correzione adattiva spento (a sinistra) e acceso (a destra) .

Metodi di detezione

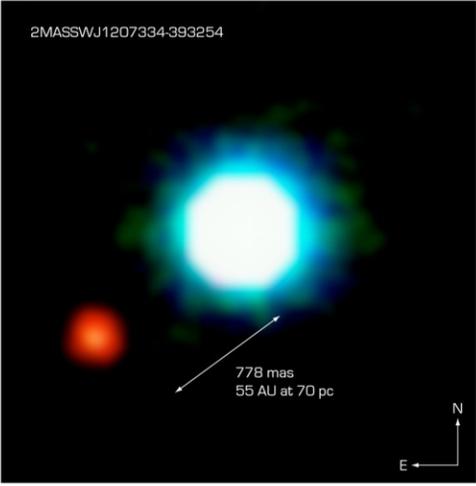
Ottiche adattive



(ottica adattiva)

(telescopio spaziale)

Con i sistemi di ottica adattiva è quindi possibile raggiungere una risoluzione che si avvicina a quella delle immagini riprese dallo spazio, senza l'effetto deformante dell'atmosfera.



2MASSWJ1207334-393254

Pianeta 2M1207 b

Distanza: 170 anni luce

Scoperta: 2004

Massa: $4 M_{\text{giove}}$

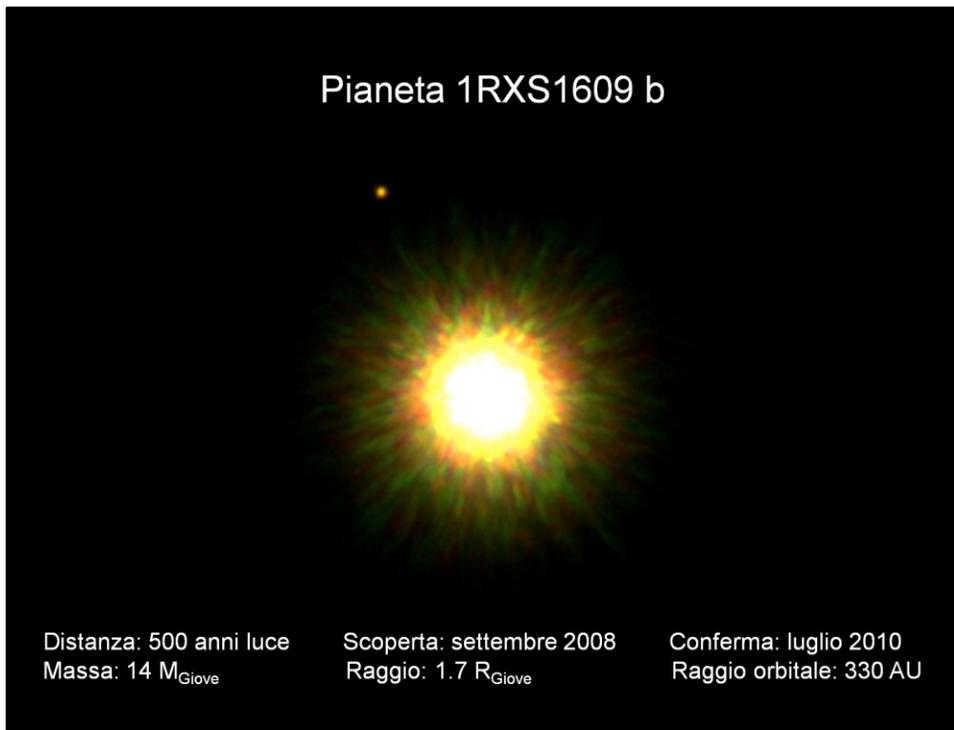
Raggio orbitale: 45-50 AU

(la stella principale è una nana bruna)

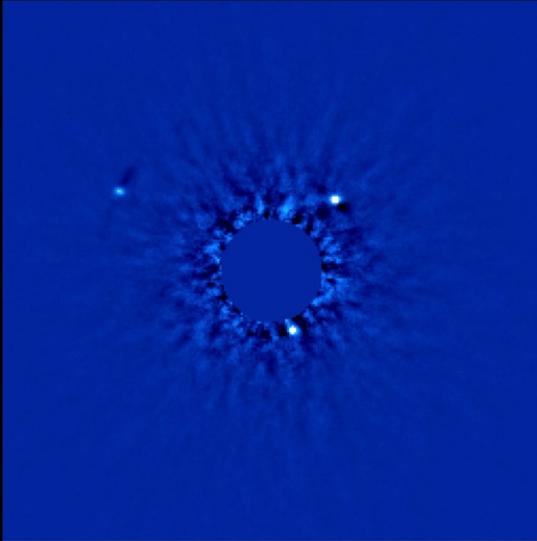
NACO Image of the Brown Dwarf Object 2M1207 and GPC

ESO PR Photo 26a/04 (10 September 2004) © European Southern Observatory

I sistemi di ottiche adattive sono stati usati per risolvere gruppi di stelle molto vicine, ad esempio per scoprire nane brune legate gravitazionalmente a stelle più luminose. Negli ultimi anni questi dispositivi hanno permesso anche l'osservazione diretta di pianeti extrasolari.



A partire dal 2004 sono stati osservati in questo modo alcuni pianeti extrasolari ...

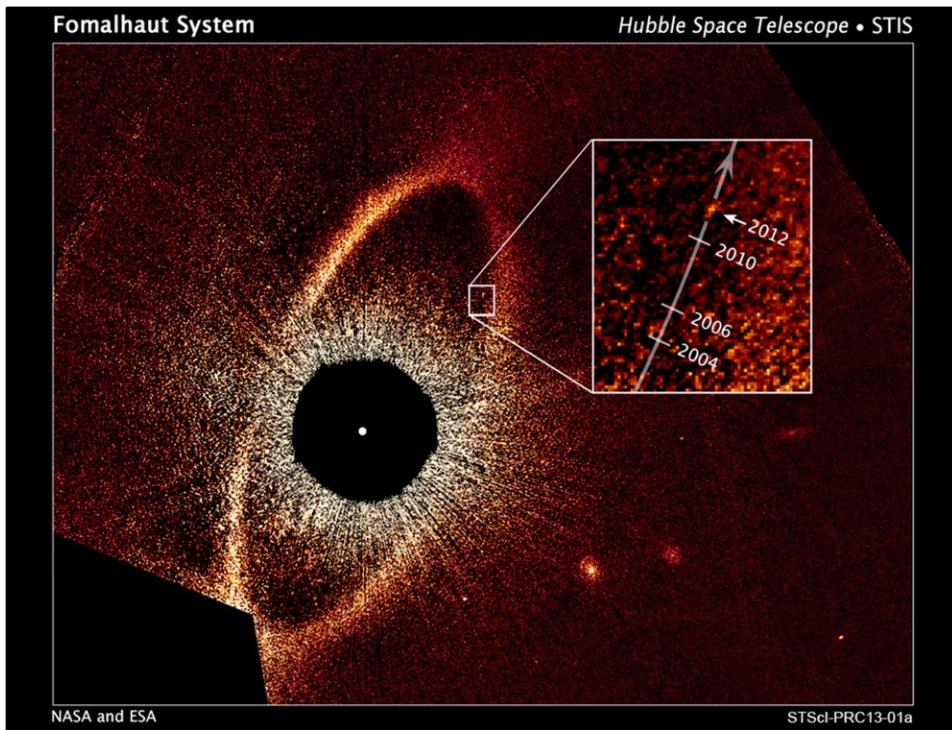


Sistema planetario
di HR 8799

Gemini Observatory / NRC / AURA / Christian Marois, et al. Gemini Observatory Legacy Image

Distanza: 130 anni luce Scoperta: novembre 2008 (telescopio Gemini, Hawaii)

... e addirittura un sistema planetario multiplo, formato da tre pianeti (anche in questa fotografia l'immagine della stella centrale è stata cancellata per rendere più facilmente visibili i pianeti).



Il telescopio spaziale Hubble ha anche ottenuto l'immagine di un pianeta in formazione all'interno dell'anello di gas e polveri che circonda una stella, evidenziandone anche direttamente il moto orbitale, cioè osservando il cambiamento della sua posizione lungo l'orbita nel corso degli anni.

Statistica dei sistemi trovati finora (gennaio 2013)

676 sistemi planetari

859 pianeti

128 sistemi multipli

Nel 2013, a meno di vent'anni dalla prima scoperta sicura di un pianeta extrasolare, erano stati scoperti quasi un migliaio di oggetti di questo tipo (la differenza tra il numero totale di pianeti e il numero di sistemi planetari è naturalmente dovuta al fatto che in alcuni sistemi sono stati osservati più pianeti).

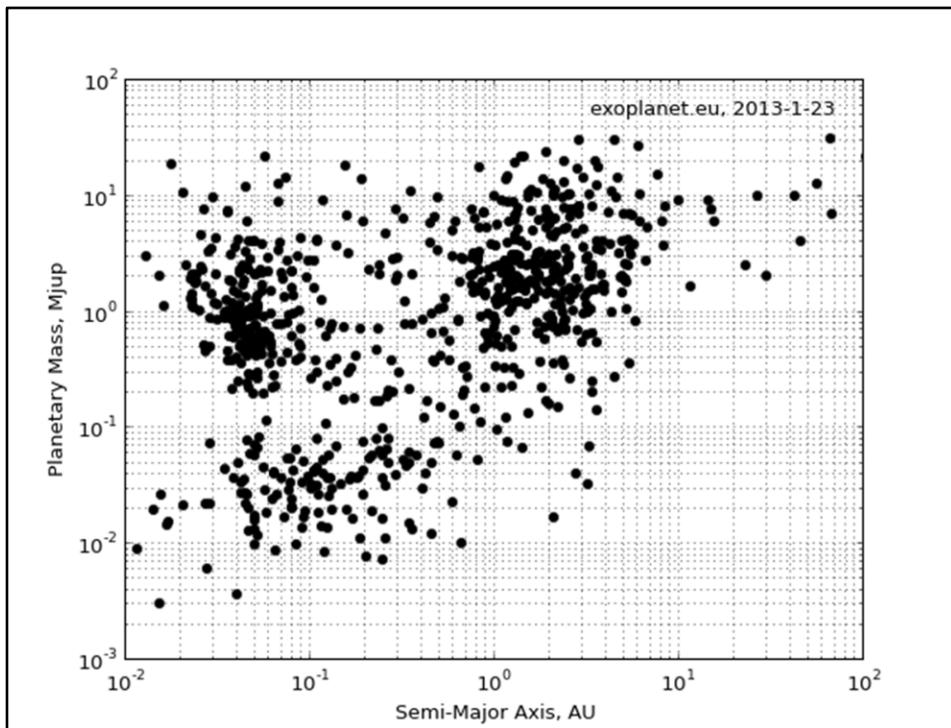
Statistica dei sistemi trovati finora (febbraio 2015)

~~676~~ 1189 sistemi planetari

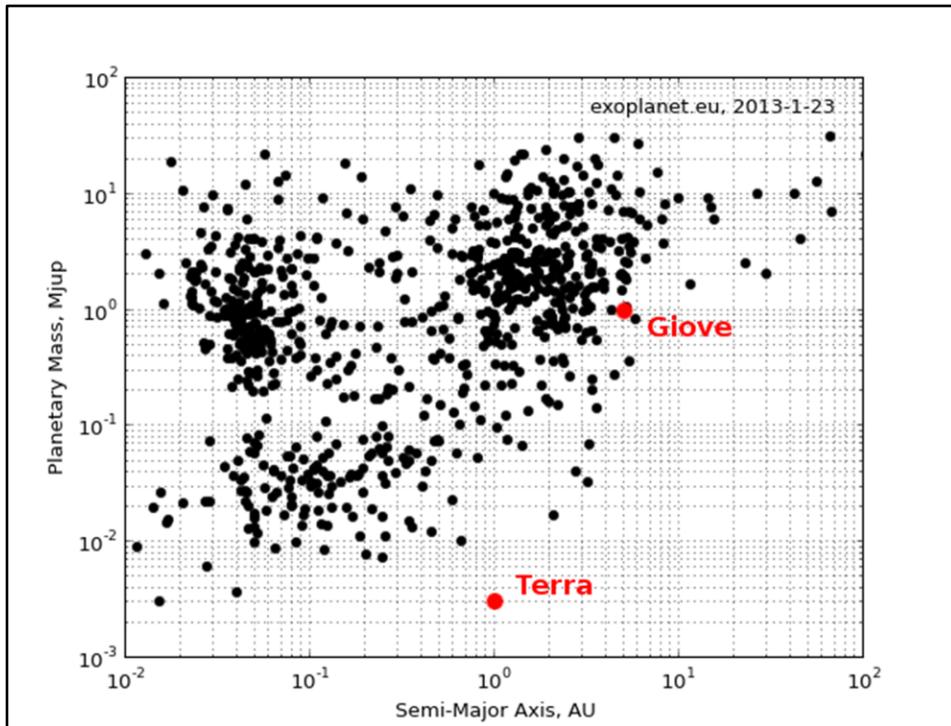
~~859~~ 1890 pianeti

~~128~~ 477 sistemi multipli

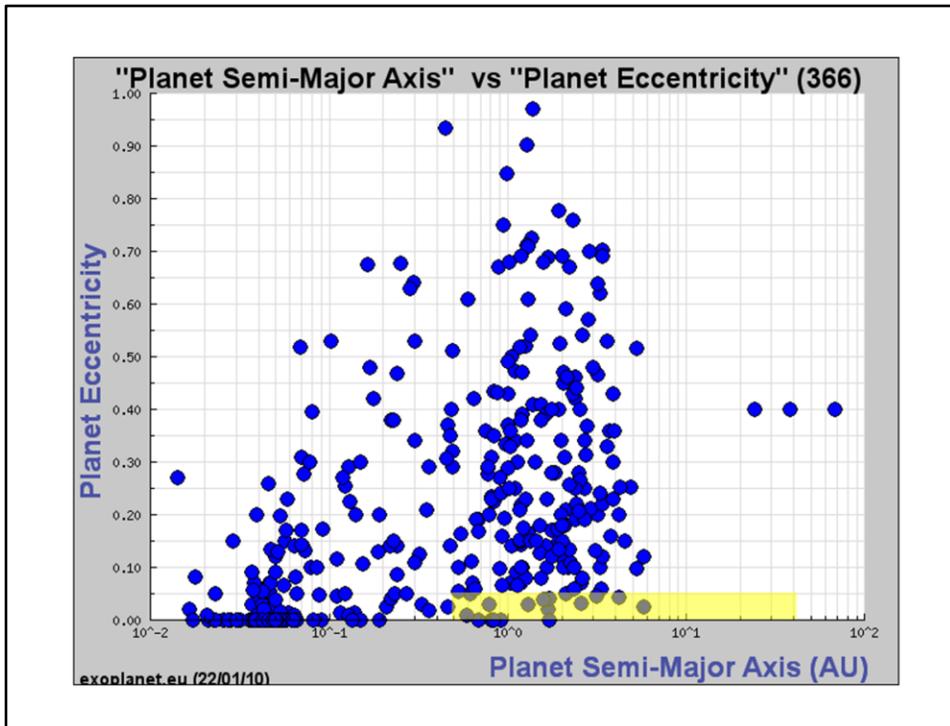
Nei due anni successivi (dall'inizio del 2013 all'inizio del 2015) il numero dei pianeti scoperti è ancora raddoppiato, grazie soprattutto al contributo della missione Kepler. Esaminiamo ora alcune delle caratteristiche generali dei pianeti extrasolari noti.



Un modo interessante di presentare i risultati delle scoperte è quello di riportare su un grafico le *masse* dei pianeti in funzione del *semiasse maggiore* della loro orbita (distanza media del pianeta dalla stella attorno a cui orbita). Ogni punto che compare in questo grafico rappresenta un pianeta, e la sua posizione in ascissa e ordinata corrisponde ai valori di massa e semiasse maggiore misurati. Si noti che, a causa della grande escursione dei valori rilevati, entrambi gli assi del grafico sono stati tracciati in *scala logaritmica*, cioè a distanze uguali corrispondono uguali *rapporti* tra le quantità rappresentate. Ad esempio sull'asse delle ascisse le tacche equidistanti, numerate con i valori 10^{-2} , 10^{-1} , 10^0 , 10^1 , 10^2 , corrispondono rispettivamente a 0.01, 0.1, 1, 10, 100 Unità Astronomiche. Sicuramente la distribuzione di valori evidenziata dal grafico è fortemente influenzata dagli effetti di selezione osservativi che, come abbiamo visto, tendono a privilegiare la scoperta di pianeti di grande massa e di piccolo semiasse maggiore: quindi la zona corrispondente del grafico (in alto a sinistra) è sicuramente sovrappopolata rispetto alla realtà. La zona inferiore del grafico, quella corrispondente ai pianeti di massa più piccola, si sta popolando solo di recente, grazie al miglioramento della precisione delle tecniche osservative che permette di rivelare pianeti sempre più piccoli (in altre parole, il limite inferiore del grafico è dovuto a limitazioni strumentali e non al fatto che non esistano in natura pianeti più piccoli).



Questo grafico presenta una forte anomalia, che è facilmente visibile se per confronto si riportano su di esso anche le posizioni di due tipici pianeti del Sistema Solare: la Terra, rappresentante dei pianeti terrestri, e Giove, rappresentante dei pianeti giganti. Come si vede, è stato scoperto un gran numero di pianeti di massa molto grande, simile a quella di Giove o anche superiore, che hanno raggio orbitale molto piccolo, molto inferiore a quello della Terra o, in molti casi, anche a quello di Mercurio. Pianeti di massa così grande devono essere certamente gassosi, cioè composti principalmente di idrogeno ed elio, perché in caso contrario la massa totale della nebulosa da cui si sono formati dovrebbe essere enorme (come si è detto, gli elementi pesanti costituiscono solo l'1-2% della massa totale della materia interstellare). L'esistenza di questi pianeti giganti molto vicini alla stella (*hot Jupiters*) contraddice l'idea che ci siamo formati sulla nascita del nostro Sistema Solare e suggerisce che altri sistemi planetari possano essersi formati in modo molto diverso.



Un'altra caratteristica per cui i sistemi extrasolari si distinguono dal nostro Sistema Solare è che spesso contengono pianeti dalle orbite estremamente allungate, come è messo in evidenza da questo grafico in cui sono riportate le eccentricità orbitali in funzione dei semiassi maggiori. La regione evidenziata in giallo nella parte inferiore del grafico è quella in cui si trovano i pianeti del Sistema Solare, che hanno tutti eccentricità orbitali inferiori a 0.05. Anche questo dato è in contraddizione con l'ipotesi di una formazione ordinata per aggregazione successiva a partire da una nebulosa a forma di disco, processo che dovrebbe condurre a orbite di bassa eccentricità (come appunto è avvenuto nel nostro Sistema Solare).

Le teorie tradizionali di formazione planetaria

- la differenza di temperatura crea un gradiente chimico:
 - . Sistema Solare interno: elementi pesanti, pianeti piccoli
 - . Sistema Solare esterno: elementi leggeri, pianeti giganti

- come si formano i "Giovi caldi" ?
 - . migrazione di pianeti esterni?
 - . frizione nel protodisco?
 - . incontri ravvicinati?
 - . formazione *in loco* per instabilità gravitazionale?

Lo studio dei sistemi extrasolari (e in particolare la scoperta degli *hot Jupiters*) mette quindi in evidenza come ci sia ancora molto da capire circa l'origine dei sistemi planetari. Da alcuni anni è quindi in corso un processo di revisione delle teorie sulla formazione dei pianeti, che cerca di valutare l'importanza di meccanismi che fino a poco tempo fa si pensava fossero ininfluenti.

~~Esistono pianeti abitati da forme di vita?~~

Esistono pianeti abitabili? Cosa vuol dire “abitabile”?

Requisiti ragionevoli:

Atmosfera (massa, temperatura, composizione chimica)

Acqua liquida (temperatura)

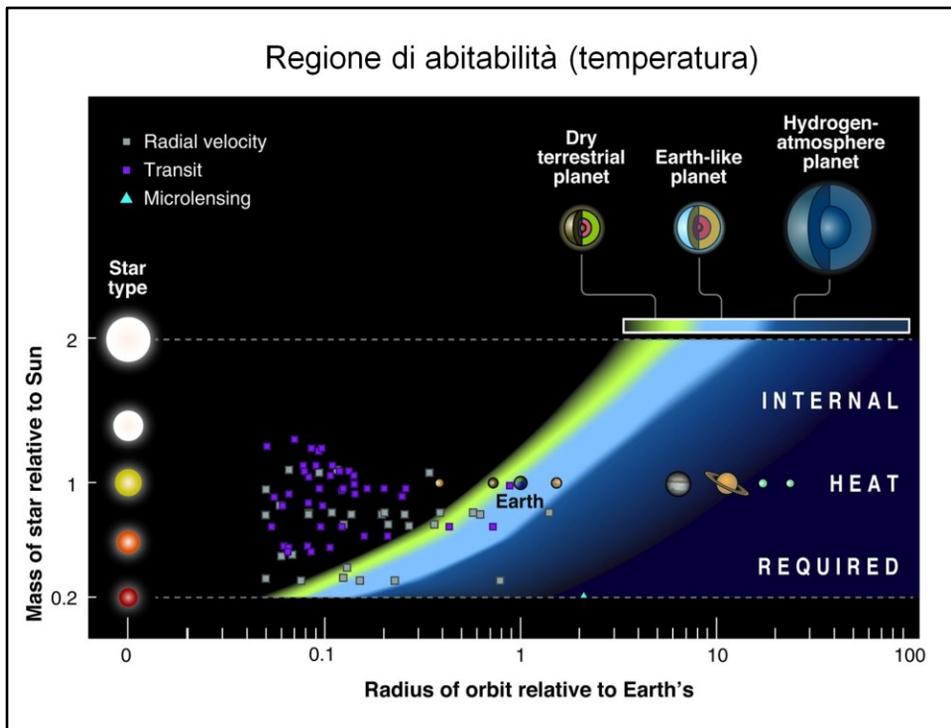
Campo magnetico (massa, composizione chimica, età)

Composizione chimica

Un aspetto molto importante di questo tipo di ricerche è naturalmente capire se possano esistere altri pianeti che ospitano forme di vita. Con i metodi osservativi di cui disponiamo siamo ancora piuttosto lontani dal poter rispondere a questa domanda, ma possiamo già iniziare ad affrontare un problema preliminare: esistono pianeti extrasolari *abitabili*, cioè su cui esistono condizioni fisiche tali da poter eventualmente dare origine alla vita? Purtroppo questa domanda non è ben definita, perché non sappiamo con precisione quali siano le caratteristiche generali della vita e quali condizioni siano necessarie perché essa si sviluppi. In questo campo siamo ancora nelle condizioni in cui era lo studio dell'origine dei sistemi planetari trenta o quarant'anni fa, quello cioè di studiare una classe di fenomeni a partire da un *unico* esempio conosciuto: il nostro! Estrapolare proprietà generali da un unico modello è un procedimento piuttosto rischioso che potrebbe esporci a grosse sorprese (vedi la scoperta degli organismi estremofili sulla Terra), ma per il momento è tutto ciò che possiamo fare.

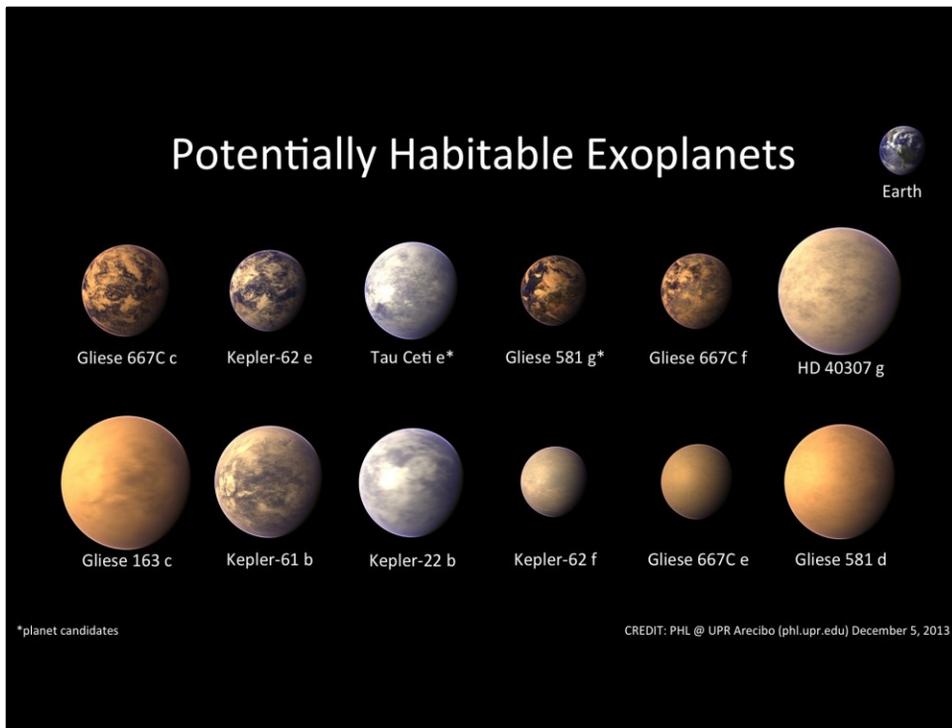
Con questa riserva, requisiti piuttosto ragionevoli per un pianeta abitabile sembrano essere:

- possedere un'atmosfera (nel vuoto un organismo vivente sarebbe esposto a eccessive escursioni termiche e radiazioni ionizzanti). Ciò pone limiti abbastanza stringenti sulla massa del pianeta: un pianeta troppo piccolo, come la Luna o anche Marte, non trattiene alcuna atmosfera; un pianeta troppo grande, come Giove, è ricoperto da un'atmosfera troppo spessa, composta principalmente da idrogeno, e la superficie è sottoposta a pressioni enormi;
- avere acqua allo stato liquido (l'acqua sembra essere un solvente indispensabile ai processi biologici), e quindi avere una temperatura compatibile con questo requisito;
- possedere un campo magnetico che costituisca uno scudo efficace al bombardamento di particelle cariche provenienti dallo spazio (raggi cosmici e vento solare). Anche questo requisito è legato alla massa del pianeta, perché il campo magnetico è prodotto dai moti convettivi di un nucleo metallico liquido, e quindi il pianeta deve essere abbastanza grande da non essersi completamente raffreddato internamente (come è il caso della Luna, che infatti non possiede campo magnetico);
- avere condizioni chimiche adatte.

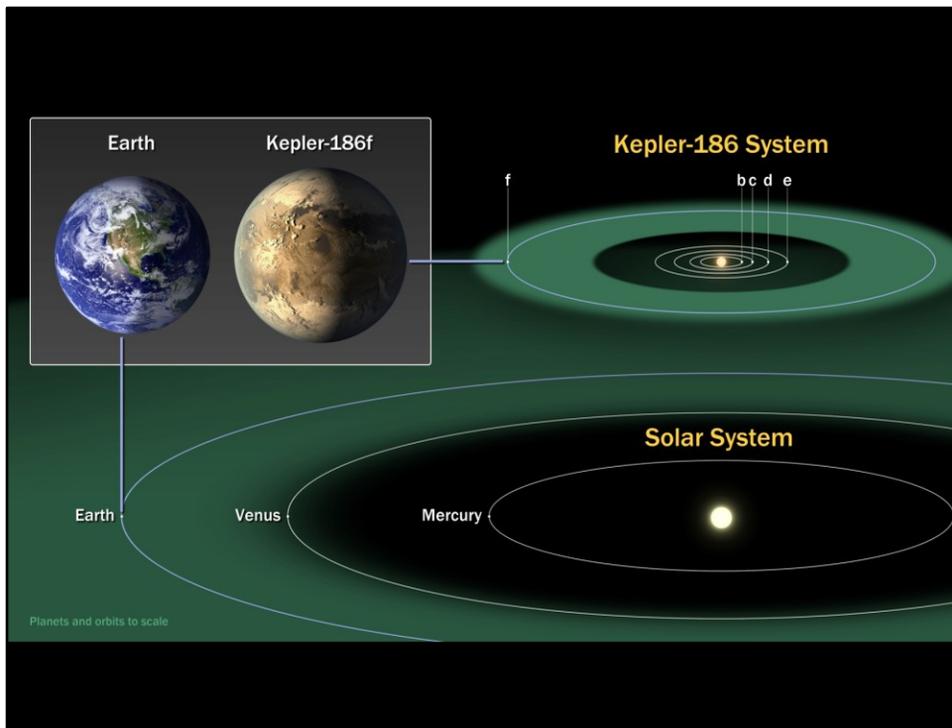


La temperatura alla superficie di un pianeta dipende da vari fattori, tra cui la densità e la composizione dell'atmosfera e lo stato di rotazione del pianeta, ma soprattutto dalla quantità di energia che riceve dalla sua stella. Per ogni sistema planetario è quindi possibile definire approssimativamente una *regione di abitabilità*, cioè un intervallo di distanze dalla stella all'interno del quale la temperatura del pianeta è compatibile con la vita. Nel Sistema Solare tale regione si estende da un punto a metà strada tra le orbite di Venere e della Terra (Venere è troppo vicina al Sole e troppo calda) a poco oltre l'orbita di Marte.

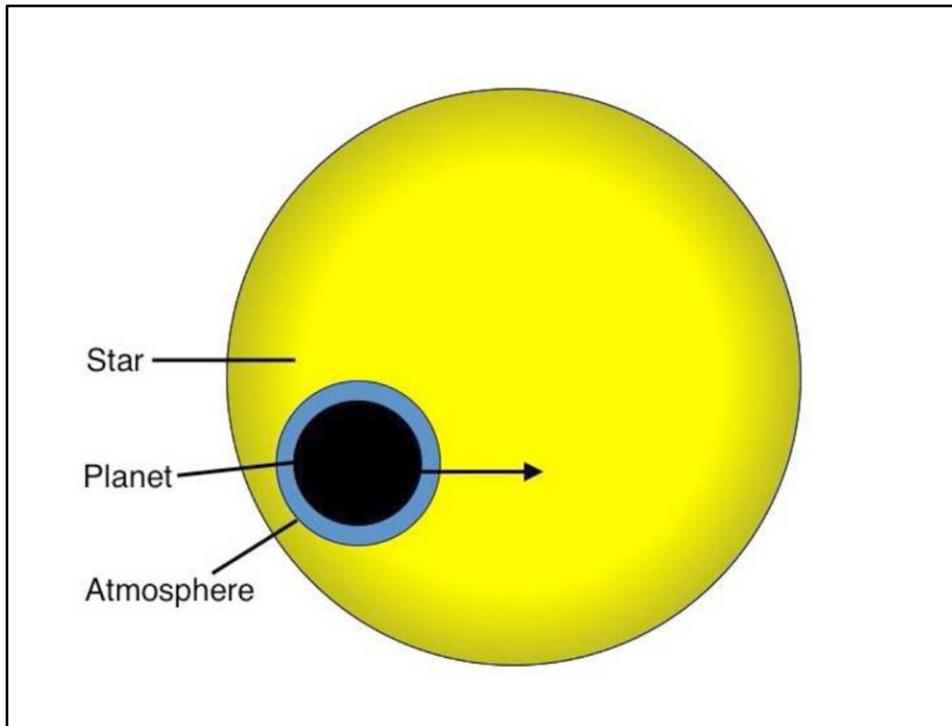
La posizione e le dimensioni della zona di abitabilità dipendono dalla luminosità totale della stella, e quindi dalla sua massa. Una stella di massa più piccola del Sole ha temperatura superficiale e luminosità più bassa, e la sua zona di abitabilità si trova più vicino all'astro. Il contrario accade per stelle di massa più grande del Sole. Bisogna però considerare che la durata della "vita" di una stella (cioè, più precisamente, il periodo di tempo in cui essa rimane in sequenza principale) diminuisce molto velocemente al crescere della massa, e quindi le stelle più grandi potrebbero non durare abbastanza a lungo da dare tempo alla vita di svilupparsi.



Uno degli sforzi principali dei progetti di ricerca di pianeti extrasolari è stato quello di migliorare la sensibilità dei sistemi di detezione in modo da portare la soglia minima di massa rivelabile da quella dei pianeti giganti (centinaia di masse terrestri) a quella di pianeti più simili alla Terra. Benché la maggior parte dei pianeti scoperti sia di tipo gioviano, negli ultimi anni iniziano a essere rilevati anche pianeti di caratteristiche tali da poter ospitare la vita.

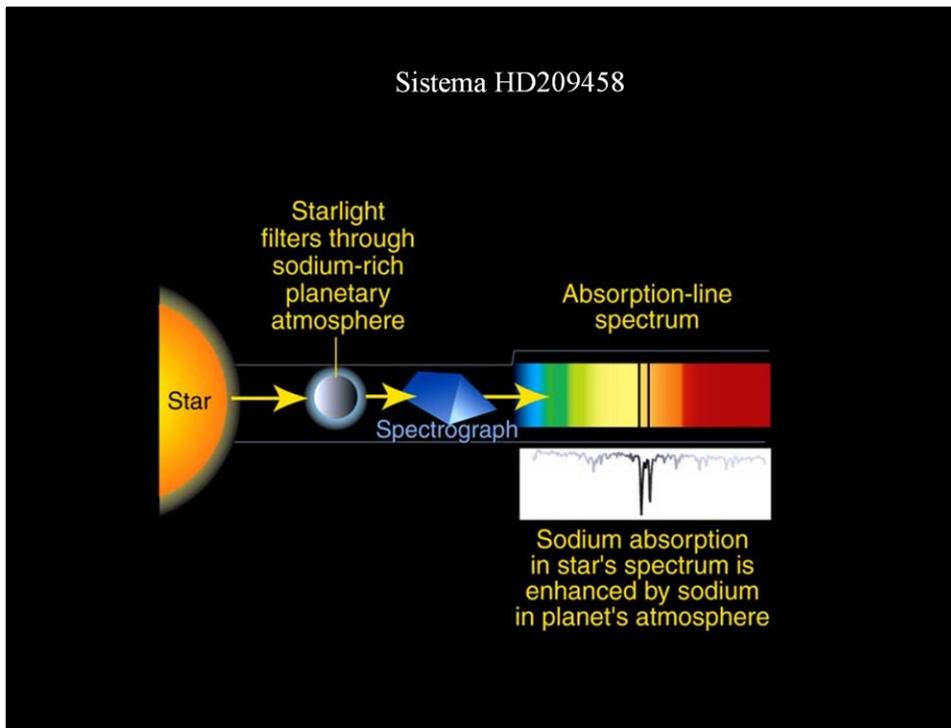


Il caso che sembra più favorevole è quello di un pianeta (scoperto da Kepler) di massa di poco superiore (1.1 volte) a quella della Terra e interno alla regione di abitabilità della sua stella.



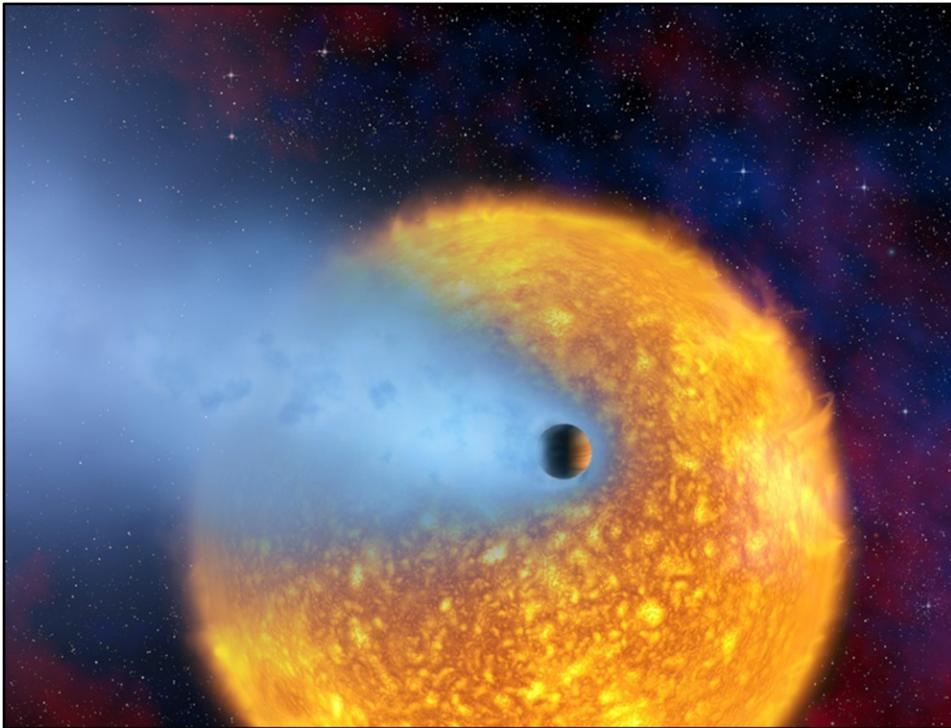
Un altro metodo di indagine molto promettente è la caratterizzazione delle atmosfere dei pianeti extrasolari per mezzo della spettroscopia. Se un pianeta dotato di atmosfera passa davanti al disco della sua stella (stiamo quindi parlando di un pianeta rivelabile con il metodo fotometrico), parte della luce stellare che ci giunge viene filtrata dall'atmosfera del pianeta e il suo spettro acquisisce quindi le righe di assorbimento tipiche dei composti chimici contenuti nell'atmosfera planetaria.

Sistema HD209458

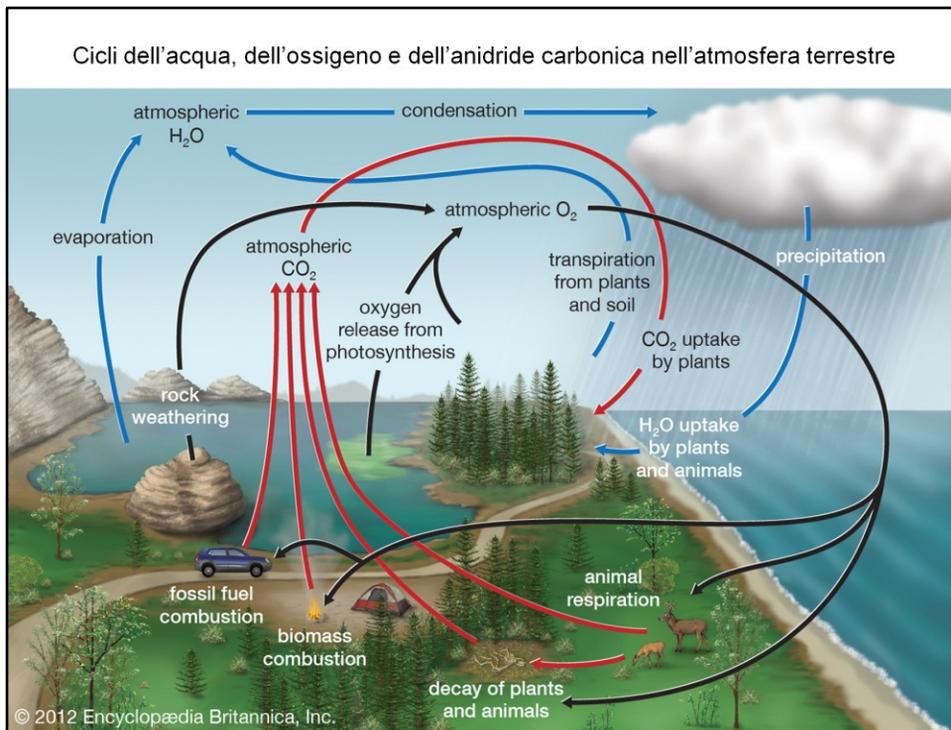


Dalla distanza da cui noi osserviamo, il disco stellare non è risolvibile; nella luce che riceviamo da questa sorgente puntiforme saranno quindi mescolate la luce “pura” della stella e la luce filtrata dall’atmosfera planetaria. I due contributi possono però essere separati confrontando gli spettri della stella ottenuti *prima* e *durante* il passaggio del pianeta: se in fase di eclissi compaiono nello spettro righe di assorbimento che non erano presenti al di fuori dell’eclissi, o se l’intensità di alcune righe di assorbimento è *maggiore* in fase di eclissi, questa differenza deve essere indicativa della composizione dell’atmosfera del pianeta.

Il primo caso in cui una misura del genere ha dato esito positivo è quello di un pianeta che orbita attorno alla stella HD209458, nel cui spettro sono state evidenziate le righe di assorbimento del sodio, un elemento che non ci aspetteremmo di trovare in un’atmosfera planetaria.



Come è stato evidenziato da studi posteriori, il caso di HD209458 era particolarmente facile da rivelare perché si tratta di una pianeta che orbita a piccolissima distanza dalla sua stella, il cui intenso calore provoca l'evaporazione del sodio contenuto sulla superficie planetaria. Il pianeta è quindi circondato da una grande nuvola di sodio che viene costantemente persa nello spazio, formando una lunga scia (simile alla coda di una cometa) che costituisce un efficace filtro alla luce della stella (naturalmente l'immagine sopra riprodotta non è una fotografia ma una rappresentazione artistica che cerca di immaginare come vedremmo il sistema se fossimo sufficientemente vicini). Successivamente con questo metodo è stata evidenziata la presenza di diversi composti chimici (tra cui ossido di carbonio, vapore acqueo, metano) nell'atmosfera di alcune decine di pianeti extrasolari.



La determinazione spettroscopica della composizione chimica atmosferica fornisce un potente strumento per lo studio dei pianeti extrasolari. Una possibilità affascinante sarebbe quella di poter rivelare una forte presenza di ossigeno nell'atmosfera di un pianeta extrasolare. L'ossigeno è un elemento chimico fortemente reattivo che si combina facilmente con molti altri elementi, formando ossidi. È stato calcolato che, a causa di queste reazioni chimiche, l'atmosfera terrestre perderebbe il proprio contenuto di ossigeno gassoso in poche centinaia di migliaia di anni. Perciò l'atmosfera della Terra sarebbe priva di ossigeno se non ne fosse costantemente rifornita dalle piante che, tramite la funzione clorofilliana, scindono la molecola dell'ossido di carbonio, trattenendo il carbonio per il proprio metabolismo e rilasciando nell'aria l'ossigeno. Poiché non si conosce alcun processo non biologico che sia in grado di produrre ossigeno con altrettanta efficienza, i biologi credono che, se venisse rilevata un'alta percentuale di ossigeno nell'atmosfera di un pianeta extrasolare, questo sarebbe un fortissimo indizio della presenza di vita sul pianeta. In nessuna delle atmosfere planetarie evidenziate fino ad ora è stata rilevata la presenza di ossigeno. (Naturalmente, questo non dimostra in modo assoluto che sui pianeti corrispondenti non ci sia vita, perché esistono anche organismi viventi che non producono ossigeno).

Precisazione: il tempo di ricambio dell'ossigeno nell'atmosfera della Terra nelle sue condizioni attuali è di poche migliaia di anni. Questo numero però tiene conto anche del consumo di ossigeno da parte degli organismi viventi e delle attività industriali umane. Se si trascurano queste due fonti di consumo, che sono preponderanti, e si considerano solo i fenomeni non biologici, la durata dell'ossigeno nell'atmosfera sarebbe di alcune centinaia di migliaia di anni, un tempo comunque estremamente breve rispetto all'età della Terra (più di 4 miliardi di anni).

Bibliografia

- Giovanna Tinetti, *I pianeti extrasolari. Alla ricerca di nuovi mondi nella nostra galassia*, Il Mulino (2013)
- Iris Fry, *L'origine della vita sulla Terra*, Garzanti (2002, orig. 2000)

Per approfondire gli argomenti esposti in questa presentazione consiglio il libro di Giovanna Tinetti sui pianeti extrasolari. Per quanto riguarda l'origine della vita sulla Terra e la ricerca della vita al di fuori di essa, consiglio vivamente il libro di Iris Fry, che contiene anche una dettagliata esposizione dell'evoluzione storica delle idee e delle teorie sull'origine della vita.

Siti web

- Wikipedia (inglese!)
- The Extrasolar Planet Encyclopedia
(exoplanet.eu)

Per quanto riguarda i siti web, molto materiale sui pianeti extrasolari è contenuto nelle pagine di *Wikipedia* (nella sua versione inglese: la versione italiana è spesso deficitaria).

Exoplanet.eu Inizio Catalog Diagrams Bibliografia Searches Congressi Altri Siti VO

The Extrasolar Planets Encyclopaedia

Prima versione: Febbraio 1995
 Jean Schneider, CNRS/LUTH - Osservatorio di Parigi
 Last update: 17 gennaio 2013 (859 planets)
 Please report any problems to vo.exoplanet@obspm.fr



Catalog
 Filter, sort, export — arbitrary data manipulations with the Extrasolar Planets Encyclopaedia



Diagrams
 Analyze the Extrasolar Planets Encyclopaedia data online. Simple plotting tool right in the browser

News

22 settembre 2011 **KIC 10905746 b** e **KIC 6185331 b**: i primi 2 Kepler candidati pianeti transitanti rivelati da Planet-Hunters (Fischer et al.).

15 settembre 2011 **Kepler-16 (AB)b**: il primo pianeta transitante attorno a un binaria (Doyle et al.)

12 settembre 2011 **41 nuovi pianeti HARPS** tra cui 16 Super-Terre - Mayor et al.) et 23 nuovi pianeti WASP. HD 97658 b è un **pianeta transitante** (Henry et al.).

31 agosto 2011 **Un pianeta abitabile** attorno a HD 85112? E **cinque altre super-Terre** (Pepe et al).
PSR 1719-14 b: un nuovo pianeta attorno a una pulsar (Bailes et al.).

02 febbraio 2011 6 pianeti attorno alla stella **Kepler-11**, tutti transitanti (Lissauer et al.)

Informazioni introduttive
 Last update: 17 maggio 2012

Bibliografia
 Last update: 17 maggio 2012

Searches
 Last update: 18 aprile 2012

Congressi
 Last update: 17 maggio 2011

Lavoro teorico
 Last update: 03 aprile 2012

Altri siti
 Last update: 16 aprile 2012

Other tools
 Last update: 16 aprile 2012

Una risorsa di riferimento per la ricerca sui pianeti extrasolari è *The Extrasolar Planets Encyclopaedia* (exoplanet.eu). Il sito viene aggiornato quasi giornalmente con le nuove scoperte e contiene abbondanti riferimenti sia ad articoli specialistici, sia a materiale divulgativo rivolto al pubblico. Contiene anche una tabella completa delle caratteristiche di tutti i pianeti scoperti, da cui è possibile generare in tempo reale grafici e istogrammi dei parametri desiderati.