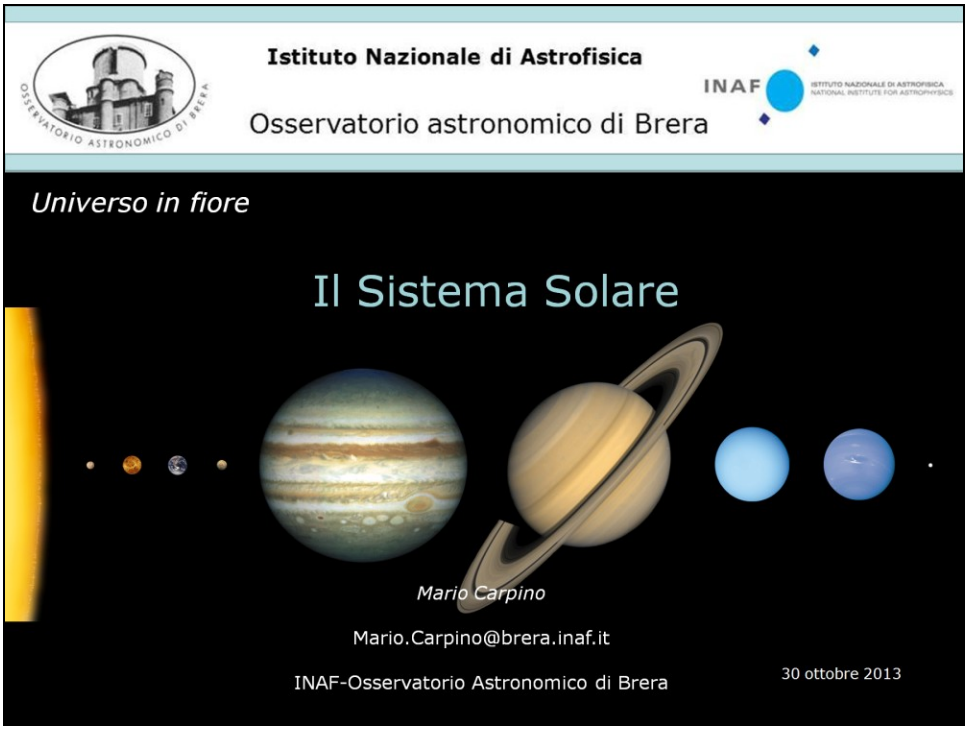
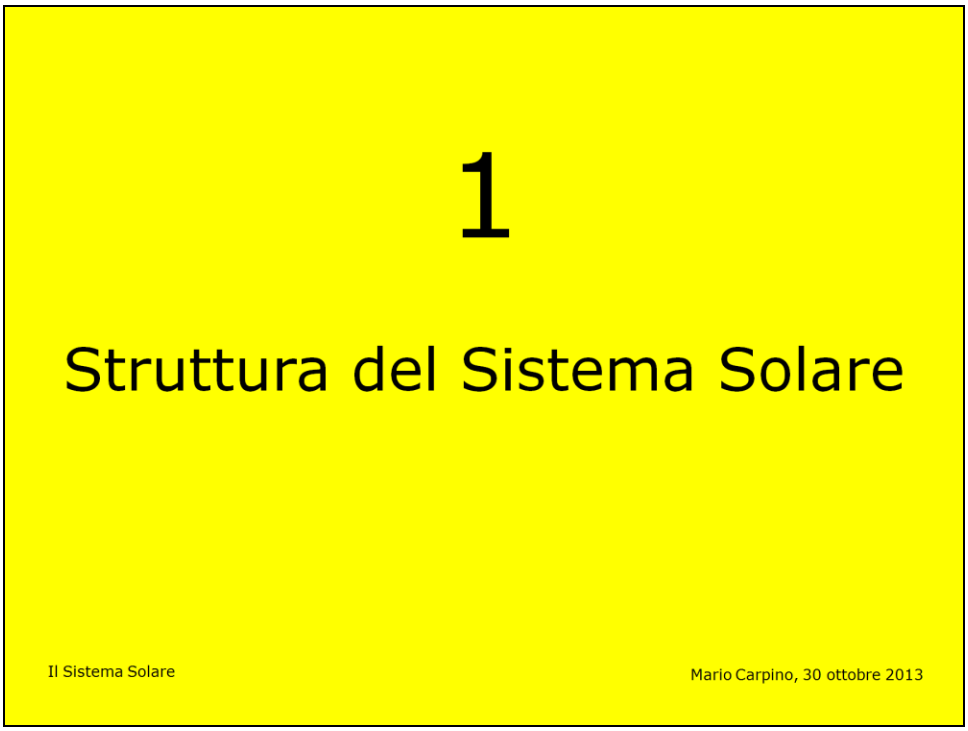


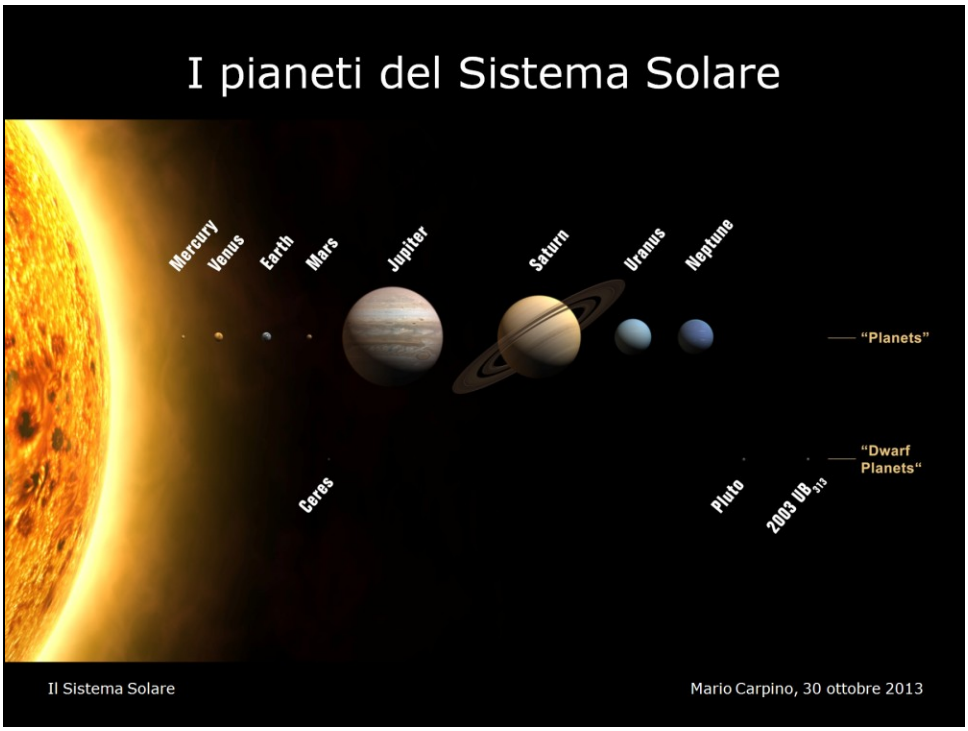
Lezione sulla struttura, la nascita e l'evoluzione del Sistema Solare, e sui sistemi planetari extrasolari.

Sommario della lezione.



Capitolo 1: La struttura attuale del Sistema Solare.

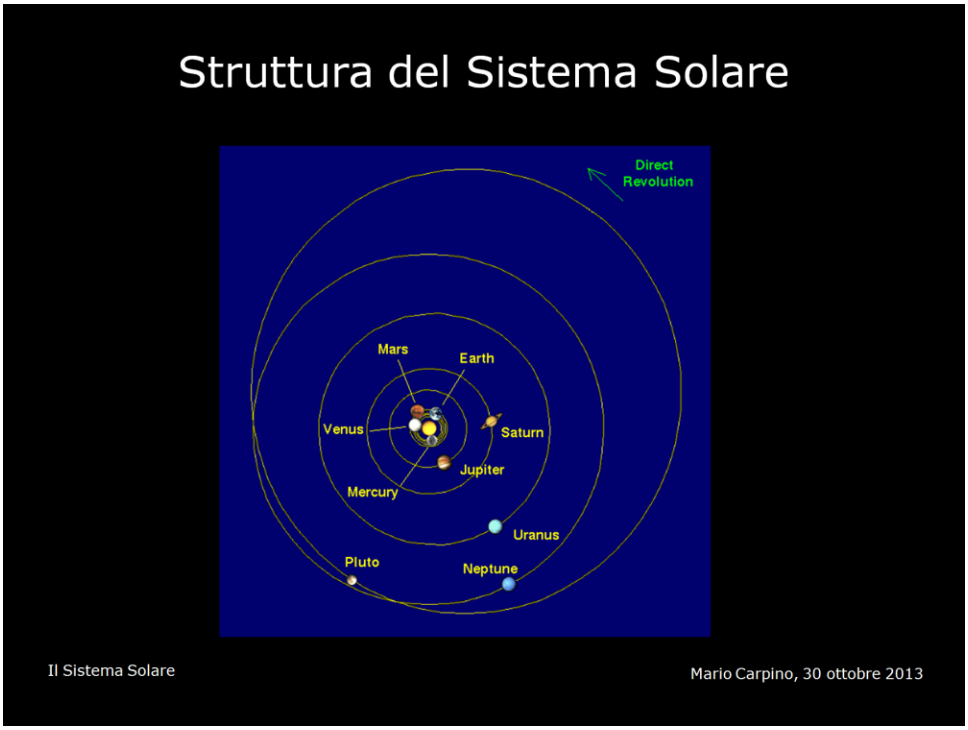
Il Sistema Solare, di cui anche la Terra fa parte, è composto da corpi di dimensioni diverse, legati dall'attrazione gravitazionale reciproca: il Sole, i pianeti principali, gli asteroidi, le comete, fino a corpi di dimensioni sempre più piccole: meteoroidi e polvere interplanetaria.



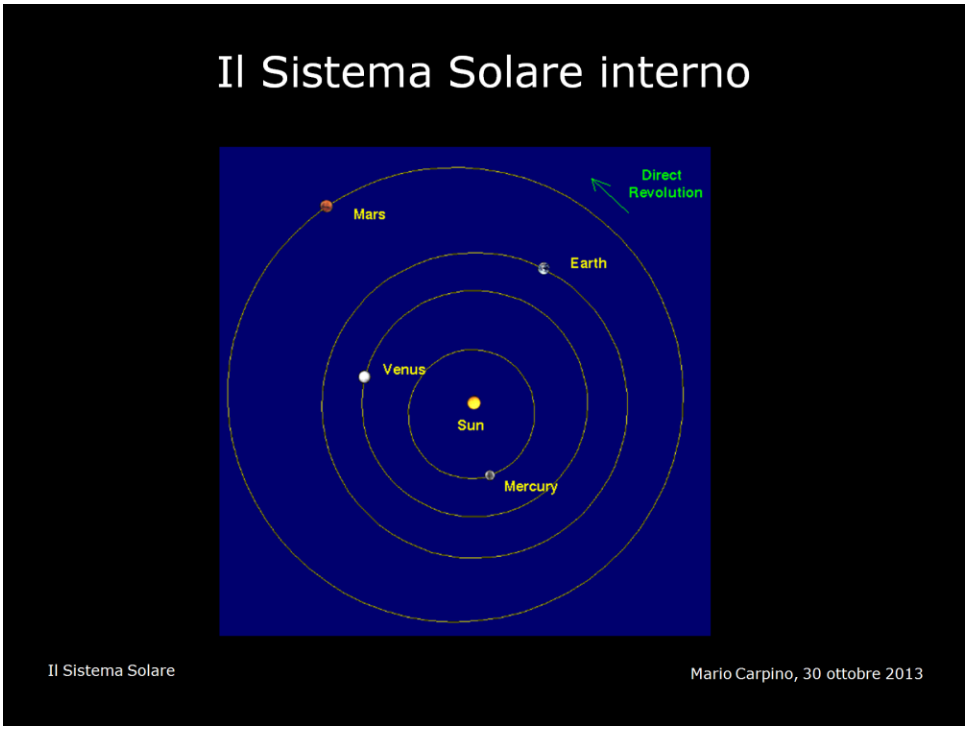
I pianeti principali del "nostro" Sistema Solare sono otto; in ordine di distanza crescente dal Sole sono: Mercurio, Venere, Terra, Marte, Giove, Saturno, Urano e Nettuno. Fino a pochi anni fa anche Plutone (la cui orbita è esterna a quella di Nettuno) era considerato un pianeta, ma si è scoperto recentemente che è un rappresentante di una numerosa famiglia di piccoli corpi chiamati *oggetti trans-nettuniani* o *oggetti della fascia di Kuiper*, e oggi è classificato più esattamente come pianeta nano.

Poiché le distanze che dividono i pianeti sono molto più grandi delle loro dimensioni fisiche, è impossibile rappresentare graficamente il Sistema Solare rispettando contemporaneamente le scale delle distanze e dei diametri dei corpi. In questo disegno (in realtà un fotomontaggio di immagini reali) sono quindi rappresentate in scala le dimensioni ma non le distanze (i pianeti appaiono molto più vicini tra loro di quanto siano in realtà). Per avere un'idea più immediata delle proporzioni si tenga conto che, se le dimensioni di tutti i pianeti fossero ridotte di un miliardo di volte, la Terra sarebbe una sfera del diametro di 13 mm (una ciliegia), Giove una sfera del diametro di 14 cm (un grosso pompelmo) e il Sole avrebbe un diametro di 1,4 metri.

I pianeti del Sistema Solare sono divisi in due gruppi: i *pianeti interni*, i più vicini al Sole (Mercurio, Venere, Terra e Marte) hanno dimensioni relativamente piccole e sono composti prevalentemente da materiale roccioso (silicati) con un nucleo metallico; i *pianeti esterni* (Giove, Saturno, Urano e Nettuno) sono molto più grandi e composti da materiale molto più leggero (soprattutto idrogeno). I due gruppi sono indicati anche con i nomi di *pianeti terrestri* (interni) e *pianeti giganti* (esterni).

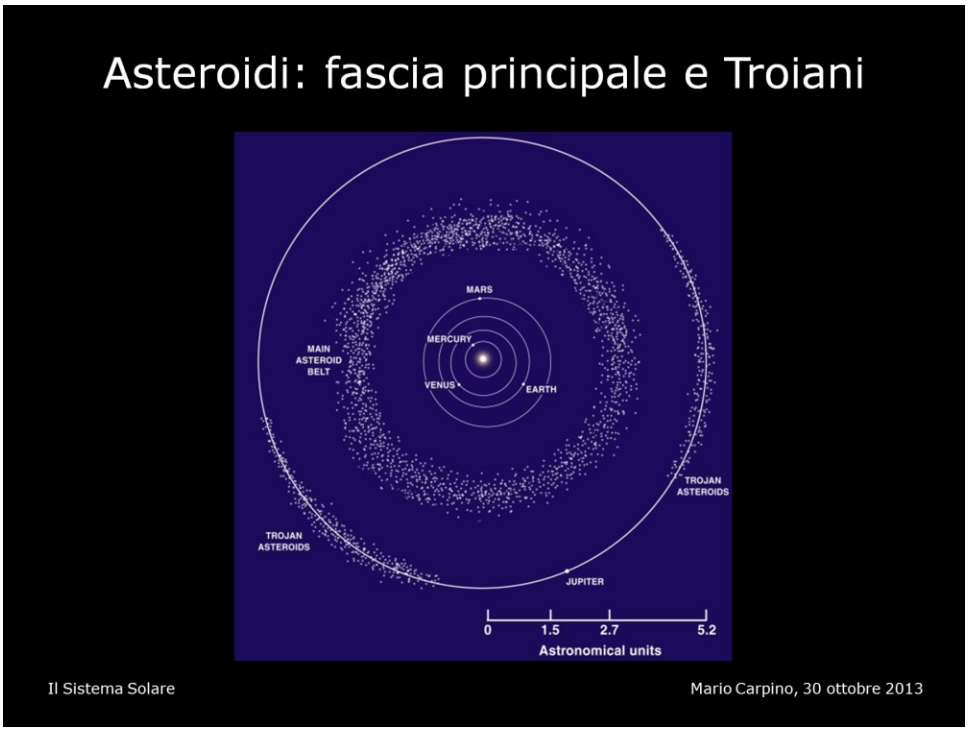


La figura mostra, in scala, le orbite dei pianeti del Sistema Solare viste in pianta (cioè "da sopra" il loro piano orbitale). Per la prima legge di Keplero, tutte lo orbite hanno forma ellittica ma, come si nota dalla figura, per i pianeti del Sistema Solare si tratta di ellissi molto prossime a un cerchio: le eccentricità orbitali sono tutte inferiori a circa 0,05 (fanno eccezione Mercurio e Plutone che però, come si è detto, non è uno dei pianeti principali). Tutti i pianeti percorrono la loro orbita in senso antiorario (chiamato anche "senso diretto"). Alla scala della figura, le orbite dei pianeti interni sono molto piccole e appaiono quasi sovrapposte nel centro (si tenga conto che il raggio dell'orbita di Nettuno è di 30 AU, quello di Marte di 1,5 AU).



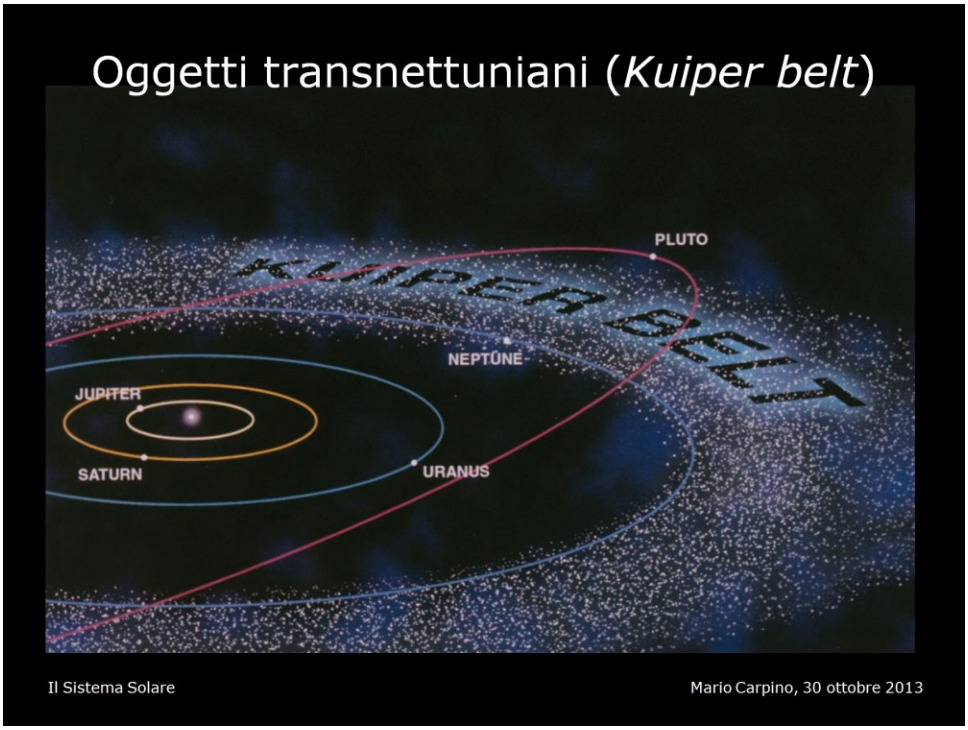
La figura mostra, ingrandita, la zona centrale della figura precedente, che comprende le orbite dei pianeti interni. Il raggio dell'orbita della Terra è, per definizione, uguale a 1 AU.

Il disegno riproduce schematicamente le orbite dei pianeti del Sistema Solare viste non in pianta (come le due figure precedenti) ma di lato. Si noti come tutte lo orbite sono quasi complanari: le inclinazioni reciproche dei piani orbitali sono solo di pochi gradi (con l'eccezione, ancora una volta, di Plutone).

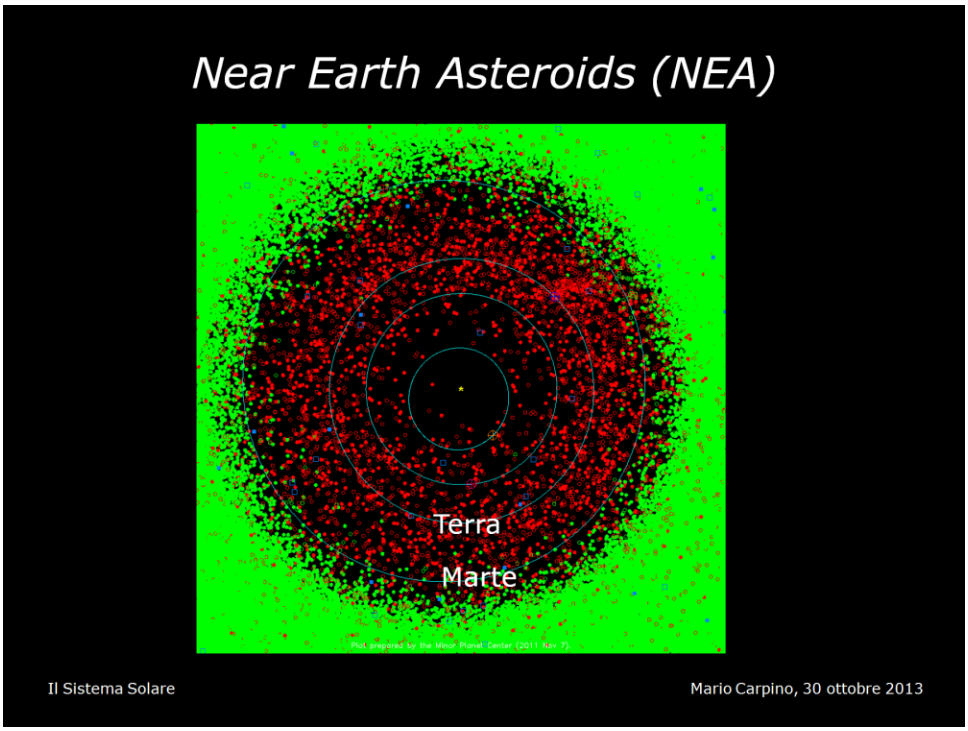


Oltre ai pianeti principali, interni ed esterni, il Sistema Solare contiene un gran numero di corpi minori, tra cui le *comete* e gli *asteroidi* (a volte chiamati pianetini). Gli asteroidi conosciuti sono più di mezzo milione, ma il loro numero continua ad aumentare a seguito delle nuove osservazioni e scoperte che vengono effettuate. La stragrande maggioranza degli asteroidi si muove in una regione compresa tra le orbite di Marte e Giove, a una distanza dal Sole che va da circa 2 a circa 4 AU, chiamata *fascia principale (main belt)* o *cintura degli asteroidi*. Altri due gruppi numerosi di asteroidi (chiamati *Troiani*) si muovono circa sulla stessa orbita di Giove, pur mantenendo sempre una debita distanza dal pianeta, cioè precedendolo o seguendolo di diverse unità astronomiche. L'asteroide più grande, Cerere, ha un diametro di circa 1000 km ed è quindi decisamente più piccolo della Luna (che ha un diametro di 3500 km); quelli più piccoli hanno diametro di pochi metri, ma bisogna notare che il limite inferiore è dettato solo dalle capacità osservative e che in realtà non esiste soluzione di continuità tra gli asteroidi più piccoli, i meteoroidi (metri o centimetri) e la polvere interplanetaria (millimetri o micron).

Si pensa che l'esistenza della fascia principale degli asteroidi sia dovuta alle forti perturbazioni gravitazionali prodotte dal pianeta Giove, che con la sua massa elevata ha perturbato le orbite del materiale presente in questa zona, impedendo il completamento di quel processo di accrescimento che in altre regioni ha portato alla formazione dei pianeti principali (vedi capitolo seguente).



Un'altra regione molto popolata di piccoli corpi è la *fascia di Kuiper*, che si trova all'estrema periferia del Sistema Solare, oltre l'orbita di Nettuno (30 AU) e fino a circa 50-70 AU. Gli oggetti che si muovono in questa regione (*oggetti trans-nettuniani* o *oggetti della fascia di Kuiper*) sono composti principalmente di ghiaccio e quindi sono più simili alle comete che agli asteroidi; se ne conoscono circa un migliaio, ma sicuramente questa è solo una piccola percentuale di una popolazione molto più vasta, perché gli oggetti più piccoli sono visibili con molta difficoltà a causa della loro grande distanza dalla Terra. Si pensa che anche Plutone faccia parte di questa classe di oggetti.



Oltre alle regioni densamente popolate descritte precedentemente, esistono piccoli corpi (asteroidi e comete) che orbitano un po' ovunque nel Sistema Solare. Ad esempio la figura mostra una "istantanea" della posizione degli asteroidi conosciuti nei dintorni e all'interno dell'orbita di Marte. Oltre agli asteroidi della fascia principale, esterni all'orbita di Marte (rappresentati in verde), esistono anche numerosi asteroidi che incrociano le orbite dei pianeti interni e quindi possono avere incontri ravvicinati o addirittura collidere con essi. Questi sono solitamente indicati con la sigla *NEA* (*Near Earth Asteroids*, asteroidi vicini alla Terra) e sono qui rappresentati in rosso. Oltre a questi esistono anche altri tipi di asteroidi e comete che si muovono nel Sistema Solare esterno, incrociando le orbite dei pianeti giganti (da Giove a Nettuno).

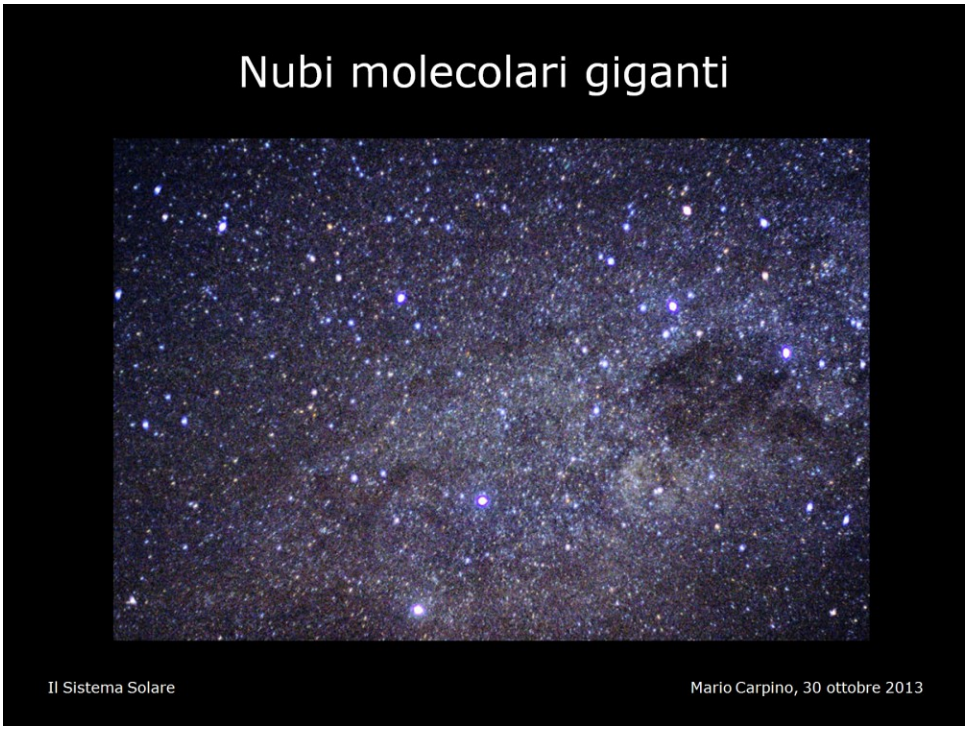
Capitolo 2: La nascita e l'evoluzione del Sistema Solare.

La formazione del Sistema Solare è un processo complesso e non ancora compreso in tutti i suoi aspetti, anche perché si tratta di un evento accaduto circa 4,5 miliardi di anni fa, su cui possiamo avere solo informazioni indirette dall'osservazione dello stato attuale del nostro Sistema Solare o dall'osservazione della formazione di sistemi simili attorno alle stelle a noi vicine. L'esposizione seguente si limiterà quindi a descrivere i meccanismi principali, su cui si è raggiunta una relativa certezza.

Il Sistema Solare (Sole e pianeti) si è formato dalla contrazione e condensazione di una grande nube di gas e polveri che si trovava all'interno della nostra galassia, la Via Lattea. La Via Lattea, come le altre galassie, è un sistema che comprende circa un centinaio di miliardi di stelle, oltre a una grande quantità di materiale sparso nello spazio interstellare (gas e polveri). Una galassia non deve essere concepita come una struttura statica, ma come un sistema in continua trasformazione, quasi un organismo vivente: la galassia ruota, trascinando enormi quantità di gas e polveri che si condensano a formare stelle e pianeti; le stelle emettono luce attraverso reazioni nucleari e a volte, dopo aver esaurito la propria scorta di combustibile, esplodono rilasciando nello spazio il materiale di cui sono composte; questo andrà a formare nuove stelle, in un ciclo continuo.

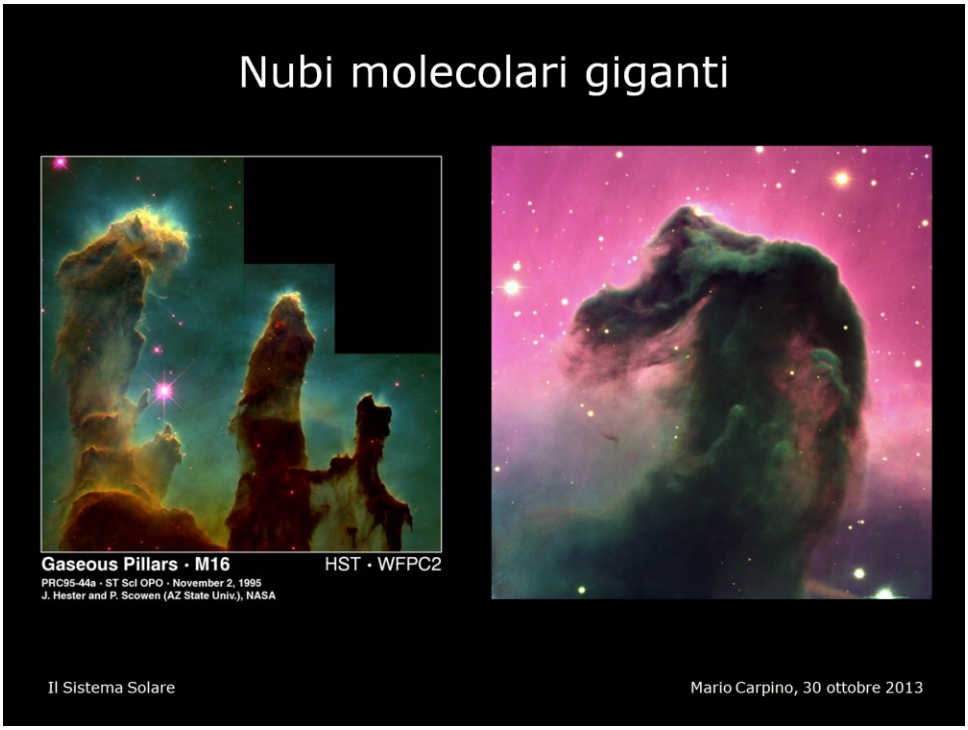
Le galassie ci appaiono come regioni nebulose debolmente luminose. In realtà il loro aspetto diffuso è prodotto da parecchi miliardi di stelle singole che però, a causa della grande distanza a cui si trovano, non riusciamo a distinguere separatamente, un po' come, quando osserviamo una spiaggia da distante, ci sembra un'unica superficie continua anche se in realtà è formata da granelli di sabbia distinti.

Più difficile risulta osservare le nubi di gas e polveri che la galassia contiene, perché si tratta di materia non luminosa. Le nubi possono essere osservate più facilmente quando la galassia è vista di taglio (come in questa immagine della galassia M104, comunemente nota come "Galassia Sombrero").

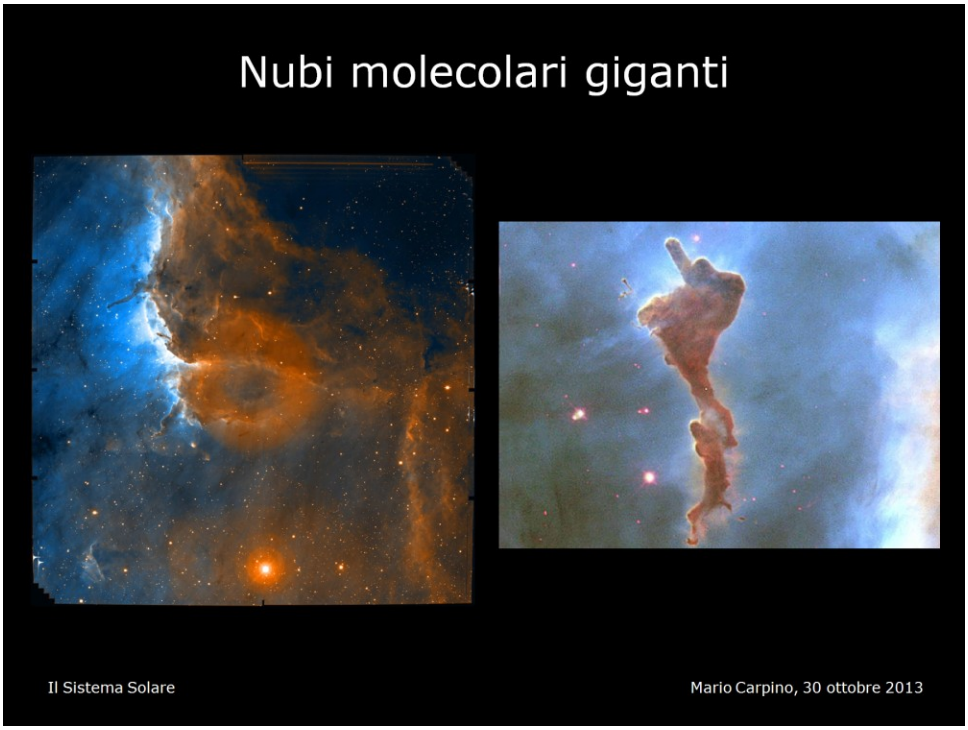


Possiamo vedere anche molte nubi di polvere all'interno della nostra galassia, la Via Lattea. La macchia oscura che si vede sulla destra di questa fotografia della Via Lattea, soprannominata "Sacco di carbone", non è una regione che contiene meno stelle rispetto alle zone circostanti, ma una zona in cui la luce delle stelle appare attenuata dalla presenza di una nube oscura posta davanti ad esse.

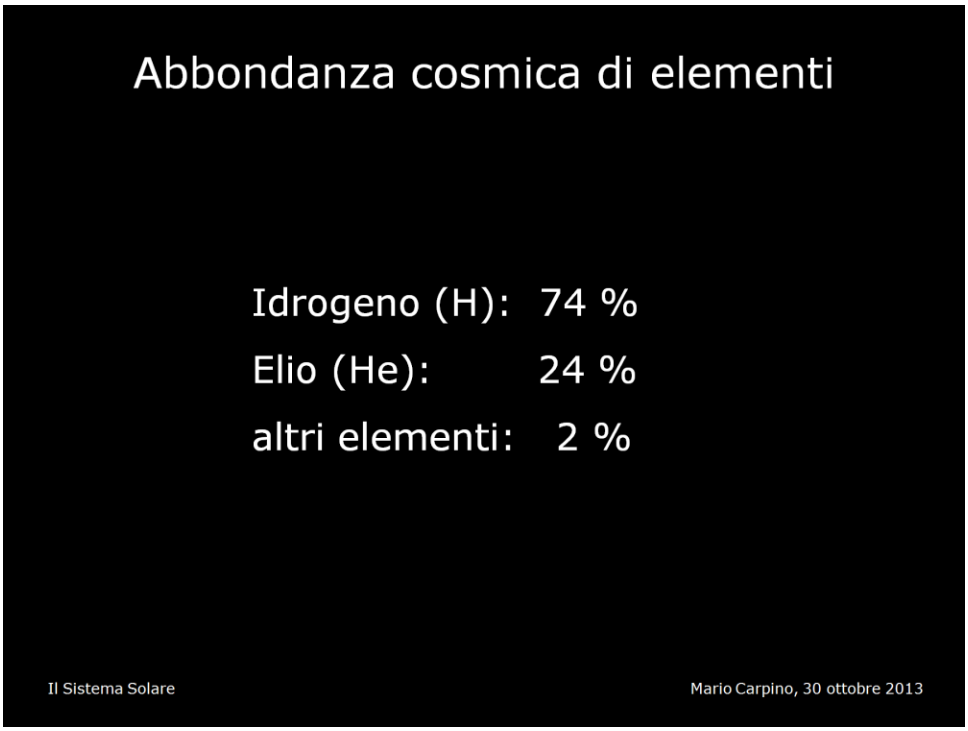
Le nubi da cui si formano le stelle sono chiamate *nubi molecolari giganti*: *molecolari* perché, a causa della bassa temperatura dello spazio interstellare, molti elementi si sono combinati in molecole; *giganti* perché la loro massa tipica è dell'ordine del milione di masse solari, e quindi potenzialmente potrebbero dare origine a milioni di stelle.



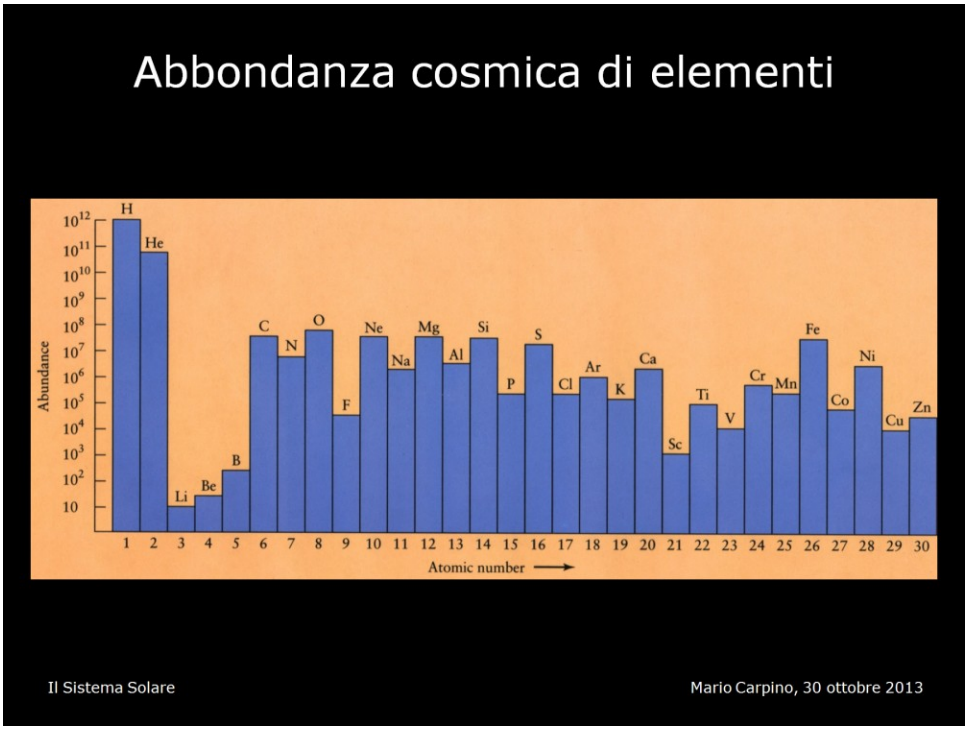
Con i telescopi è possibile vedere parecchi nubi molecolari giganti che appartengono alla nostra Galassia; vicino a molte di queste (come in quelle mostrate in queste fotografie) sono visibili le stelle giovani che si sono appena formate dalla nube, e che illuminano il materiale oscuro di cui essa è composta.



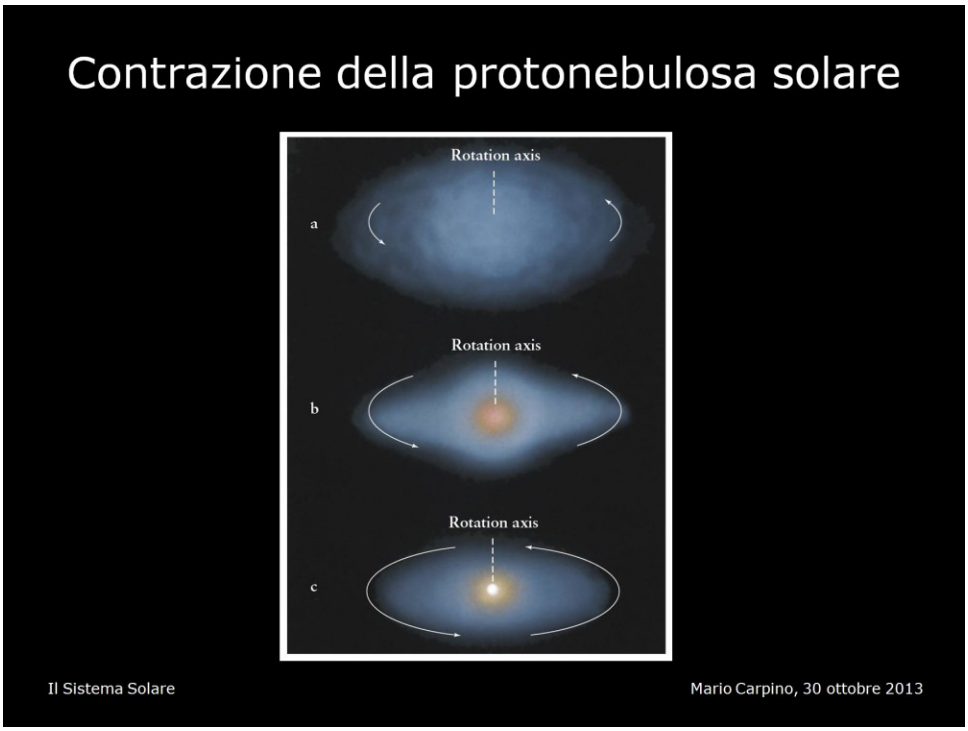
Altre immagini di regioni in cui è in corso la formazione di nuove stelle.



Le nubi molecolari giganti hanno una composizione del tutto simile alla composizione chimica media della galassia in cui si formano, e che è tipica della composizione dell'Universo: circa ¾ di idrogeno, ¼ di elio, e piccole percentuali di tutti gli altri elementi più pesanti. Si pensa che l'idrogeno e l'elio siano stati prodotti direttamente dal Big Bang, l'esplosione iniziale che ha dato origine all'Universo, mentre tutti gli altri elementi siano stati prodotti dalle reazioni nucleari avvenute all'interno di stelle che successivamente sono esplose (*supernovae*) arricchendo la materia interstellare dei nuovi isotopi generati al loro interno.



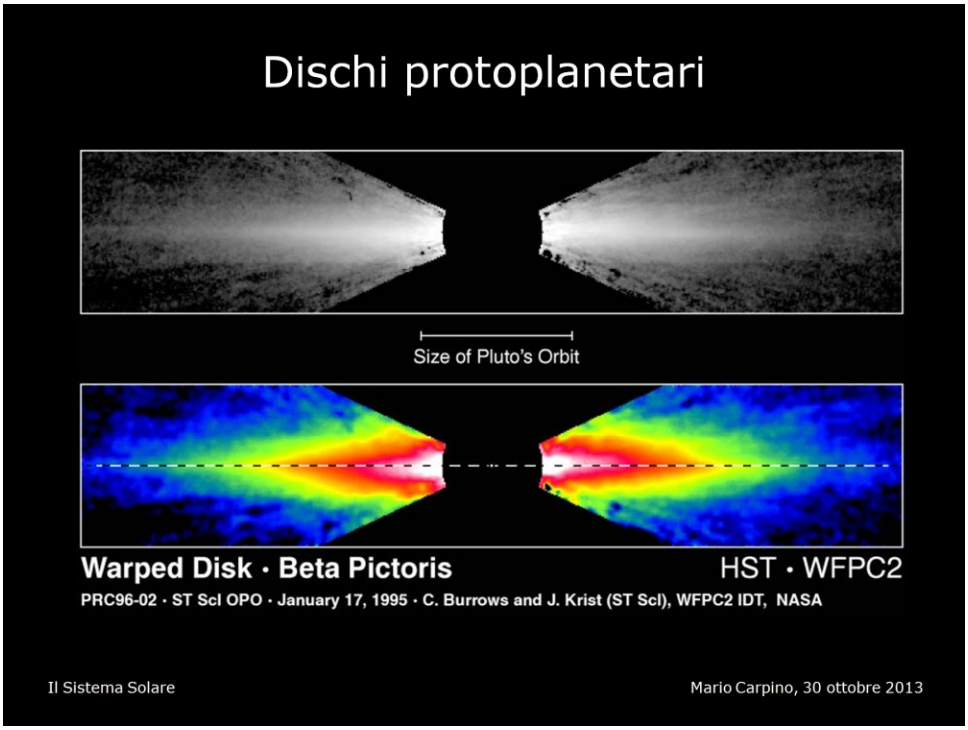
In questo grafico sono riportate le abbondanze cosmiche relative per i diversi elementi. Per una corretta interpretazione del grafico, si noti che è fatto in scala logaritmica (ad esempio vi si legge che nell'Universo per ogni atomo di ossigeno che ne sono 10 mila di idrogeno). Nonostante gli elementi pesanti siano una piccola percentuale del materiale che compone l'Universo, si tratta di una parte molto importante, perché include tutti gli elementi (carbonio, azoto, ossigeno, magnesio, alluminio, silicio, ferro, ecc.) di cui sono fatti i pianeti e tutto ciò che contengono, inclusi gli esseri viventi.



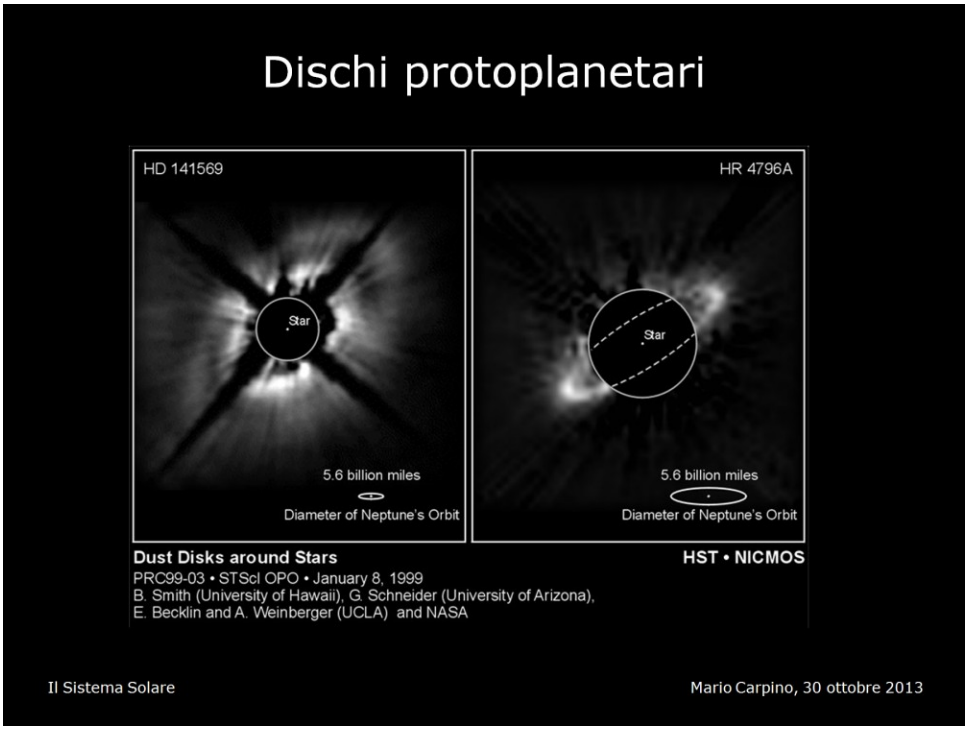
Le nubi molecolari sono in uno stato di equilibrio precario tra due forze contrastanti: la pressione del gas, che tenderebbe a farle espandere, e l'attrazione gravitazionale reciproca tra le particelle che le compongono, che tenderebbe a farle contrarre. Il fattore che decide quale delle due forze ha il sopravvento è la densità della nube: se la densità (a causa del moto della nube all'interno della galassie e delle deformazioni a cui è sottoposta per le perturbazioni esterne) aumenta oltre un certo valore critico, la gravità vince sulla pressione e la nube comincia a contrarsi; a causa della contrazione, la densità aumenta ancora, innescando una contrazione sempre più rapida. Nel corso della contrazione della nube è possibile che alcune sue piccole regioni abbiano una densità superiore a quella delle zone circostanti: in questo caso si sviluppano nuclei di condensazione secondari, che si contrarranno fino a formare stelle e sistemi planetari.

Si pensa che il Sole e il Sistema Solare si sia formato da una zona di condensazione di questo tipo circa 4,5 miliardi di anni fa. La protonebulosa solare ruotava lentamente, come conseguenza della rotazione generale della Galassia, e contraendosi la sua velocità angolare è aumentata (secondo una delle leggi fondamentali della fisica, la legge di conservazione del momento angolare, un corpo che si contrae aumenta la sua velocità di rotazione). Proseguendo la contrazione, la velocità di rotazione è aumentata al punto che la forza centrifuga ad essa associata ha controbilanciato la forza di attrazione, e la nube si è disposta in una configurazione a disco relativamente stabile. La forma a disco è una conseguenza del fatto che la forza centrifuga agisce solo in senso ortogonale all'asse di rotazione, quindi la contrazione ("caduta") *verso* il piano del disco non è contrastata da nessuna forza (a differenza della contrazione in direzione radiale, *lungo* il piano del disco). La relativa stabilità di questa configurazione è dovuta al fatto che ogni particella percorre una propria orbita, quasi kepleriana, attorno al centro della nebulosa (l'orbita kepleriana può essere vista come una traiettoria stabile in cui la forza di attrazione viene bilanciata esattamente dalla forza centrifuga).

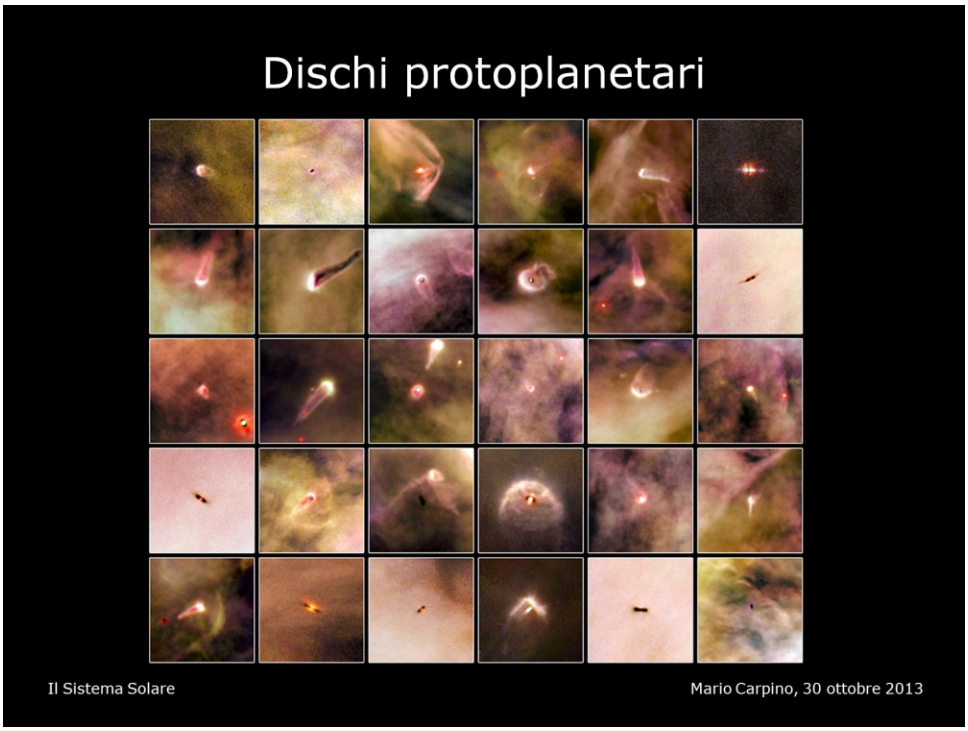
Ovviamente non abbiamo modo di osservare un evento avvenuto 4,5 miliardi di anni fa: possiamo solo immaginarlo (ad esempio attraverso un disegno come quello qui riprodotto).



Tuttavia attorno ad alcune stelle vicine a noi sono stati osservati dischi di gas e polveri che si pensa siano simili a quello che ha dato origine al nostro Sistema Solare. Il caso più famoso è quello della stella β (beta) Pictoris, di cui qui si vede un'immagine ripresa dal telescopio spaziale Hubble. Per poter vedere la debole luminosità del disco circumstellare è necessario usare uno strumento particolare (*coronografo*) che nasconde dietro un diaframma opaco (la figura nera a forma di farfalla visibile al centro delle fotografie) la stella centrale, la cui intensa luce altrimenti renderebbe impossibile distinguere la nebulosa.



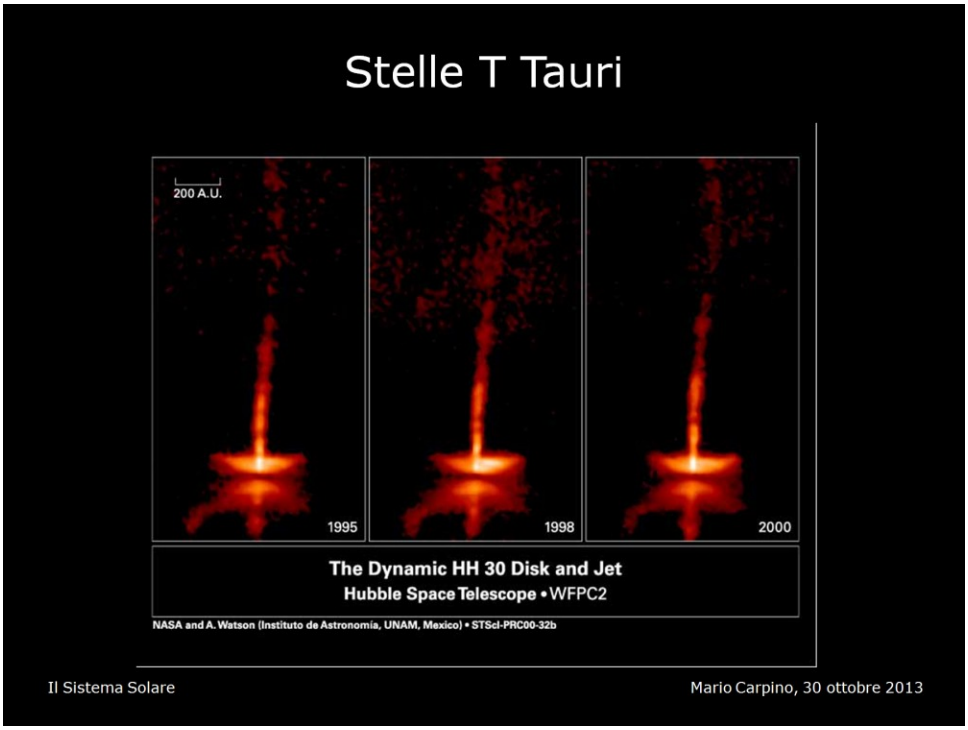
Dischi di polveri sono stati osservati anche intorno ad altre stelle (anche qui si tratta di immagini del telescopio spaziale Hubble).



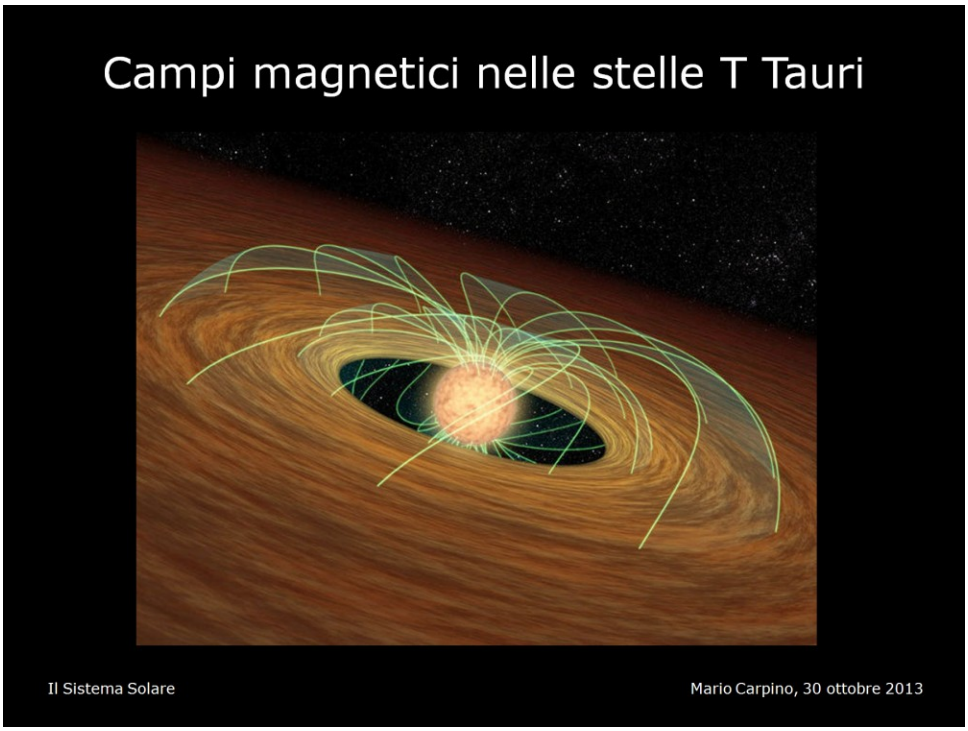
Con l'aumento della sensibilità dei telescopi il numero di casi osservati di stelle circondate da una nube di polvere sta crescendo rapidamente.

Mentre la nebulosa proto-solare si contraeva in forma di disco, le particelle che la formavano iniziarono ad aggregarsi in oggetti sempre più grandi. Per comodità di trattazione descriveremo separatamente cosa avvenne nelle diverse zone della nebulosa, a partire dalla regione più interna; si tenga però sempre presente che questi processi avvennero quasi contemporaneamente.

La zona più interna della nebulosa è quella in cui si condensò la maggior parte del materiale, dando origine a un corpo massiccio di forma approssimativamente sferica che andrà a costituire il Sole. Come è noto, quando un gas viene compresso si riscalda, perché l'energia fornita per la compressione si trasforma in agitazione termica delle molecole. L'enorme quantità di energia fornita dal collasso gravitazionale riscaldò il proto-Sole fino a una temperatura di alcuni milioni di gradi; a queste temperature il gas si ionizza (gli elettroni si staccano dai nuclei atomici) e quindi diventa un buon conduttore di elettricità, e inoltre emette una grande quantità di luce. Un'altra conseguenza del collasso fu che la velocità di rotazione aumentò ulteriormente. Una stella che si trova in questa fase iniziale della sua vita viene chiamata *stella T Tauri* (dal primo oggetto di questo tipo osservato) ed è caratterizzata da un forte campo magnetico (generato dalla combinazione di alta conducibilità elettrica ed elevata velocità di rotazione), da una violenta attività eruttiva e da una forte emissione di particelle (vento solare) soprattutto lungo due "pennacchi" simmetrici orientati lungo l'asse di rotazione.



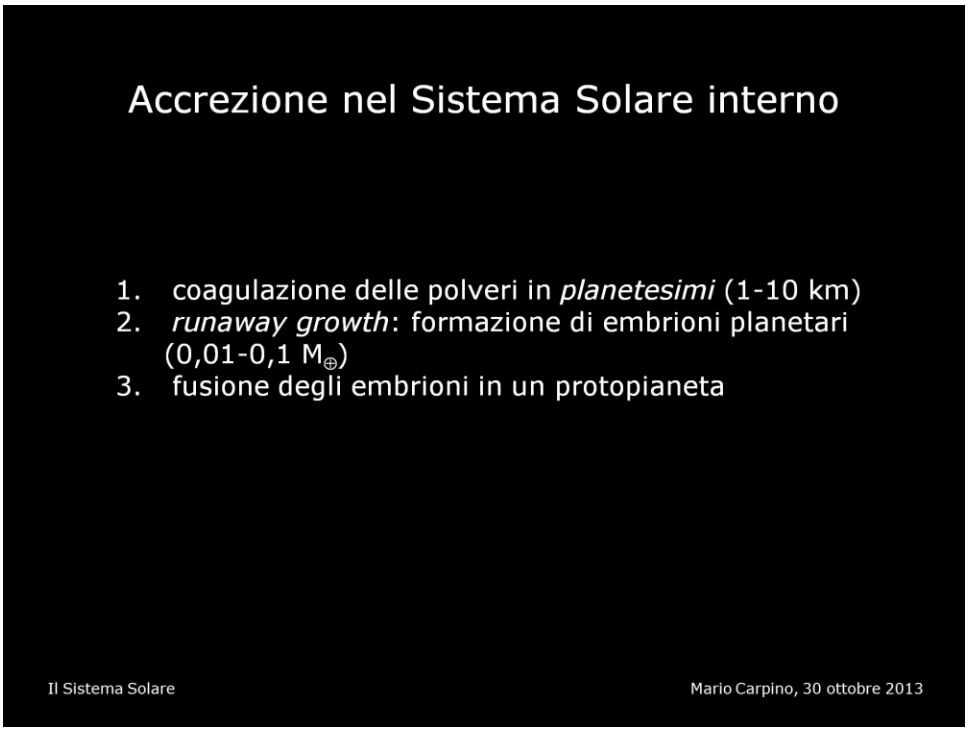
Possiamo osservare diversi esempi di stelle *T Tauri* tra le stelle vicine al Sole; attorno ad esse spesso è visibile anche il disco di polvere da cui sono state generate.



Per potersi contrarre fino alle dimensioni di una stella, la parte centrale della nebulosa deve perdere la maggior parte del suo momento angolare, altrimenti la forza centrifuga associata alla rotazione impedirebbe la contrazione. In effetti attualmente il Sole ruota molto lentamente (ha un periodo di rotazione di circa 25 giorni), per cui la maggior parte del momento angolare del Sistema Solare è concentrata nel moto orbitale dei pianeti, soprattutto dei pianeti giganti. Per molto tempo questo fatto ha costituito un paradosso: come mai il Sole, che contiene la maggior parte della massa del Sistema Solare, e che dovrebbe essere la parte di esso che ruota più velocemente (in quanto si è contratta maggiormente) ha invece un moto di rotazione così lento? La risposta a questo enigma non è ancora del tutto chiara, ma sembra che sia legata ai forti campi magnetici generati dalle stelle *T Tauri*, che sono in grado di trascinare le regioni più interne della nebulosa; ciò avrebbe l'effetto di trasferire momento angolare dalla stella al disco (la rotazione della stella viene frenata accelerando quella del disco).

Quando la temperatura e la pressione interna del proto-Sole raggiunsero valori sufficientemente elevati, nel nucleo del Sole si innescarono spontaneamente reazioni di fusione termonucleare che, trasformano nuclei di idrogeno in nuclei di elio, generano un'enorme quantità di energia, che viene gradualmente trasportata verso l'esterno sotto forma di luce e calore: si può dire che al centro del Sole avviene un'esplosione termonucleare continua, simile a quella delle bombe all'idrogeno, che è però confinata dagli spessi strati di materia che avvolgono il nucleo. Da questo momento il Sole raggiunge una condizione di equilibrio stabile, perché la forte pressione prodotta dall'energia della fusione controbilancia la forza di attrazione gravitazionale e quindi la contrazione si arresta. Il Sole rimarrà in questo stato di equilibrio per molti miliardi di anni, fino a quando le reazioni nucleari avranno convertito in elio tutto l'idrogeno disponibile. Questa condizione di equilibrio dovuta alla conversione dell'idrogeno in elio è lo stato che viene considerato normale per una stella, che in questa lunga fase della sua vita viene chiamata *stella di sequenza principale*.

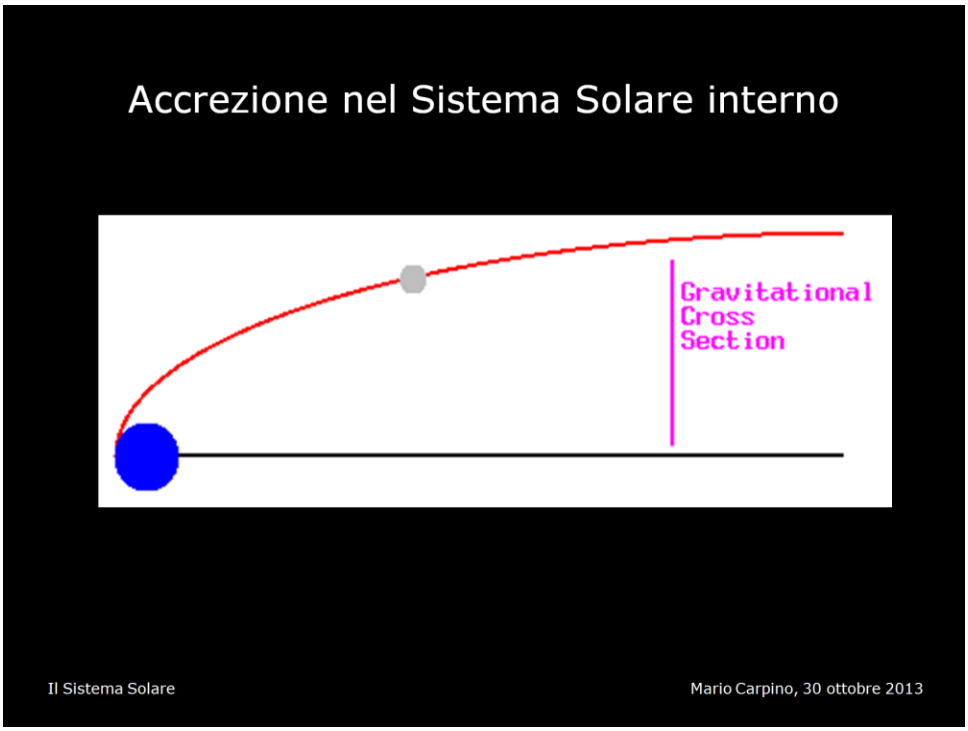
Diamo ora un'occhiata a cosa succedeva nel frattempo nella zona successiva (in ordine di distanza dal centro) della nebulosa proto-solare, cioè alla parte più interna del disco. Mentre il proto-Sole si contraeva, avviandosi alle fasi di *T Tauri* e di sequenza principale, il gas e la polvere che lo circondavano si muovevano su orbite abbastanza ordinate e quasi circolari. In queste condizioni i corpuscoli che componevano la nebulosa avevano collisioni con velocità relativa molto bassa, che favoriva la loro aggregazione in corpi più grandi, come conseguenza dell'attrazione reciproca dovuta a forze chimiche (adesione superficiale) ed elettrostatiche. Si tratta di un meccanismo simile a quello che porta la polvere che si trova nei nostri appartamenti a raccogliersi in batuffoli o ad aderire ai mobili e ai vetri.



Si pensa che la formazione dei pianeti nel Sistema Solare interno sia avvenuta in tre fasi:

1. In una prima fase la polvere si è progressivamente agglomerata in corpi sempre più grandi, fino a formare oggetti delle dimensioni tipiche di alcuni chilometri, chiamati *planetesimi*.
2. Quando i planetesimi hanno raggiunto dimensioni di circa 10 km, anche l'attrazione gravitazionale tra di essi ha iniziato a svolgere un ruolo attivo, accelerando grandemente il processo di accumulazione. Questa fase molto veloce (poche decine di migliaia di anni) è chiamata *runaway growth* (lett. "crescita sfrenata") e ha portato alla formazione di un numero relativamente piccolo di corpi di massa compresa tra un centesimo e un decimo di quella della Terra, chiamati *embrioni planetari*. Queste fasi iniziali di accrescimento si sono interrotte bruscamente per mancanza di altro materiale da aggregare, sia perché la maggior parte del materiale era già stata inclusa nei planetesimi, sia perché il proto-Sole stava attraversando la fase *T Tauri* e il forte vento solare da esso prodotto aveva disperso nello spazio esterno tutto il materiale minuto ancora disponibile.
3. La fase successiva, l'aggregazione dei planetesimi nei protopianeti, è stata più lenta (alcune decine di milioni di anni), perché i pochi embrioni planetari presenti si muovevano su orbite relativamente distanti tra di loro, e quindi le collisioni reciproche erano poco frequenti.

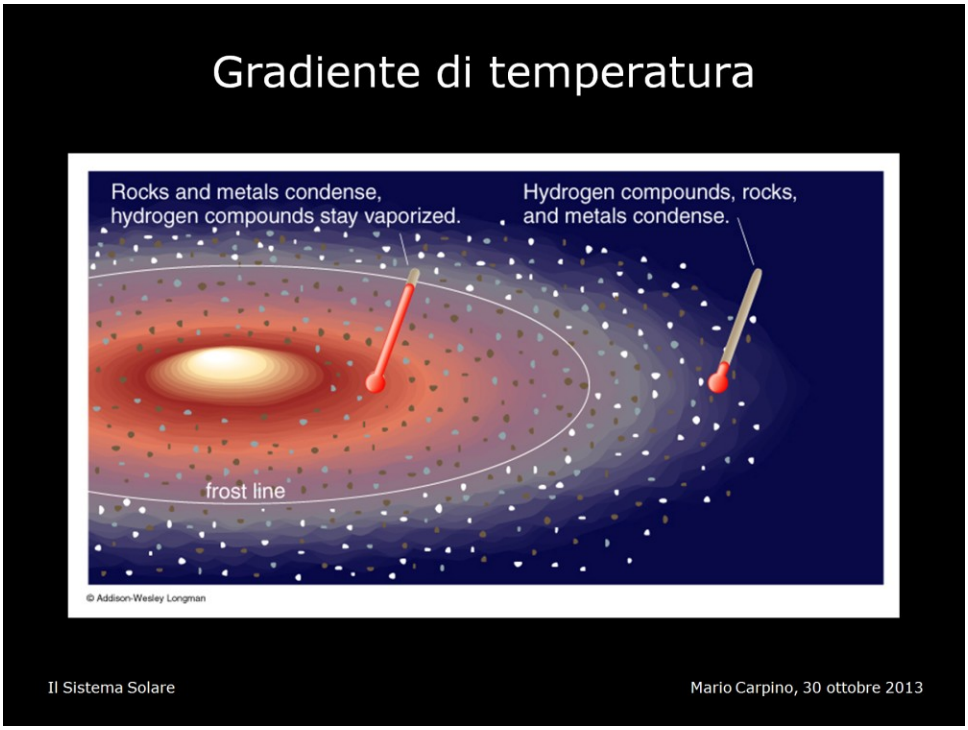
Il numero totale di pianeti che si sono formati in questo modo è, in un certo senso, il numero massimo possibile nello spazio a disposizione. Infatti se due pianeti si muovono su orbite troppo vicine si perturbano a vicenda: le loro orbite vengono deformate (in particolare le eccentricità orbitali aumentano) finché uno dei due entra in collisione con un altro pianeta, oppure ha un incontro ravvicinato che può espellerlo dal Sistema Solare o scagliarlo nel Sole. Alla fine rimangono solo i pianeti le cui orbite sono abbastanza spaziate tra di loro da essere relativamente stabili.



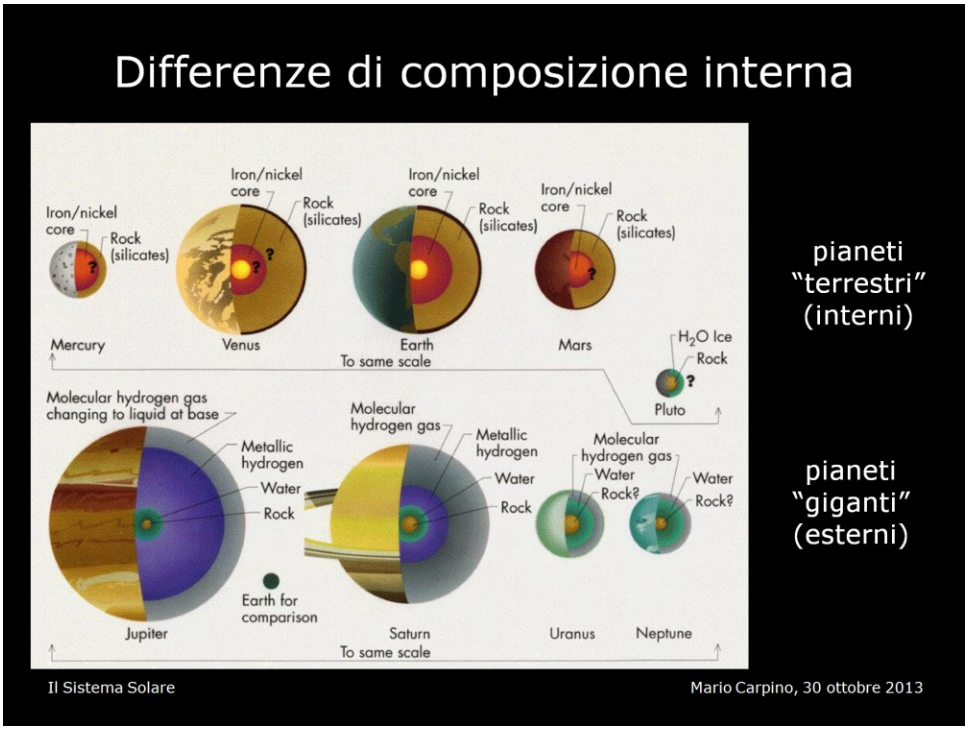
Il meccanismo che ha prodotto il *runaway growth* è la *deflessione gravitazionale* che la traiettoria di un corpo subisce quando passa nelle vicinanze di un pianeta abbastanza grande. A causa di questo fenomeno la *sezione d'urto gravitazionale* di un grosso pianeta (cioè l'area effettiva di raccolta dei frammenti) diventa molto più grande della *sezione d'urto geometrica* (l'area trasversale della sagoma dell'oggetto). È chiaro che questo meccanismo costituisce un effetto di selezione evolutiva che avvantaggia i corpi più grandi che, avendo massa maggiore, sono più efficienti nel raccogliere altro materiale e quindi crescono più velocemente.

Nel Sistema Solare esterno la fase di formazione dei pianeti è durata più a lungo rispetto alle regioni più vicine al Sole, per diverse ragioni:

1. Lo spessore del disco della protonebulosa solare aumentava dal centro verso la periferia, quindi nelle regioni esterne la densità (per unità di volume) del materiale era inferiore.
2. I corpi più lontani dal Sole, per la terza legge di Keplero, hanno periodi orbitali più lunghi, quindi anche la frequenza con cui hanno incontri ravvicinati e collisioni è inferiore.
3. Man mano che ci si allontana dal Sole l'intensità del vento solare diminuisce e quindi il processo di "pulizia" dai residui di gas e polveri è stato meno efficiente.



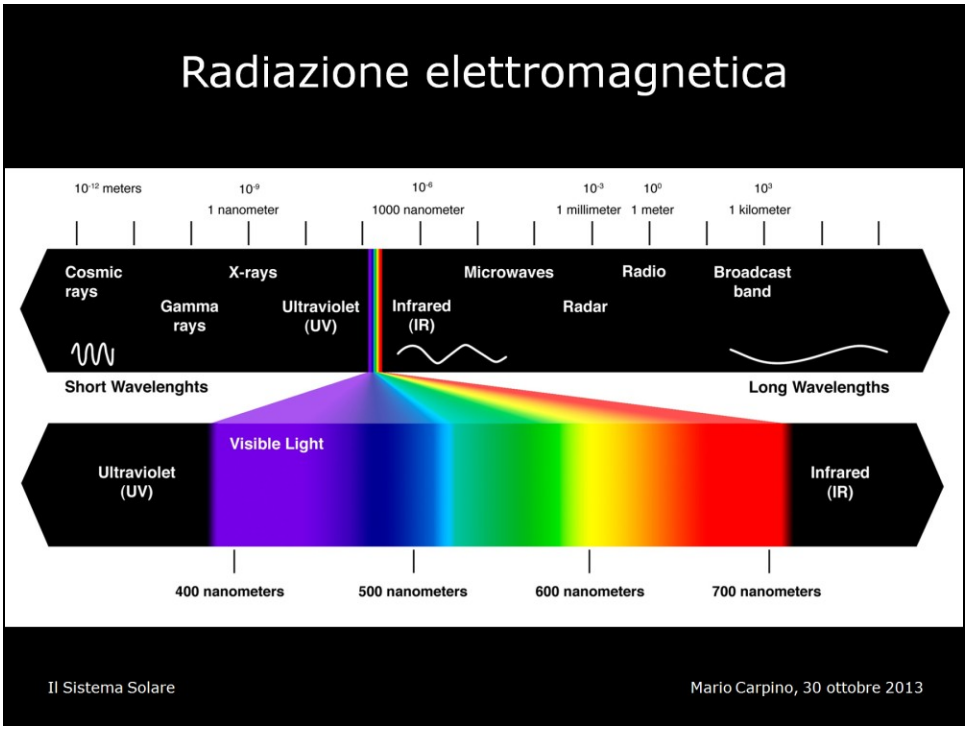
Un altro fattore che ha influenzato il processo di formazione dei pianeti è stata la differenza di temperatura del materiale che costituiva la protonebulosa solare tra le regioni interne, riscaldate dall'intenso irraggiamento del proto-Sole, e quelle esterne, progressivamente più fredde. Per questo motivo molti composti leggeri che nel Sistema Solare interno erano allo stato gassoso, e quindi difficilmente accumulabili nei pianeti che si stavano formando, erano invece solidificati nelle regioni esterne, quindi disponibili come materiale per la formazione dei pianeti.



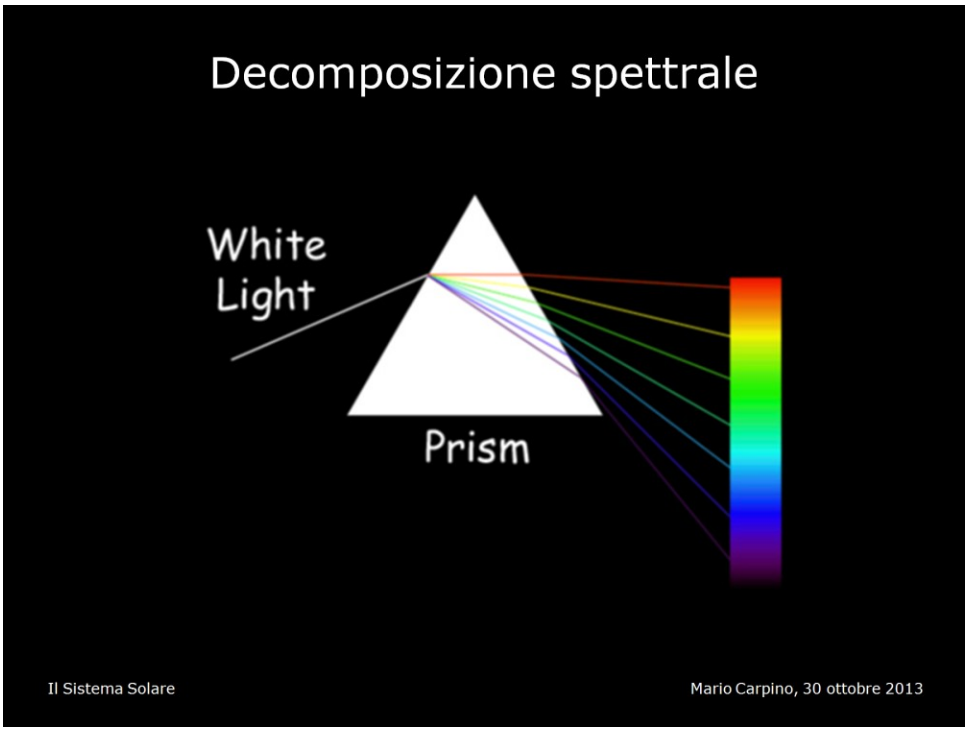
Il fatto che i pianeti esterni siano composti soprattutto da elementi leggeri (soprattutto idrogeno) non significa quindi che, in termini assoluti, il loro contenuto in elementi pesanti sia inferiore a quello dei pianeti terrestri; si pensa anzi che i pianeti giganti possiedano un nucleo roccioso più grande dei pianeti terrestri. Tuttavia i pianeti esterni hanno potuto accumulare, sopra questo nucleo solido, uno spesso strato di elementi leggeri (che, come abbiamo visto , costituivano il 98% del materiale della protonebulosa), cosa che i pianeti interni non hanno potuto fare. Detto in altri termini, mentre la composizione chimica dei pianeti esterni rispecchia quella della protonebulosa, i pianeti interni hanno utilizzato per la loro formazione solo quel 2% di materiale che era rappresentato dagli elementi pesanti.

Capitolo 3: Cenni di spettroscopia.

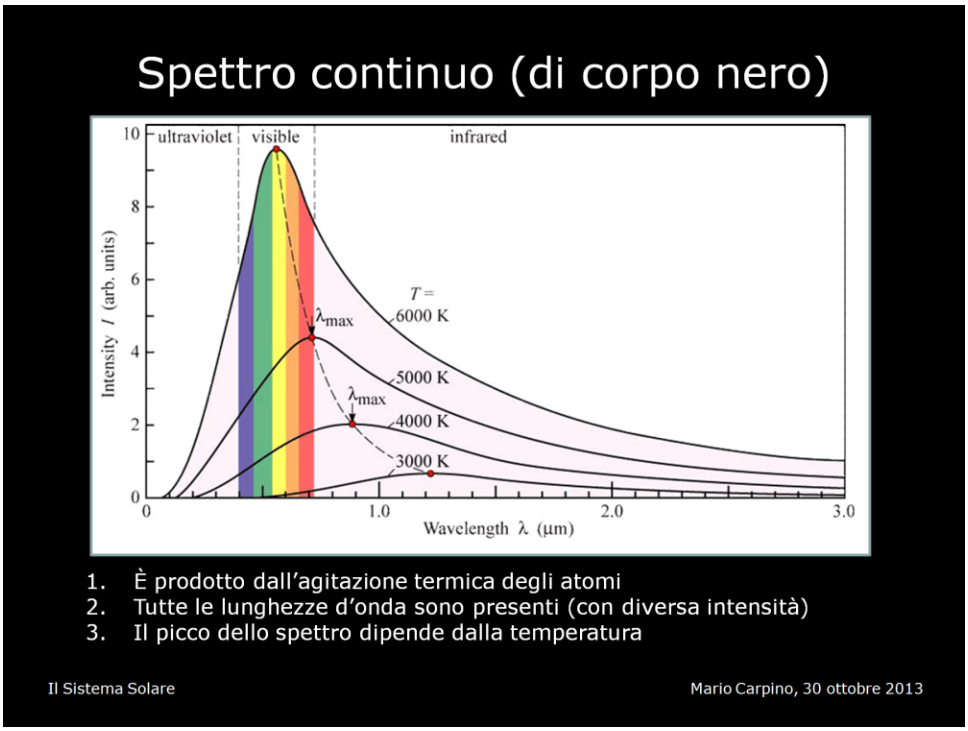
Introduciamo qui alcune nozioni fondamentali di spettroscopia, uno dei metodi più importanti utilizzati nelle osservazioni astrofisiche, perché è alla base anche della scoperta dei pianeti extrasolari e della misurazione delle loro caratteristiche.



La luce visibile è solo una delle manifestazioni della radiazione elettromagnetica, il modo in cui si propagano i campi elettromagnetici prodotti da cariche elettriche in movimento. La radiazione elettromagnetica ha un'energia che dipende dalla sua frequenza (o, in modo equivalente, dalla sua lunghezza d'onda, che è inversamente proporzionale alla frequenza): più alta è la frequenza (più corta è la lunghezza d'onda), maggiore è l'energia. Passando dalle radiazioni più energetiche a quelle meno energetiche, le onde elettromagnetiche vengono classificate in raggi gamma, raggi X, radiazioni ultraviolette, luce visibile, radiazioni infrarosse, microonde e onde radio, anche se da un punto di vista fisico si tratta sempre dello stesso fenomeno. La luce visibile è semplicemente l'intervallo di frequenze delle radiazioni elettromagnetiche a cui l'occhio umano è sensibile. Radiazioni di diversa frequenza vengono percepite dall'occhio come luce di diverso colore: il rosso corrisponde alle frequenze più basse e l'azzurro-violetto a quelle più alte. In generale la luce (o la radiazione elettromagnetica) emessa da una sorgente non è *monocromatica*, cioè non è costituita da un fascio di radiazioni aventi tutte la medesima frequenza, ma è una mescolanza di radiazioni di diversa frequenza (ed energia).



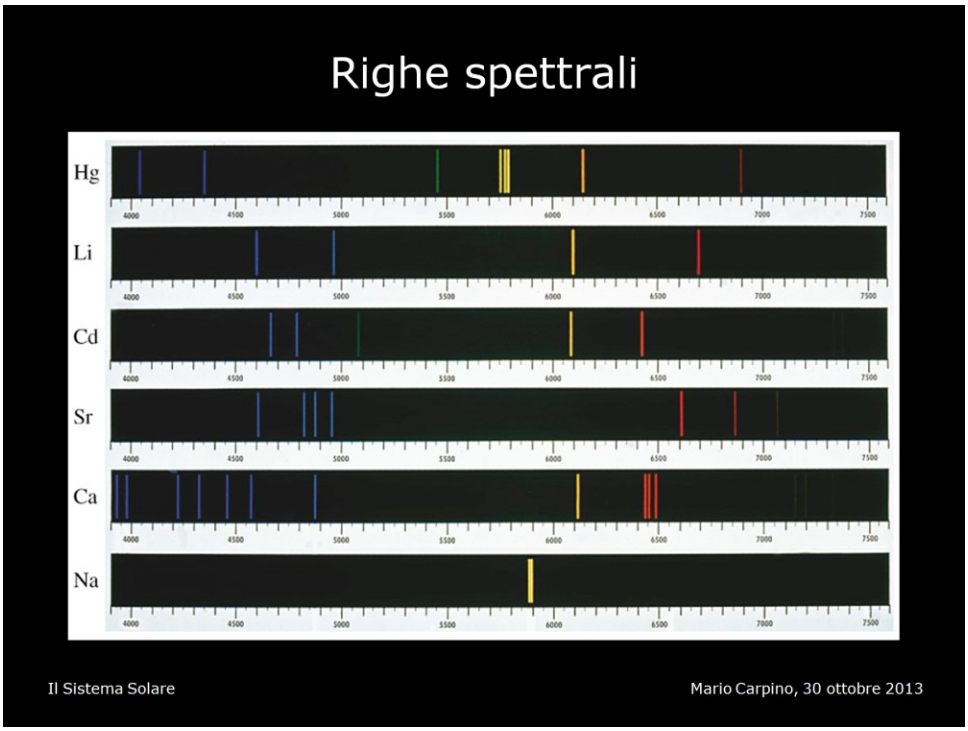
Lo spettroscopio è un dispositivo che consente di suddividere la luce di una sorgente nelle sue diverse componenti monocromatiche. Il sistema più tradizionale consiste nel far passare il fascio di luce attraverso un prisma di vetro, che ha la proprietà di deflettere secondo un angolo diverso le radiazioni aventi frequenza diversa; all'uscita del prisma il fascio di luce viene quindi distribuito lungo una striscia, in cui le componenti di diversa frequenza sono proiettate a differenti distanze lungo la direzione principale della striscia. Si può dire che il prisma rende visibile la differenza di frequenza delle varie componenti della luce, trasformandole in differenza spaziale.



La radiazione elettromagnetica è prodotta dal movimento di particelle cariche, solitamente elettroni, principalmente secondo due meccanismi, chiamati rispettivamente *emissione di corpo nero* ed *emissione di righe spettrali*.

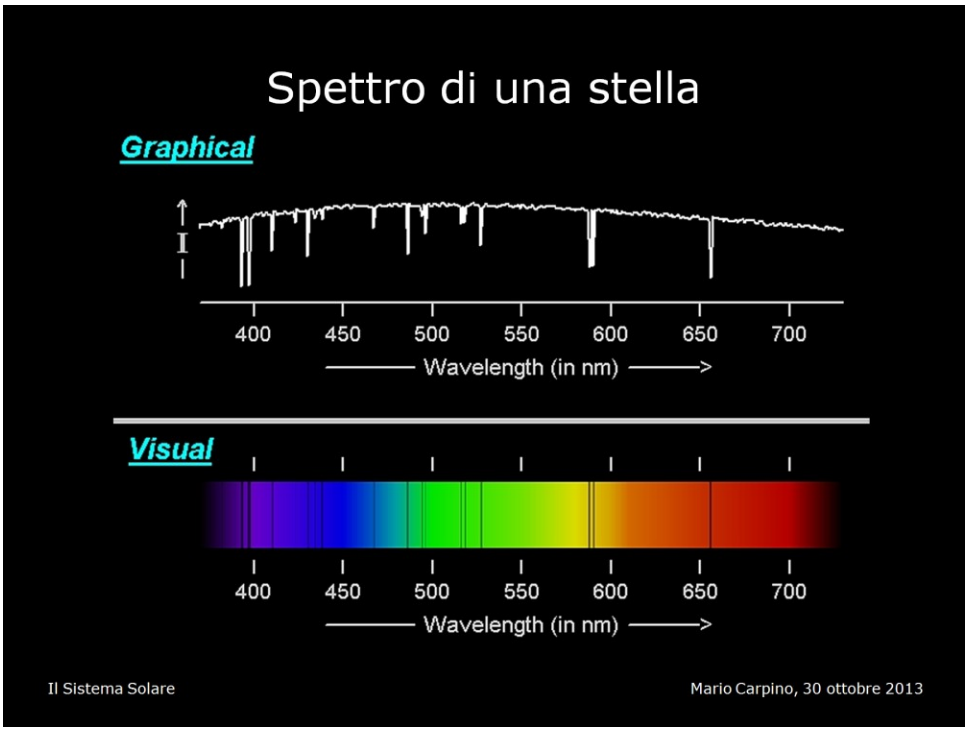
La radiazione di corpo nero è emessa dagli elettroni contenuti nelle molecole di una sostanza come conseguenza della loro agitazione termica. Come è noto il calore è la manifestazione macroscopica dell'agitazione disordinata delle molecole che compongono un corpo, che si spostano (in un gas o in un liquido) o vibrano (in un solido) urtandosi tra di loro e quindi variando continuamente la propria energia cinetica. Parte dell'energia persa nel corso degli urti viene emessa sotto forma di radiazione elettromagnetica. A causa del moto disordinato delle molecole, la radiazione emessa non ha un'energia (frequenza) predefinita ma è costituita da una mescolanza di radiazione entro un intervallo molto ampio di frequenze diverse, anche se esiste una tendenza a emettere radiazione di frequenza più alta da parte dei corpi più caldi, in cui l'agitazione termica è maggiore.

Lo spettro di corpo nero si presenta quindi come una distribuzione continua di radiazione in cui sono presenti tutte le frequenze, ma che presenta un picco di intensità massima a una frequenza che è tanto maggiore quanto maggiore è la temperatura del corpo. Questo fenomeno è visibile anche a occhio nudo quando si scalda un pezzo di metallo alla fiamma: man mano che la sua temperatura sale esso comincia a emettere luce di un colore che passa dal rosso cupo, al rosso-arancio, al giallo, al bianco e all'azzurro. La mescolanza di colori prodotta da un corpo nero a una temperatura uguale a quella della superficie del Sole (5800 gradi Kelvin) corrisponde alla regione dello spettro a cui l'occhio umano è maggiormente sensibile e viene percepita come bianco. Non si tratta ovviamente di una coincidenza: l'occhio umano si è evoluto in modo da adattarsi alla radiazione che aveva a disposizione.

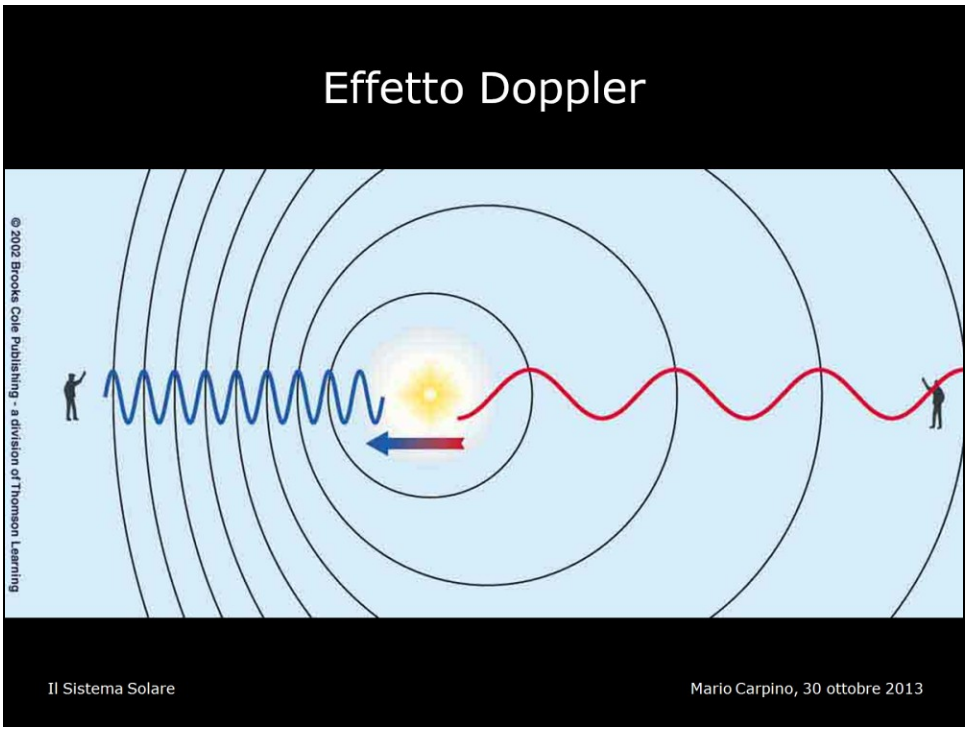


Gli spettri a righe sono invece prodotti dagli elettroni che saltano tra diversi livelli energetici (orbitali) nel loro moto attorno ai nuclei degli atomi. Quando il passaggio avviene verso un livello meno energetico di quello di partenza, l'eccesso di energia viene emesso sotto forma di radiazione elettromagnetica; inversamente l'assorbimento di energia da un fascio di radiazione che colpisce l'atomo può provocare il passaggio dell'elettrone e un livello di energia superiore. Poiché i diversi orbitali dell'atomo corrispondono a livelli di energia ben definiti, la radiazione emessa o assorbita possiede solo alcune frequenze particolari e viene visualizzata nello spettro come un insieme di *righe* sottili. Negli spettri stellari sono molto comuni le righe di assorbimento, che sono dovute al fatto che la radiazione di corpo nero, prodotta dalla superficie calda della stella, viene filtrata dagli strati esterni dell'atmosfera stellare: gli atomi presenti in queste regioni vengono eccitati a livelli energetici più elevati, sottraendo radiazione della frequenza corrispondente. Le *righe di assorbimento* appaiono nello spettro come righe oscure, cioè intervalli di frequenza in cui l'intensità della radiazione è inferiore a quella delle zone spettrali vicine. In altri casi gli atomi del gas che compone la stella possono essere eccitati a livelli energetici superiori (ad esempio dalle collisioni reciproche, conseguenza dell'agitazione termica quando la temperatura è molto elevata) che possono poi decadere ai livelli di partenza, emettendo la differenza di energia come radiazione. In tali casi lo spettro dell'astro presenterà *righe di emissione*, cioè intervalli di frequenza in cui l'intensità della radiazione è particolarmente intensa.

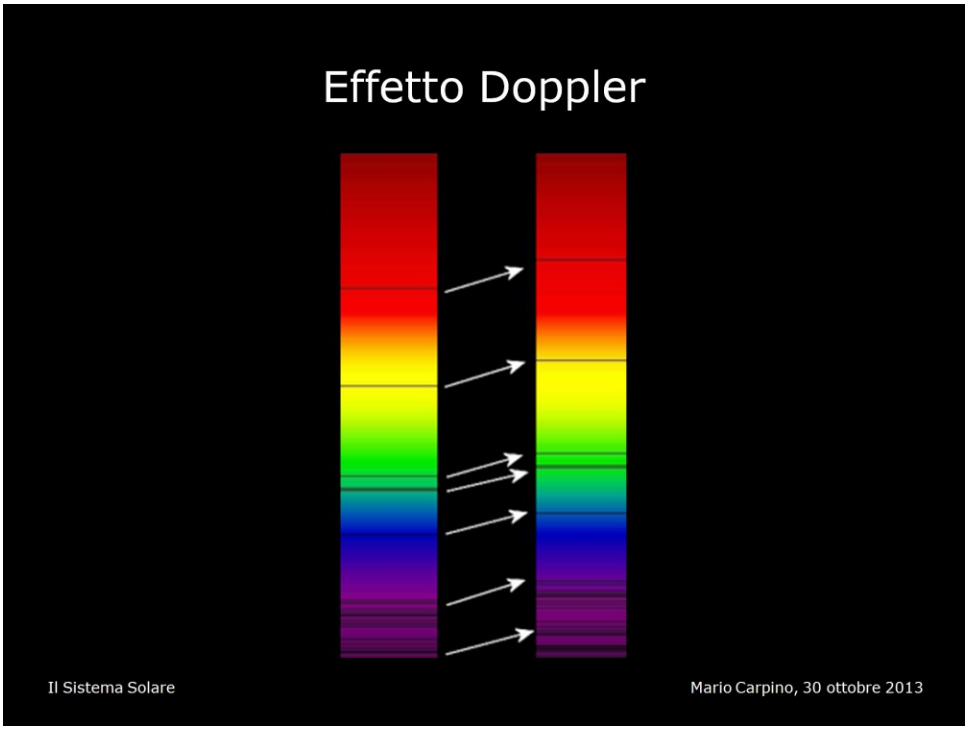
In ogni caso le righe spettrali (sia in emissione che in assorbimento) sono localizzate solamente alle frequenze che corrispondono alle differenze di energia dei livelli atomici, che sono diversi per ogni elemento chimico. Ogni elemento chimico produce una configurazione di righe spettrali caratteristica e ben riconoscibile, che costituisce una specie di "impronta digitale" di quell'elemento nello spettro.



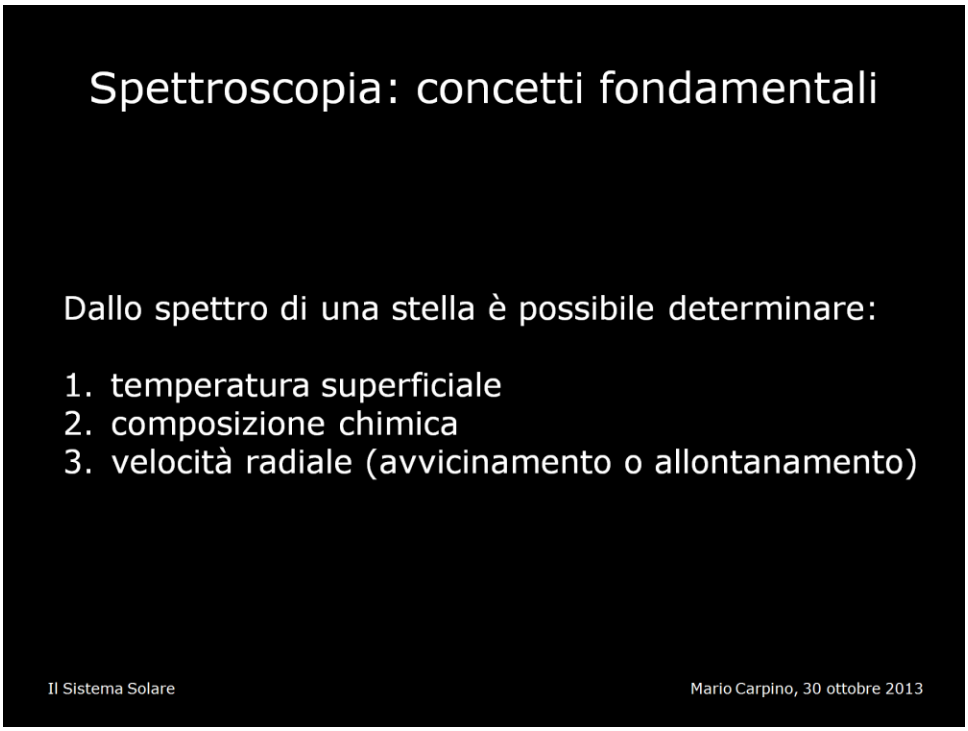
In generale lo spettro di una stella consiste quindi di un fondo continuo, prodotto dalla radiazione di corpo nero della superficie luminosa, a cui sono sovrapposte più righe (in assorbimento e/o in emissione), che sono la somma delle righe prodotte dai vari elementi chimici che costituiscono l'atmosfera stellare. L'analisi delle diverse righe spettrali, e in particolare il loro confronto con gli spettri dei diversi elementi chimici prodotti in laboratorio, permette di determinare la composizione chimica della stella (o, più precisamente, la composizione chimica degli strati attraverso cui è passata la radiazione che riceviamo).



La radiazione elettromagnetica emessa da una sorgente viene ricevuta da un osservatore alla stessa frequenza alla quale è stata emessa solamente se la sorgente e l'osservatore sono in quiete l'uno rispetto all'altro. In caso contrario la radiazione ricevuta ha una frequenza superiore quando la sorgente si avvicina all'osservatore, inferiore quando se ne sta allontanando; la differenza in frequenza è tanto maggiore quanto maggiore è la velocità. Questo effetto, che si chiama *effetto Doppler*, non è esclusivo della radiazione elettromagnetica ma è comune a ogni forma di propagazione ondulatoria; ad esempio si verifica anche per le onde sonore. È questo il motivo per cui il suono della sirena di un'ambulanza ci sembra più acuto (ha frequenza maggiore) quando l'ambulanza sta venendo verso di noi rispetto a quando si sta allontanando. Si noti che l'effetto Doppler viene prodotto unicamente da uno spostamento in *direzione radiale* della sorgente rispetto all'osservatore (allontanamento o avvicinamento): uno spostamento in direzione tangenziale non produce alcuna variazione di frequenza. Facendo riferimento allo spettro visibile l'effetto Doppler viene anche indicato con i nomi di *spostamento verso il rosso* o *red-shift* (in caso di allontanamento) e *spostamento verso il blu* o *blue-shift* (avvicinamento).



Il confronto della frequenza misurata di una riga spettrale nella luce ricevuta da una stella con la frequenza della stessa riga emessa da una sorgente in quiete (ad esempio da una sorgente campione in laboratorio) permette quindi di calcolare la velocità radiale (di avvicinamento o di allontanamento) della sorgente rispetto alla Terra. Si noti che per eseguire questo confronto è necessario utilizzare una riga spettrale (in emissione o in assorbimento): lo spettro di corpo nero, presentandosi come una distribuzione priva di punti di riferimento, non permette questa misurazione.



In definitiva l'analisi dello spettro di una stella permette di determinarne:

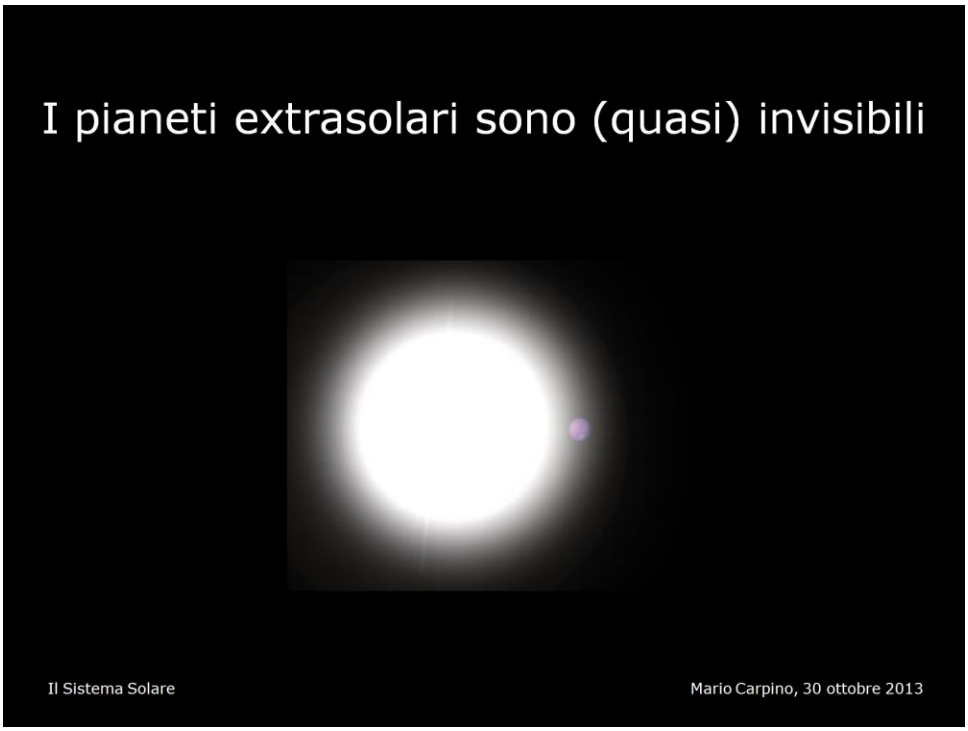
1. La temperatura superficiale (attraverso la determinazione del picco di intensità della radiazione di corpo nero).
2. La composizione chimica (attraverso l'individuazione delle diverse righe spettrali presenti).
3. La velocità radiale di avvicinamento o allontanamento da noi (attraverso la misura dell'effetto Doppler sulle righe spettrali).

Inoltre lo spettro di una stella fornisce anche una stima abbastanza precisa della sua massa, sebbene in modo più indiretto. Infatti le caratteristiche spettrali di una stella (e in particolare la sua temperatura superficiale) sono direttamente legate alla sua massa, in quanto la massa determina la pressione e densità delle regioni centrali e quindi le condizioni in cui avvengono le reazioni di fusione nucleare che riscaldano la stella. La relazione tra caratteristiche spettrali e massa è nota sia sulla base di modelli matematici, sia attraverso l'osservazione di stelle aventi caratteristiche simili in sistemi stellari binari, dove la misurazione dei periodi orbitali permette la determinazione della massa attraverso le leggi di Keplero.

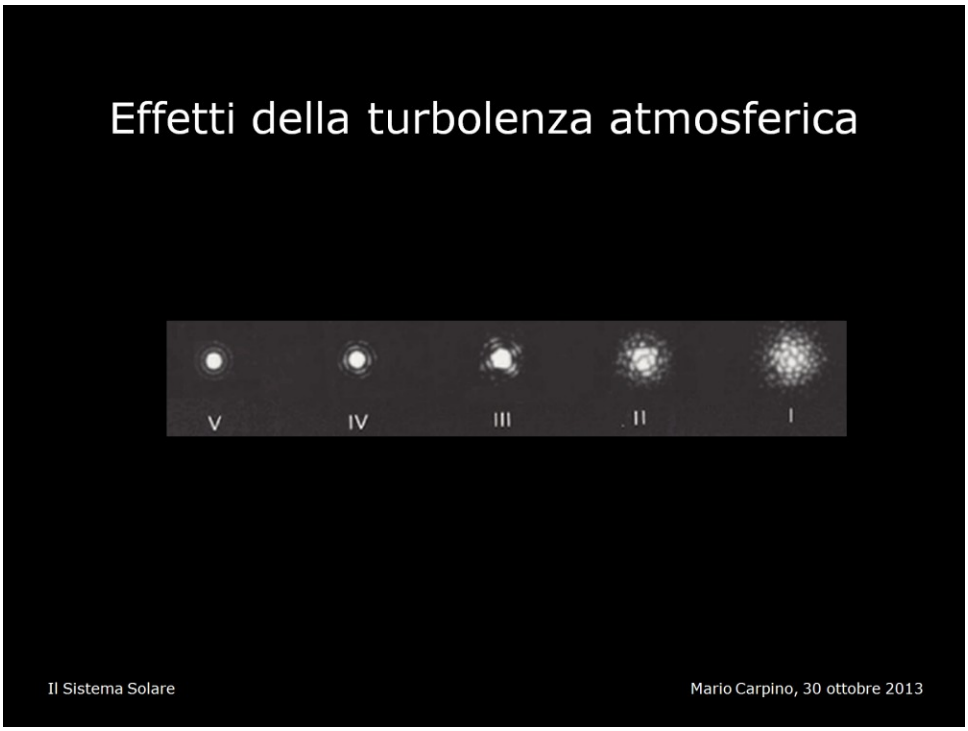
Capitolo 4: Detezione e caratteristiche dei pianeti extrasolari.

La scoperta di pianeti extrasolari, cioè di pianeti che orbitano attorno a stelle diverse dal nostro Sole, è una delle scoperte più recenti dell'astronomia, in quanto risale all'ultimo decennio del XX secolo. In realtà già da molto tempo gli astronomi sospettavano o credevano nell'esistenza di pianeti extrasolari, in base a considerazioni di carattere generale: ad esempio il meccanismo con cui si pensa si sia formato il nostro Sistema Solare, descritto precedentemente, non presenta alcun carattere di eccezionalità tale da far ritenere che non possa essersi verificato anche attorno ad altre stelle.

Tuttavia la rivelazione in senso proprio di un pianeta extrasolare non è stata possibile fino a quando l'evoluzione tecnologica ha messo a disposizione degli astronomi strumenti sufficientemente precisi ed estremamente sensibili (in particolare spettrografi e fotometri), e questo si è verificato solo in anni recenti.

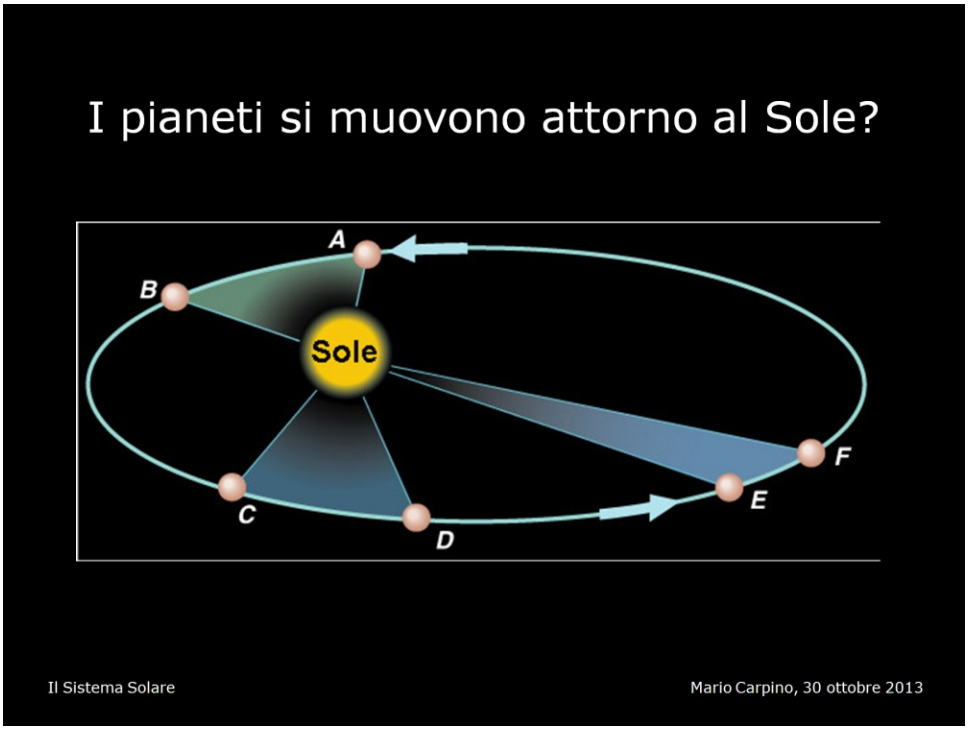


Infatti un pianeta extrasolare è un oggetto difficilissimo da osservare direttamente: si tratta di un corpo di piccole dimensioni, che non emette luce propria, e che si muove vicinissimo (per noi che lo osserviamo da distante) a una stella enormemente più luminosa. Questa situazione è rappresentata in forma schematica dall'immagine qui riprodotta (si badi bene: si tratta di un disegno di fantasia e non di una fotografia reale). Nella stragrande maggioranza dei casi (con pochissime eccezioni, e solo da pochi anni) un pianeta extrasolare non può essere *osservato* in senso stretto, cioè non è possibile averne un'immagine, anche se è possibile dimostrarne l'esistenza e studiarne le caratteristiche con metodi più o meno indiretti. Per questa ragione, al fine di evitare equivoci, nel corso di questa presentazione si preferisce parlare di *metodi di detezione* piuttosto che di *osservazioni*.

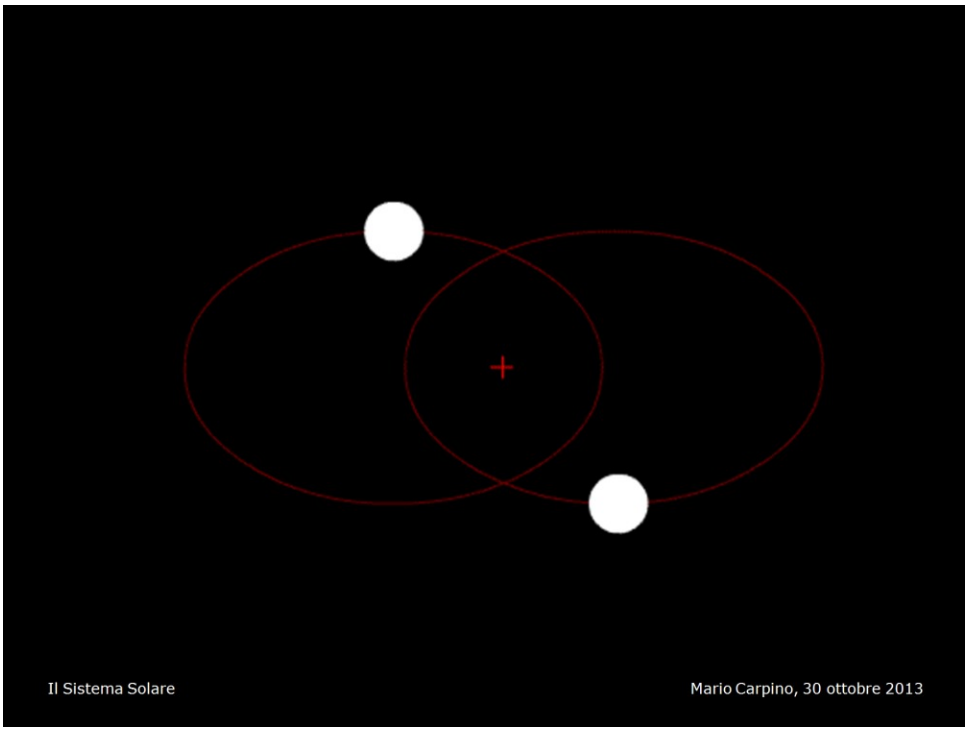


Una grossa limitazione alla possibilità di osservazione diretta dei pianeti extrasolari è costituita dall'atmosfera terrestre. La luce proveniente dalle stelle, prima di arrivare al telescopio, passa attraverso vari strati d'aria che ne cambiano leggermente la direzione per effetto della rifrazione, secondo angolazioni che variano velocemente nel tempo a causa della turbolenza atmosferica. Di conseguenza l'immagine della stella perde il suo aspetto quasi puntiforme e diventa una regione diffusa dai contorni indefiniti e tremolanti. È un po' come osservare l'immagine di un sasso sul fondo di un ruscello attraverso i movimenti della vena d'acqua che gli scorre sopra. A causa di questo processo di "sfuocamento" dell'immagine stellare risulta quindi quasi impossibile rilevare le immagini di pianeti molto vicini alla stella.

Per questo motivo i metodi più efficaci per la ricerca, l'individuazione e la determinazione dei pianeti extrasolari non si basano sull'osservazione visuale diretta, ma su metodi indiretti. Nel corso degli anni sono stati utilizzati metodi diversi, che si basano su principi fisici differenti. Nel seguito esamineremo solo i due metodi che si possono considerare come i più importanti sia da un punto di vista storico (in quanto sono stati tra i primi a essere utilizzati), sia perché sono quelli che si sono dimostrati più efficienti (la maggior parte dei pianeti extrasolari oggi conosciuti sono stati scoperti e studiati con questi metodi): il *metodo spettroscopico* e il *metodo fotometrico*.

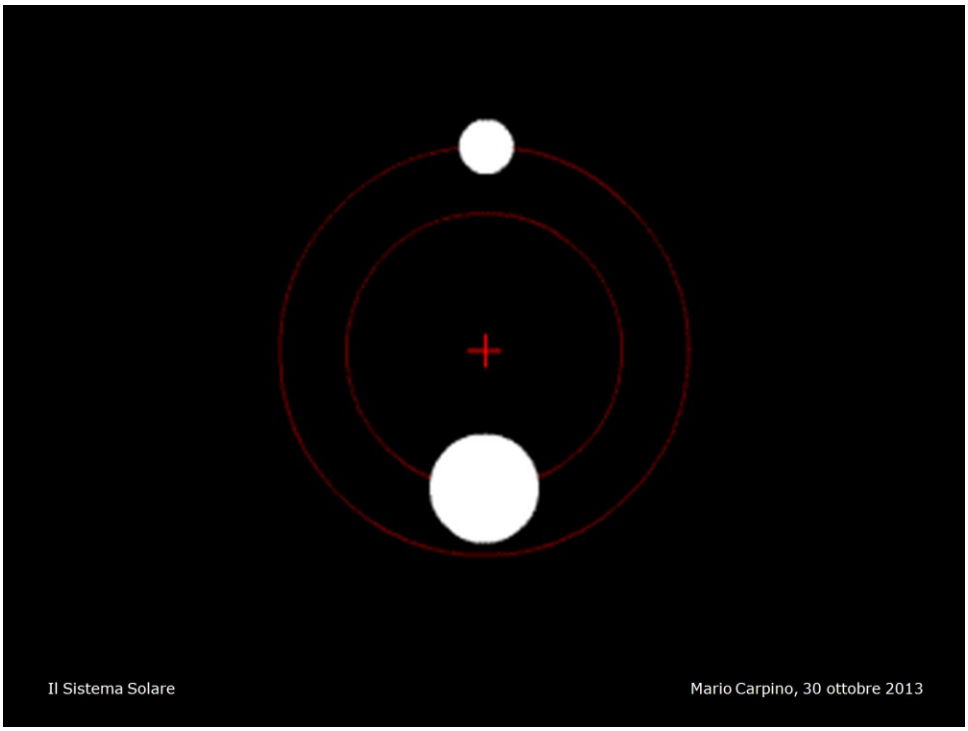


Si dice comunemente che un pianeta si muove sulla sua orbita attorno a una stella, la quale invece rimane immobile: ad esempio, la Terra si muove e il Sole rimane fermo. In realtà questa è solo un'approssimazione di una realtà un po' più complessa.

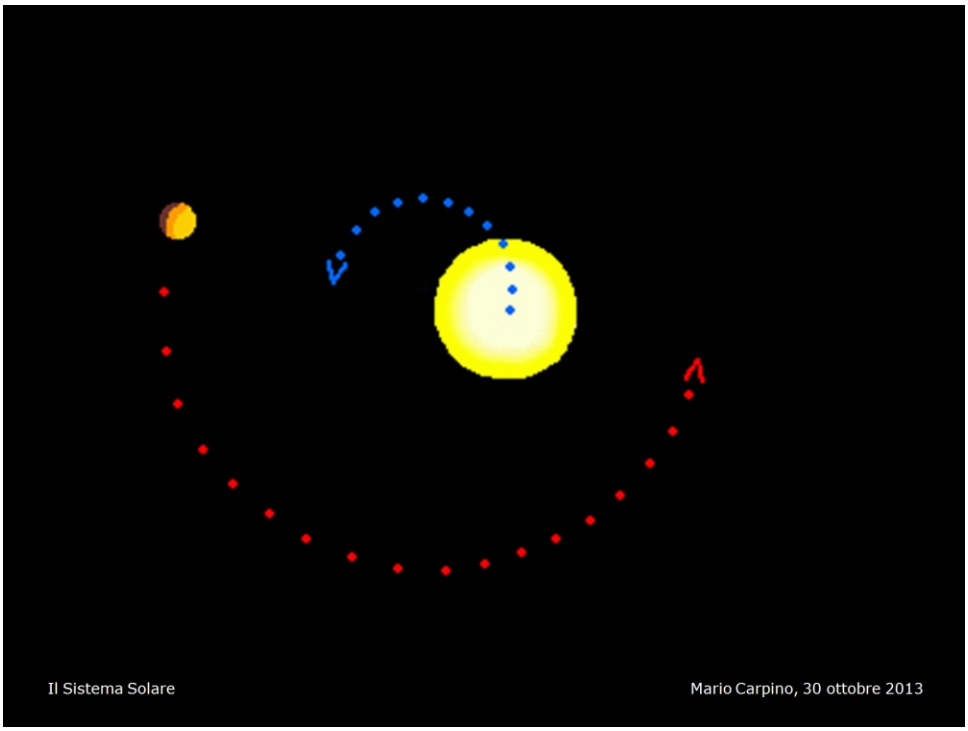


Pensare che, quando due corpi sono legati gravitazionalmente, solo uno di essi si muova mentre l'altro rimane immobile conduce a dei paradossi. Ad esempio se i due corpi hanno massa uguale (come avviene a volte per sistemi binari formati da due stelle) quale dei due si muove e quale rimane immobile, e per quale motivo?

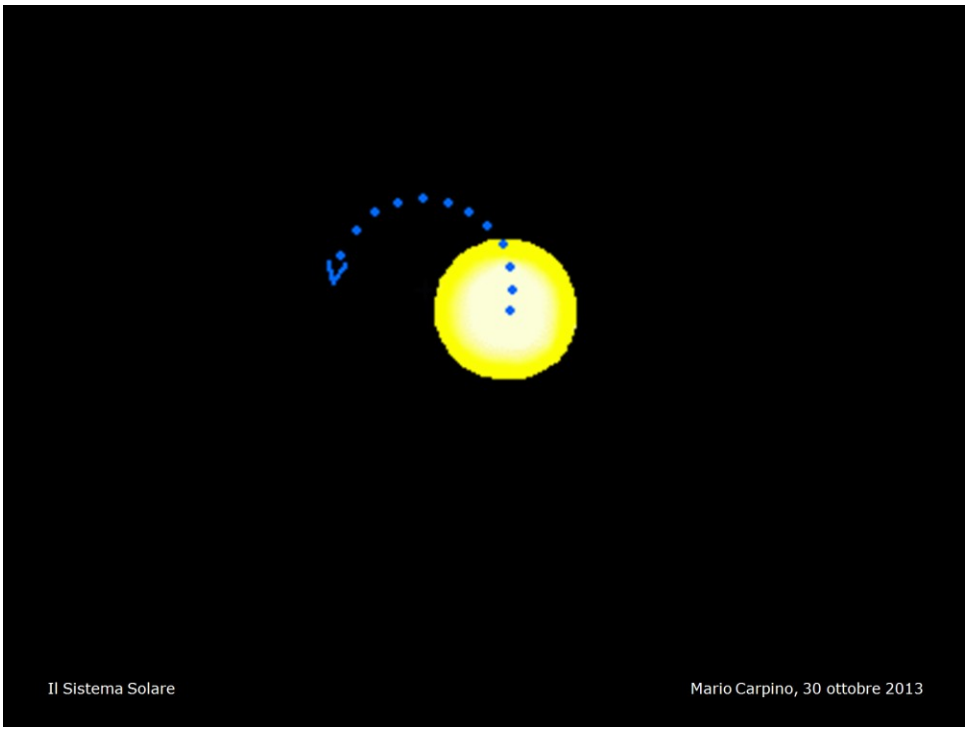
In realtà quello che succede è che entrambi i corpi si muovono, percorrendo orbite simili attorno al loro centro di massa (che rimane immobile o si muove di moto rettilineo uniforme, secondo il principio di inerzia). Se i due corpi hanno massa uguale il loro centro di massa è situato a metà strada sul segmento che li congiunge, e i due corpi percorrono attorno ad esso orbite esattamente uguali in opposizione di fase (si tratta ovviamente di orbite kepleriane, cioè ellittiche).



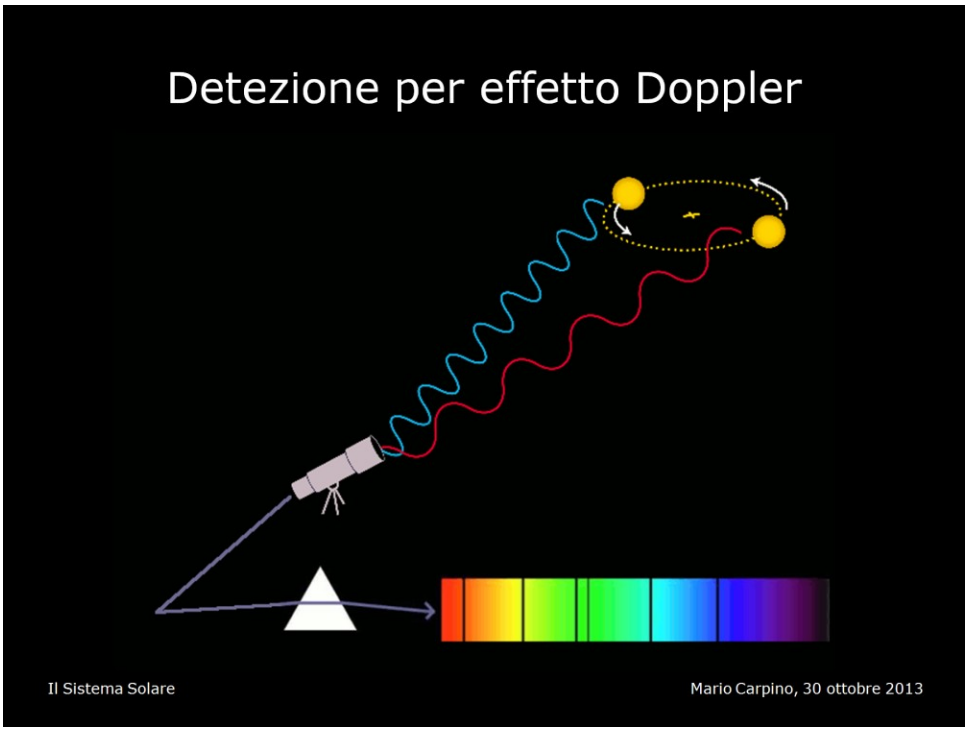
Se i due corpi hanno massa diversa succede una cosa simile: i due corpi orbitano attorno al loro centro di massa, ma il centro di massa (sempre situato sul segmento che congiunge i due corpi) è più vicino al corpo che ha massa maggiore; per la precisione, la distanza di ciascuno dei corpi dal centro di massa è inversamente proporzionale alla sua massa. Le orbite che i due corpi percorrono attorno al centro di massa sono quindi *uguali nella forma* (sono entrambe ellissi aventi la stessa eccentricità), sono ancora in opposizione di fase, ma hanno dimensioni diverse (i semiassi maggiori sono inversamente proporzionali alle masse). Anche nel caso del sistema Terra-Sole non è del tutto esatto dire che il Sole è immobile e la Terra compie un'orbita attorno ad esso. In realtà sia il Sole che la Terra hanno il proprio movimento orbitale, tranne che il Sole ha una massa circa 300 mila volte superiore a quella della Terra e quindi il semiasse maggiore della sua orbita è 300 mila volte più piccolo di quello della Terra, e per molti aspetti risulta trascurabile.



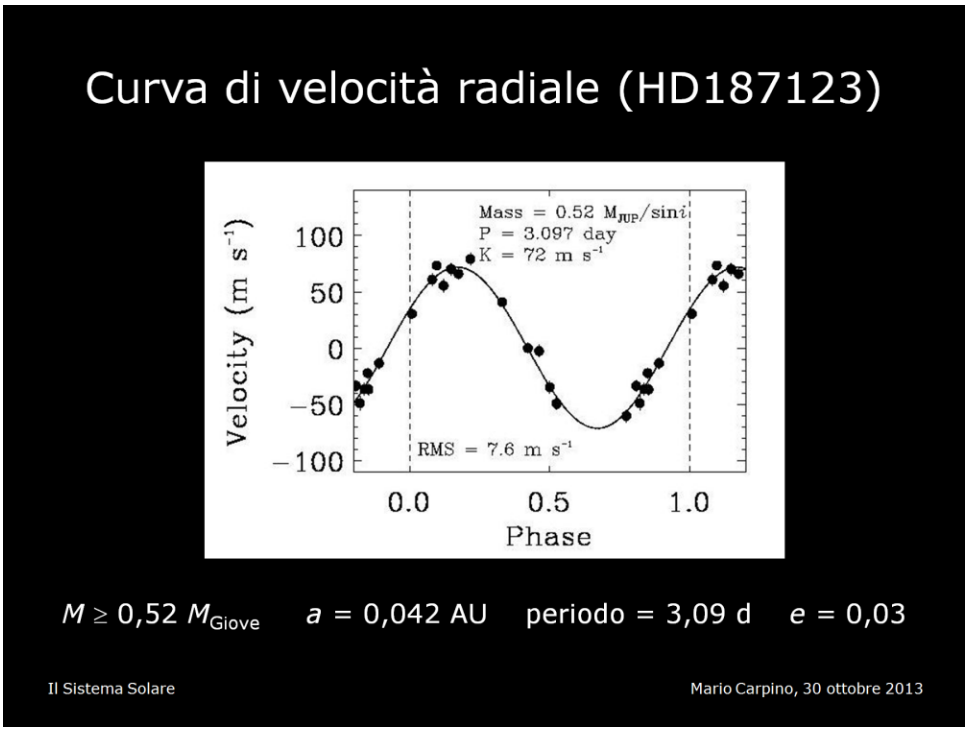
La stessa cosa succede nel caso dei pianeti extrasolari; se una stella ha un pianeta, sia la stella che il pianeta descrivono un'orbita ellittica; il rapporto tra le dimensioni delle orbite è legato al rapporto tra le masse stella/pianeta.



Anche se il pianeta extrasolare risulta invisibile, esso manifesta la propria presenza attraverso il (piccolo) moto orbitale che esso induce nella stella, che può essere evidenziato e misurato.

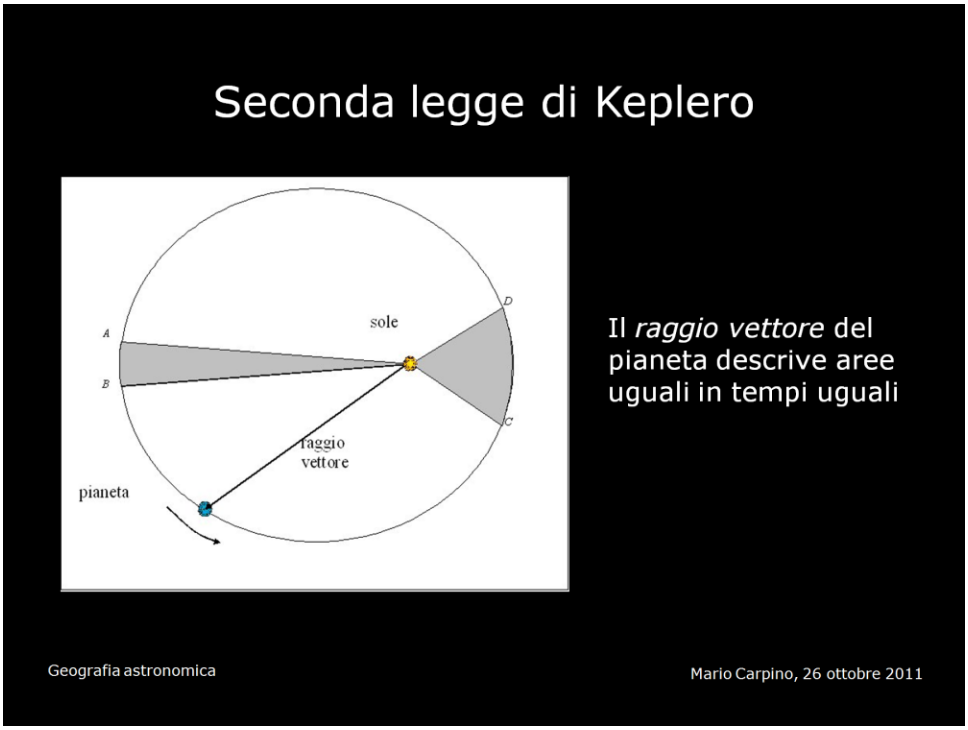


Se il piano orbitale del sistema stella-pianeta non è esattamente ortogonale alla linea di vista, il moto orbitale della stella ha una componente radiale, cioè produce una variazione periodica nella velocità di allontanamento o avvicinamento della stella che può essere evidenziata e misurata grazie all'effetto Doppler, come uno spostamento periodico delle righe spettrali della stella, alternativamente verso il rosso e verso il blu. Un progetto di ricerca di pianeti extrasolari basato sulla spettroscopia richiede quindi l'osservazione spettroscopica ripetuta di un grande numero di stelle e il confronto degli spettri della stessa stella presi a tempi diversi per evidenziare un possibile spostamento delle righe dovuto alla presenza di un pianeta. Quando una stella mostra variazioni spettrali, viene osservata ripetutamente al fine di studiare le variazioni temporali della velocità radiale.



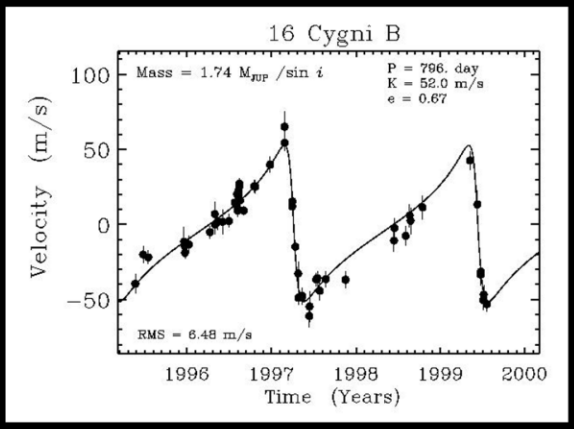
Il dato primario fornito dal metodo spettroscopico è quindi una *curva di velocità radiale*, cioè una curva che mostra, nel modo più dettagliato possibile, come varia la velocità di avvicinamento-allontanamento della stella in funzione del tempo. Poiché la massa della stella è nota in base alle sue caratteristiche spettroscopiche, la curva di velocità radiale fornisce:

1. Il *periodo orbitale* del sistema stella-pianeta (è semplicemente il tempo trascorso tra due massimi successivi della curva).
2. Il *semiasse maggiore* dell'orbita, deducibile dal periodo orbitale in base alla terza legge di Keplero.
3. La *massa* del pianeta, che si può calcolare in base al fatto che la distanza della stella dal centro di massa del sistema (e quindi anche la sua velocità orbitale) è proporzionale alla massa del pianeta. In realtà, poiché la misura della sola componente radiale della velocità non permette di stabilire l'inclinazione del piano orbitale rispetto alla linea di vista, la massa determinata in questo modo è solo un limite inferiore, corrispondente al caso in cui l'orbita viene osservata "di taglio"; infatti quando l'orbita è inclinata rispetto alla linea di vista la velocità radiale è solo una frazione della velocità orbitale totale, e quindi il valore corrispondente della massa del pianeta sarebbe maggiore.
4. L'*eccentricità* dell'orbita, che può essere dedotta da un'analisi della *forma* della curva di velocità radiale.



Per quanto riguarda la determinazione dell'eccentricità orbitale ricordiamo che, in base alla seconda legge di Keplero, la velocità di un corpo celeste lungo un'orbita ellittica non è costante ma è maggiore quando il corpo si trova nel punto dell'orbita più vicino al corpo primario (*periastro*) e minore quando il corpo è più lontano (*apoastro*), e che questa differenza di velocità è tanto più grande quanto maggiore è l'eccentricità dell'orbita. Un'orbita di bassa eccentricità (quasi circolare) viene percorsa a velocità quasi costante e produce una curva di velocità radiale di forma quasi sinusoidale come quella mostrata nella figura precedente …

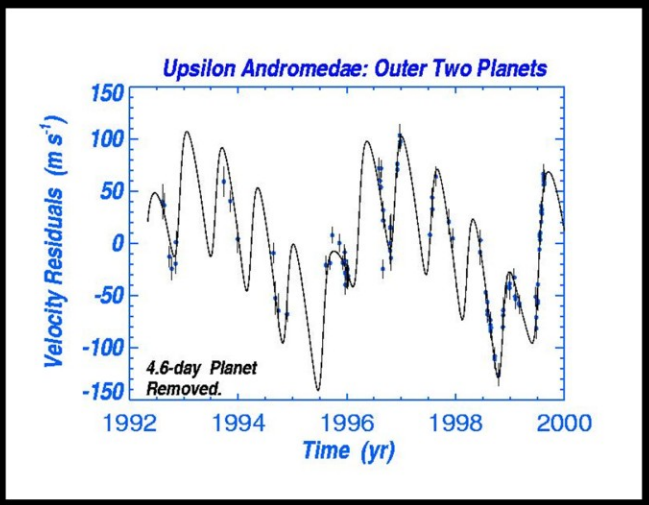
Curva di velocità radiale (16 *Cyg* B)



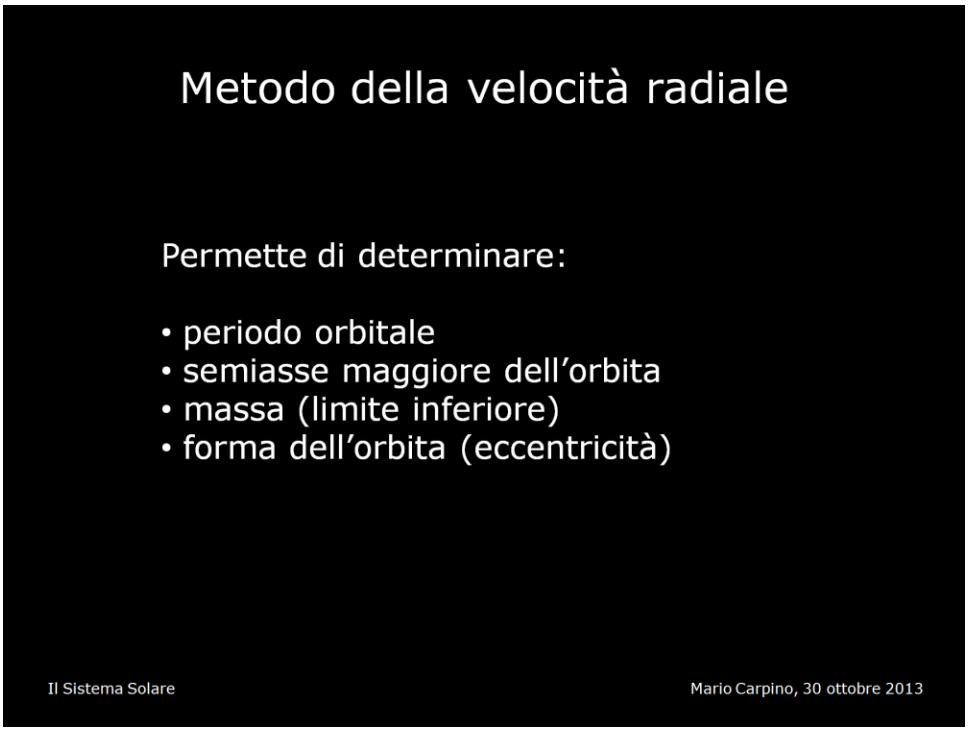
$M \geq 1{,}5\ M_{\text{Giove}}$ $a = 1{,}72$ AU periodo = 804 d $e = 0{,}63$

… mentre un'orbita fortemente ellittica produce una curva di velocità radiale asimmetrica, che alterna con regolarità periodi in cui la velocità è elevata a periodi in cui è più bassa. Un'analisi matematica di tale asimmetria permette di calcolare l'eccentricità orbitale.

Curva di velocità radiale (υ And)

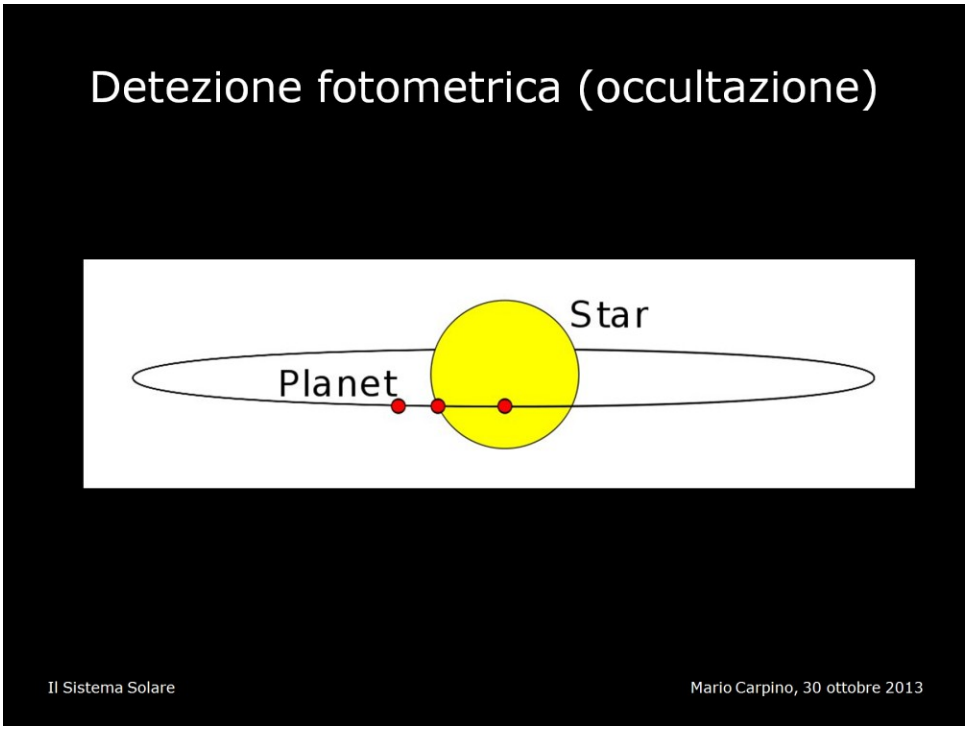


Nel caso in cui attorno alla stella orbitino più pianeti, il movimento della stella è dato dalla sovrapposizione dei singoli moti orbitali e appare quindi come la somma di segnali distinti aventi diversa periodicità . Anche in questo caso le caratteristiche delle diverse orbite possono essere dedotte attraverso un opportuno trattamento matematico.



In definitiva il metodo spettroscopico permette di determinare i seguenti parametri di un pianeta extrasolare:

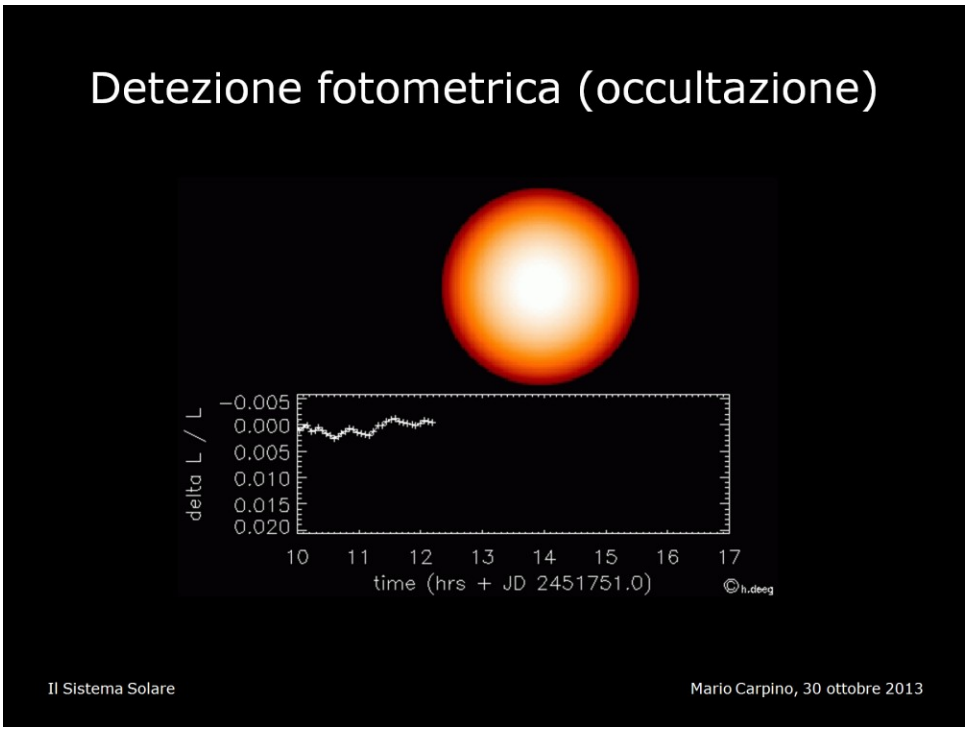
1. Periodo di rivoluzione orbitale.
2. Semiasse maggiore dell'orbita (distanza dalla stella).
3. Un limite inferiore (valore minimo) della massa.
4. Eccentricità dell'orbita.



Un altro metodo importante per la rivelazione dei pianeti extrasolari è il *metodo fotometrico*, che funziona solo quando l'orbita del pianeta è vista quasi di taglio, in modo che il pianeta a ogni rivoluzione passa davanti al disco stellare, occultando una parte della luce che riceviamo dalla stella.

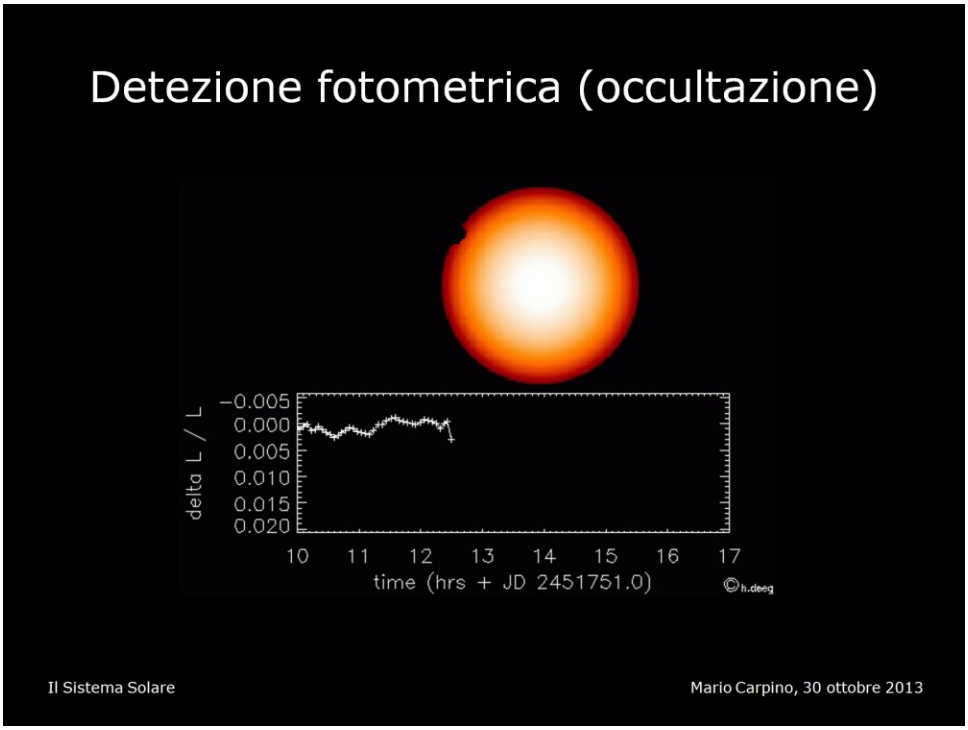
Un fenomeno del genere può essere osservato direttamente nel caso dei pianeti interni del Sistema Solare (ad esempio la fotografia qui riprodotta si riferisce al transito di Venere sul Sole avvenuto nel 2004) ma non nel caso di altre stelle, a causa della loro enorme distanza: non è possibile risolvere la forma della stella, che ci appare come una sorgente puntiforme, né tantomeno osservare su di essa la piccola macchia oscura costituita dalla sagoma del pianeta. È possibile però cercare di misurare la variazione di luminosità totale della stella prodotta dall'occultazione parziale e da essa ricavare informazioni sul pianeta.

Una campagna di ricerca di pianeti extrasolari basata su questo metodo richiede quindi di misurare con grande precisione la luminosità di un vasto campione di stelle, ripetendo periodicamente le misurazioni nel tentativo di evidenziare piccole variazioni di luminosità. Le stelle che mostrano variazioni vengono poi osservate in modo sistematico al fine di ottenere la loro *curva di luce* (cioè un grafico che mostra la luminosità in funzione del tempo) e interpretarla, escludendo che i cambiamenti di luminosità siano dovuti a cause diverse dall'eclisse di un pianeta.

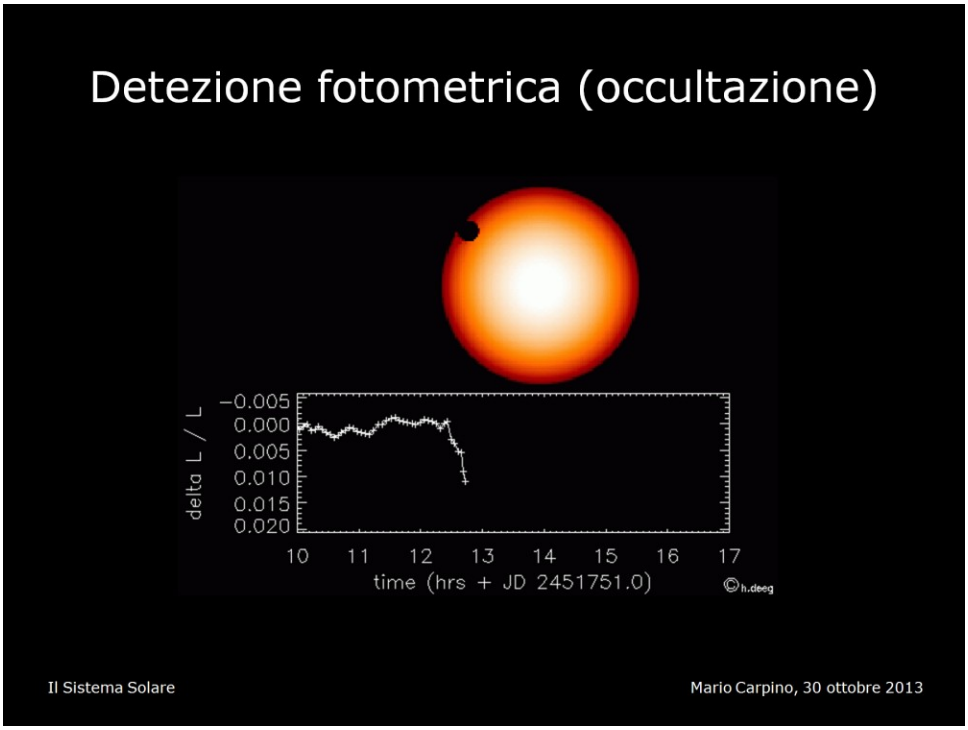


Vediamo ora in dettaglio cosa avviene durante il passaggio del pianeta sul disco stellare. Si presti attenzione al fatto che, in questa figura come nelle successive, la parte inferiore rappresenta il grafico delle variazioni di luminosità in funzione del tempo, che è l'unica quantità osservata; la parte superiore è un disegno che fornisce l'interpretazione del dato osservativo (o, se volete, è una rappresentazione di come apparirebbe l'occultazione se potessimo avvicinarci sufficientemente alla stella).

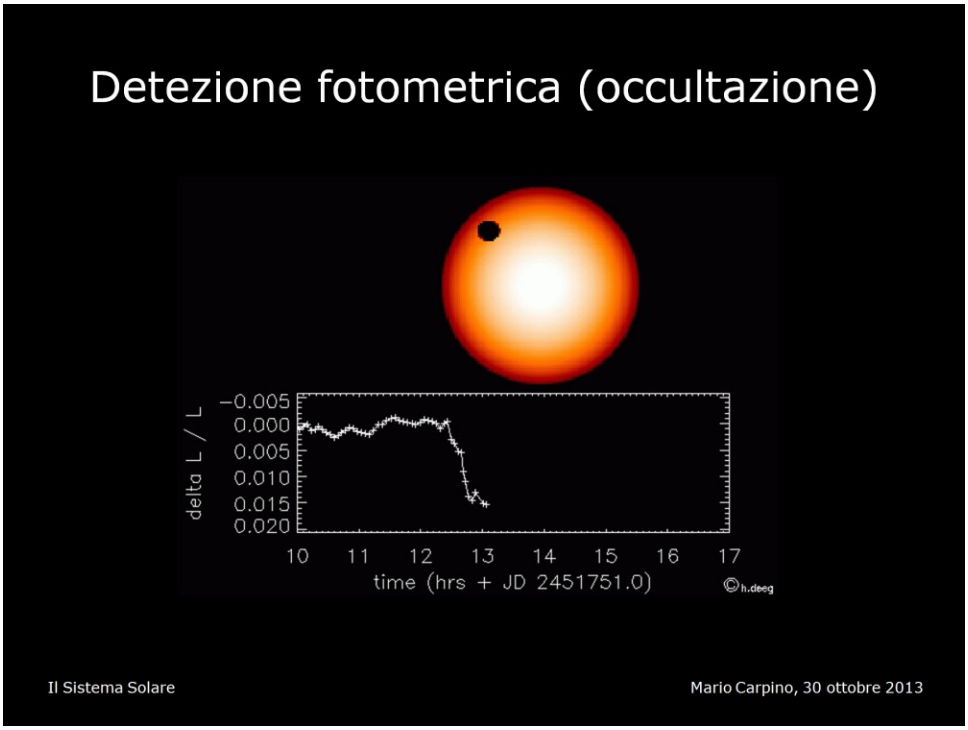
Prima dell'inizio dell'occultazione la luminosità della stella è costante; le lievi fluttuazioni della misura che si vedono nel grafico sono causate dalla turbolenza dell'atmosfera terrestre, che è una delle principali limitazioni alla precisione di questo tipo di osservazioni.



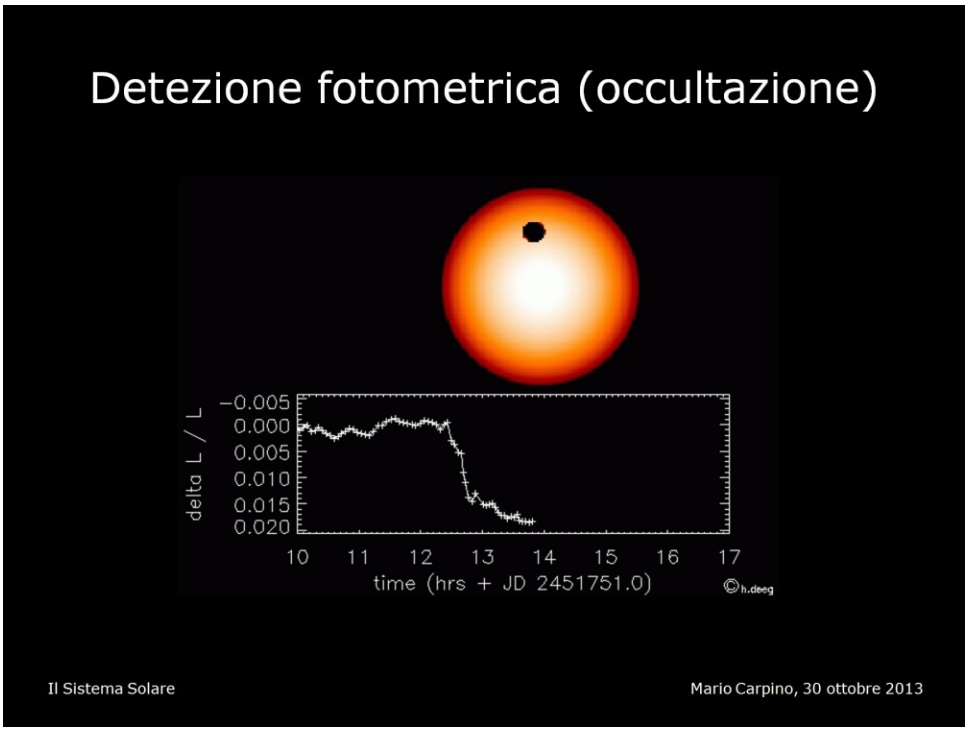
Quando il disco oscuro del pianeta comincia a occultare la stella, schermando una parte della luce che ci giunge da essa, la luminosità inizia a diminuire. La fase dell'occultazione qui riprodotta è chiamata tecnicamente *primo contatto*, e corrisponde all'istante in cui il disco del pianeta è tangente esternamente al disco stellare.



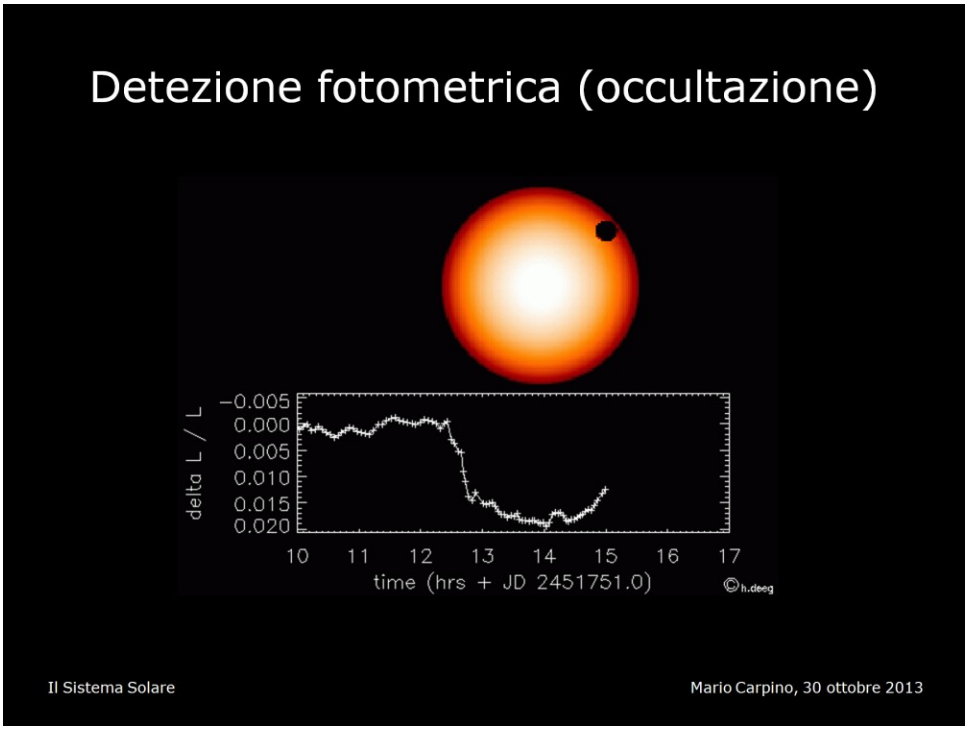
La luminosità continua a diminuire fino a quando tutto il disco del pianeta arriva a occultare la stella (*secondo contatto*: il disco del pianeta è tangente *internamente* al disco stellare).



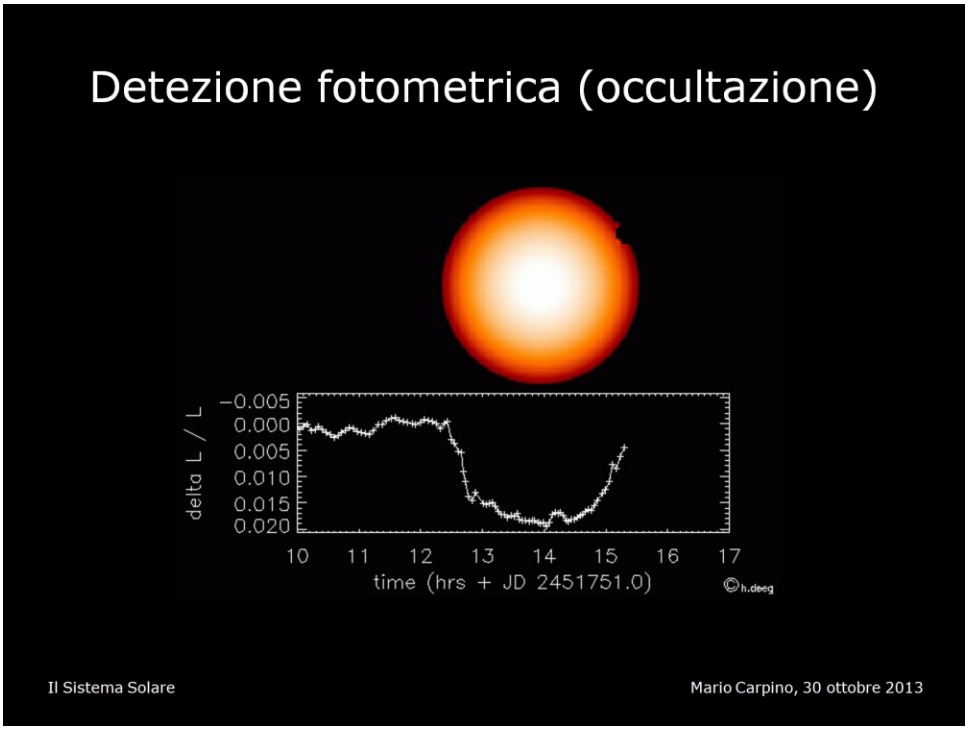
Dal secondo contatto in poi la luminosità rimane approssimativamente costante.



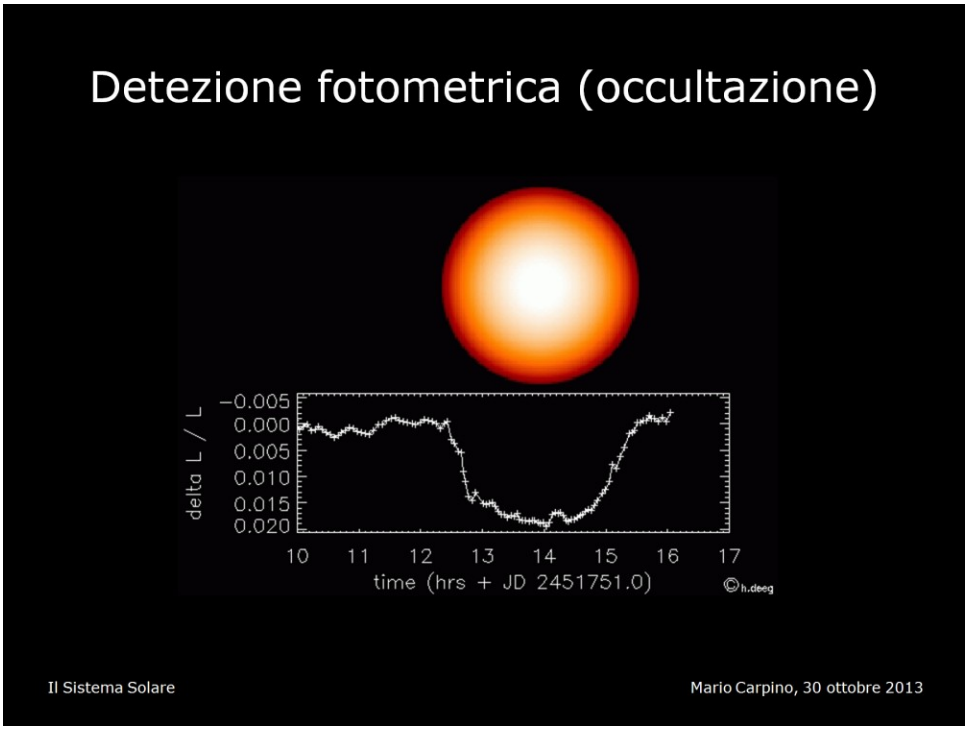
Una lieve variazione della luminosità durante il transito del pianeta sulla stella è dovuta al fatto che il bordo della stella ci appare meno luminoso della regione centrale. Questo fenomeno è chiamato *oscuramento al bordo* ed è causato dal fatto che, nelle vicinanze del bordo, vediamo la superficie della stella secondo una direzione quasi tangente e la luce che da essa ci arriva deve attraversare uno strato più spesso dell'atmosfera stellare; quindi riusciamo a vedere solo gli strati più superficiali (più freddi e meno luminosi) dell'atmosfera stellare. L'oscuramento al bordo è chiaramente visibile anche nella fotografia del transito di Venere sul Sole mostrata più sopra.



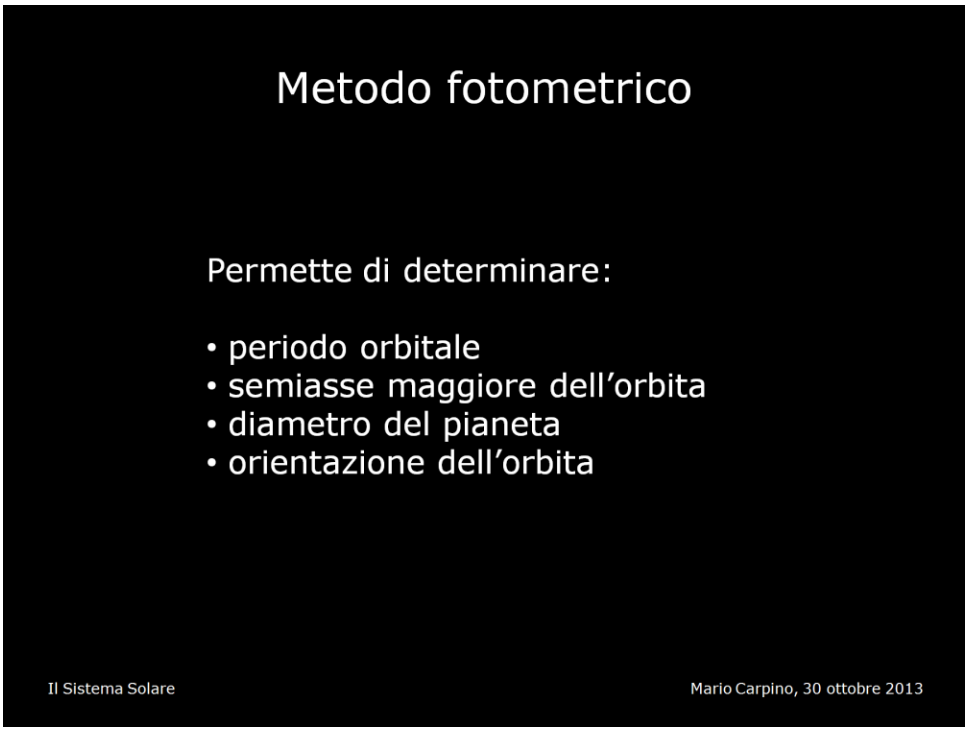
Alla fine del transito si ripetono in senso inverso i fenomeni visti all'inizio. Al *terzo contatto* (disco del pianeta tangente internamente al disco stellare) la luminosità ricomincia a crescere …



… e dopo il *quarto contatto* (disco del pianeta tangente esternamente al disco stellare) …



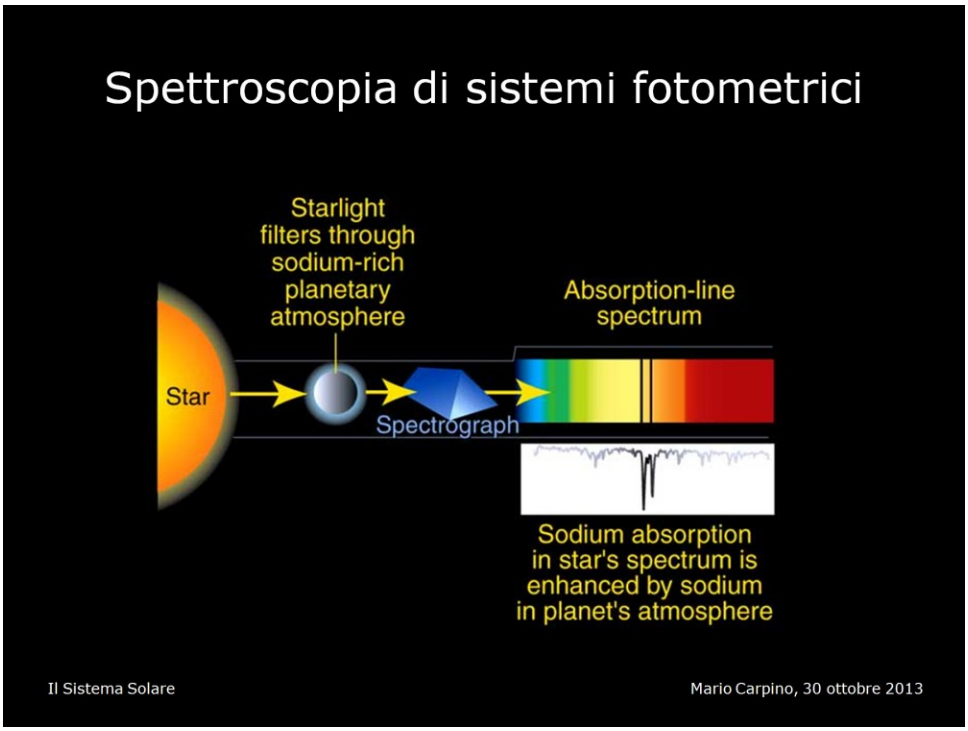
… la luminosità ritorna al valore che aveva prima dell'inizio dell'occultazione.



L'analisi della curva di luce prodotta dall'occultazione permette quindi di ricavare le seguenti informazioni sul pianeta extrasolare:

1. Il periodo orbitale (il tempo che intercorre tra due occultazioni successive).
2. Il semiasse maggiore dell'orbita, che può essere calcolato dal periodo orbitale in base alle leggi di Keplero.
3. Il diametro del pianeta, che può essere dedotto dal tempo impiegato dal suo disco a occultare completamente la stella (cioè dal tempo che trascorre tra il primo e il secondo contatto, istanti che sono ben individuabili sulla curva di luce).
4. L'orientazione dell'orbita (perché l'occultazione possa avvenire, il piano orbitale deve essere quasi parallelo alla linea di vista).

Una condizione particolarmente favorevole si ha quando un pianeta extrasolare può essere osservato contemporaneamente sia con il metodo spettroscopico (curva di velocità radiale) sia con quello fotometrico (curva di luce), perché in tal caso è possibile integrare le diverse informazioni fornite dai due metodi. Ad esempio, conoscendo l'orientazione dell'orbita a causa del verificarsi delle eclissi è possibile rimuovere l'indeterminazione sulla stima della massa del pianeta fornita dal metodo spettroscopico, che in questo caso determina la vera massa e non un suo valore minimo; combinando le determinazioni di massa e di diametro è poi possibile dedurre la *densità* del pianeta, grandezza fisica molto importante in quanto legata alla sua composizione chimica.

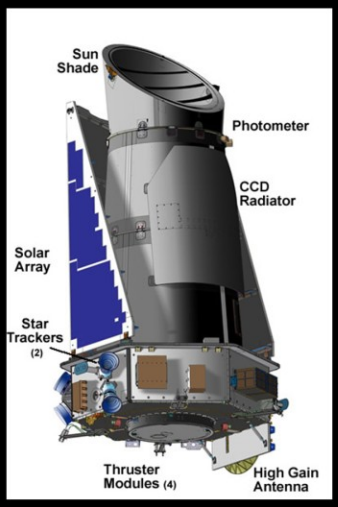


In alcuni casi è possibile raccogliere informazioni ancora più precise sul pianeta eseguendo osservazioni spettroscopiche durante l'eclisse. Se il pianeta possiede un'atmosfera, quando esso passa davanti alla stella una parte della luce della stella giunge a noi dopo aver attraversato l'atmosfera del pianeta; è quindi possibile che l'atmosfera del pianeta introduca righe di assorbimento nello spettro della stella. Un confronto tra due spettri della stella, presi rispettivamente durante l'occultazione e fuori dall'occultazione, potrebbe quindi darci informazioni sulla composizione chimica dell'atmosfera del pianeta. La figura si riferisce a un caso di questo genere, in cui usando questa tecnica è stato possibile evidenziare la presenza di sodio nell'atmosfera di un pianeta extrasolare.

Informazioni di questo tipo sono molto importanti e potrebbero addirittura portare a dimostrare l'esistenza della vita sui pianeti extrasolari. Infatti la vita, almeno nella forma in cui la conosciamo, produce un cambiamento estremamente caratteristico nell'atmosfera di un pianeta, cioè la arricchisce di ossigeno. L'ossigeno è un gas estremamente reattivo che si combina spontaneamente con molti elementi chimici, producendo ossidi; per questo motivo l'atmosfera terrestre perderebbe rapidamente (in poche decine di migliaia di anni) il proprio contenuto in ossigeno se non ne fosse continuamente rifornita dalla fotosintesi clorofilliana. Perciò la scoperta di un'atmosfera ricca di ossigeno attorno a un pianeta extrasolare sarebbe un indizio molto forte sulla presenza di forme di vita sul pianeta.

Come abbiamo visto, una delle limitazioni principali alla precisione e alla sensibilità delle misure necessarie per individuare e studiare i pianeti extrasolari (soprattutto delle misure fotometriche) è data dall'atmosfera terrestre. Per questo motivo negli ultimi anni sono stati progettati e realizzati satelliti artificiali dotati di telescopi in grado di eseguire fotometria di precisione dallo spazio. Tra questi c'è COROT (frutto di una collaborazione tra l'Agenzia Spaziale Europea e il Brasile) …

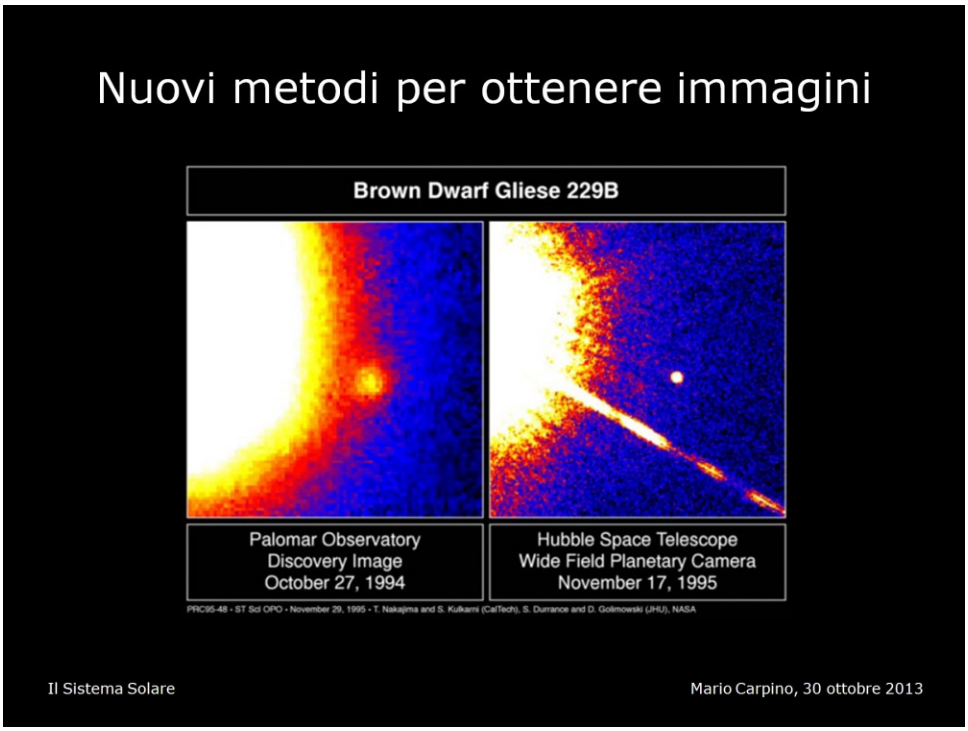
Fotometria dallo spazio



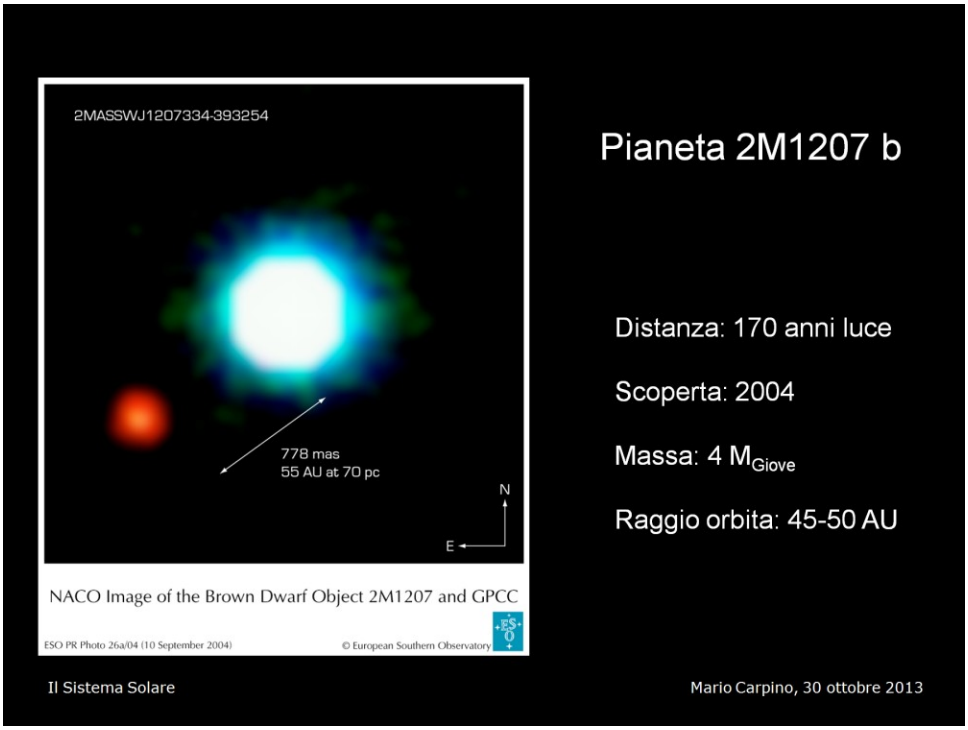
KEPLER (NASA)

Lancio: marzo 2009

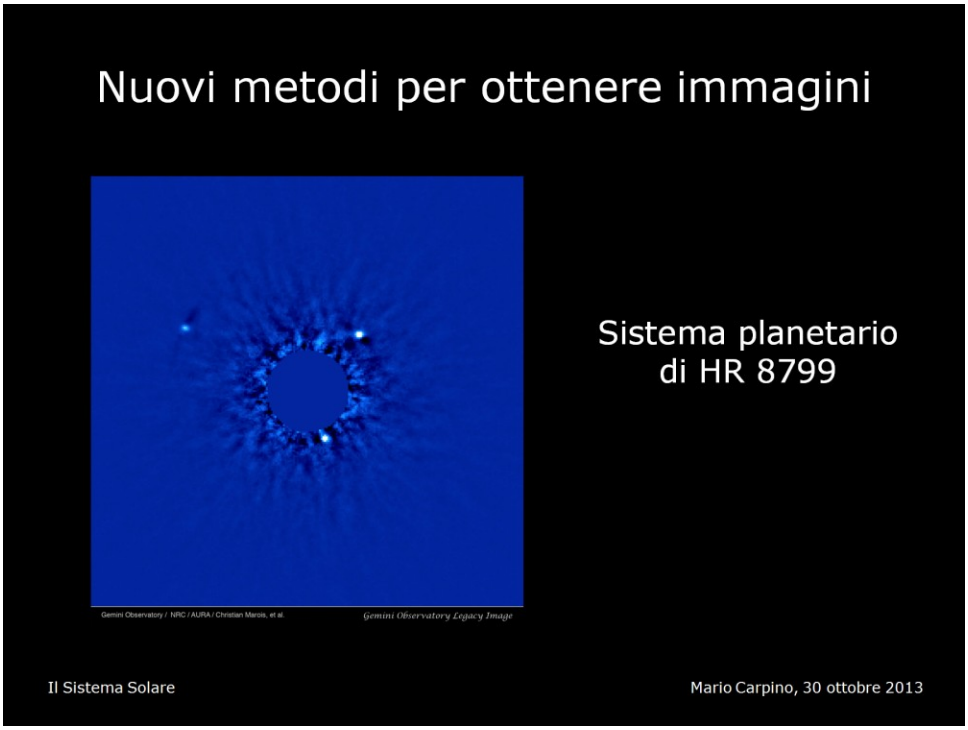
… e KEPLER (lanciato dalla NASA).



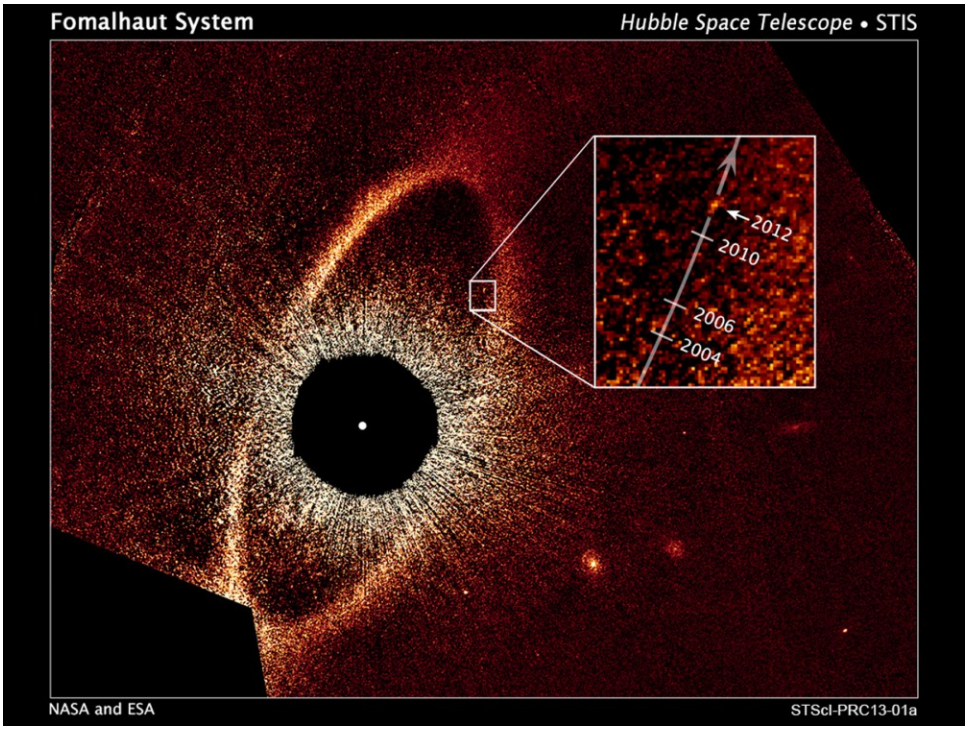
Abbiamo detto che l'osservazione diretta (nel senso di immagini in senso proprio) dei pianeti extrasolari è molto difficile. Tuttavia anche in questo campo l'evoluzione tecnologica sta facendo progressi tali che la situazione sta cambiando rapidamente. In particolare esistono tecniche di costruzione dei telescopi (*ottiche adattive*) che permettono di ottenere specchi che possono essere deformati su tempi scala brevissimi (dell'ordine dei millesimi di secondo) in modo da correggere la deformazione dell'immagine introdotta dalla turbolenza atmosferica. In alternativa è possibile usare telescopi che operano al di fuori dell'atmosfera (come il Telescopio Spaziale Hubble). Già da alcuni anni tali tecniche hanno permesso l'osservazione diretta di *nane brune* (stelle molto piccole e poco luminose) in orbita attorno a stelle più grandi.



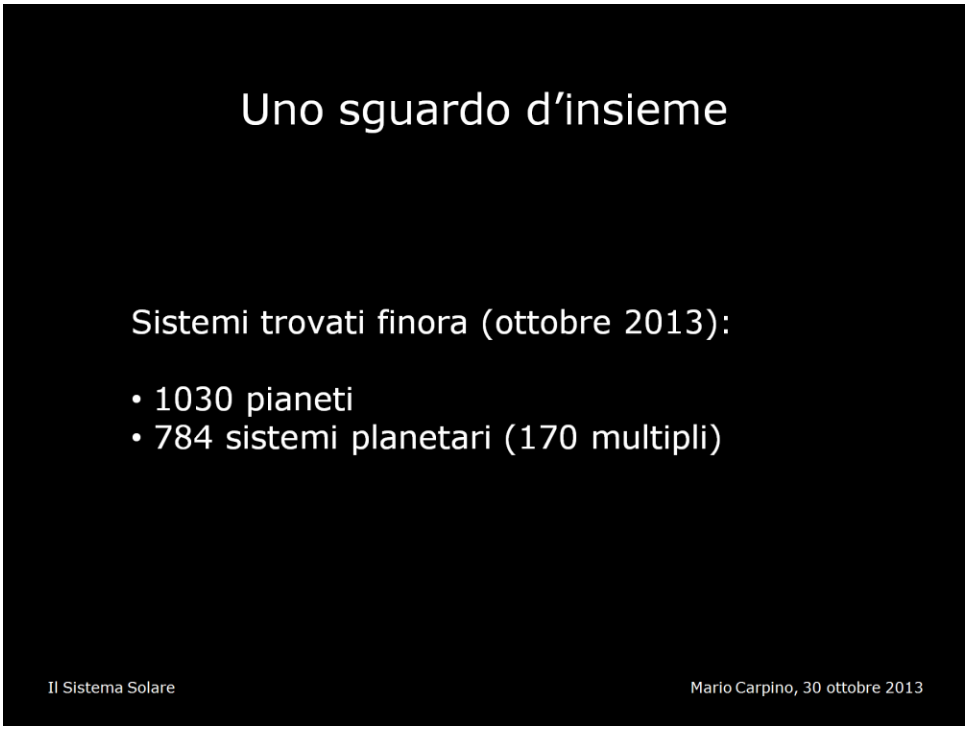
La prima osservazione ottica diretta di un pianeta extrasolare è del 2004: si tratta di caso relativamente facile da osservare, in quanto il pianeta è piuttosto grande (4 volte Giove) e molto distante dalla stella attorno a cui orbita.



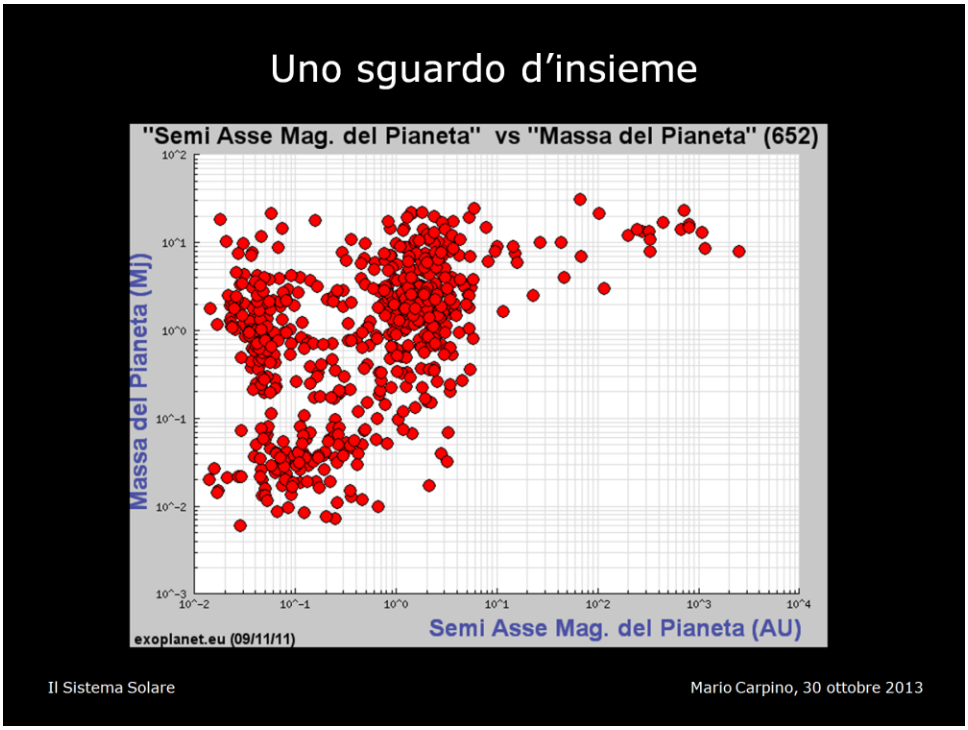
Nel 2008 la tecnica delle ottiche adattive, applicata al telescopio da 10 metri del Keck Observatory nelle Hawaii, ha permesso di ottenere immagini dirette di un sistema planetario formato da tre pianeti attorno alla stella HR 8799 (anche in questo caso la stella centrale è stata occultata da un coronografo e perciò non è visibile nell'immagine).



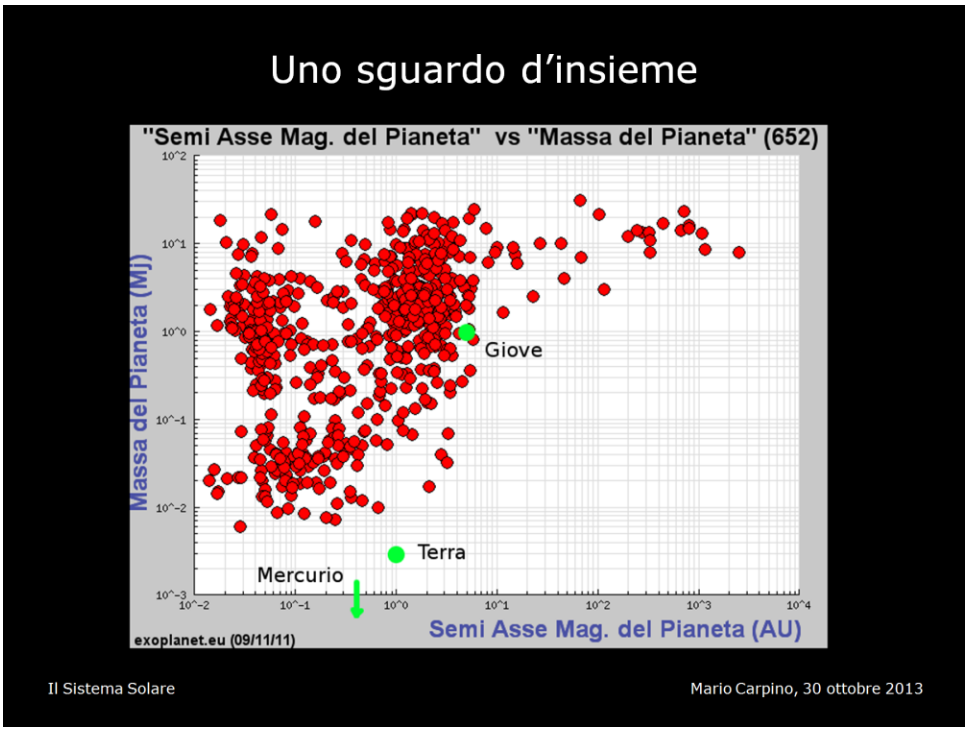
Il Telescopio Spaziale Hubble ha ripreso l'immagine di un pianeta che si muove ai bordi dell'anello di polveri che circonda Fomalhaut, una stella giovane attorno a cui probabilmente è in corso di formazione un nuovo sistema planetario. Il pianeta è stato osservato ripetutamente, dal 2004 in poi: immagini prese a tempi diversi mostrano che il pianeta si sta muovendo sulla sua orbita attorno alla stella.



Diamo ora uno sguardo d'insieme alle caratteristiche dei pianeti scoperti fino a oggi, avvertendo che nuovi pianeti vengono scoperti ogni mese e che quindi ogni statistica viene velocemente superata. A tutt'oggi (30 ottobre 2013) sono stati scoperti in tutto 1030 pianeti, appartenenti a 784 sistemi planetari; alcuni sistemi planetari infatti comprendono più di un pianeta (alcuni fino a 6 pianeti).



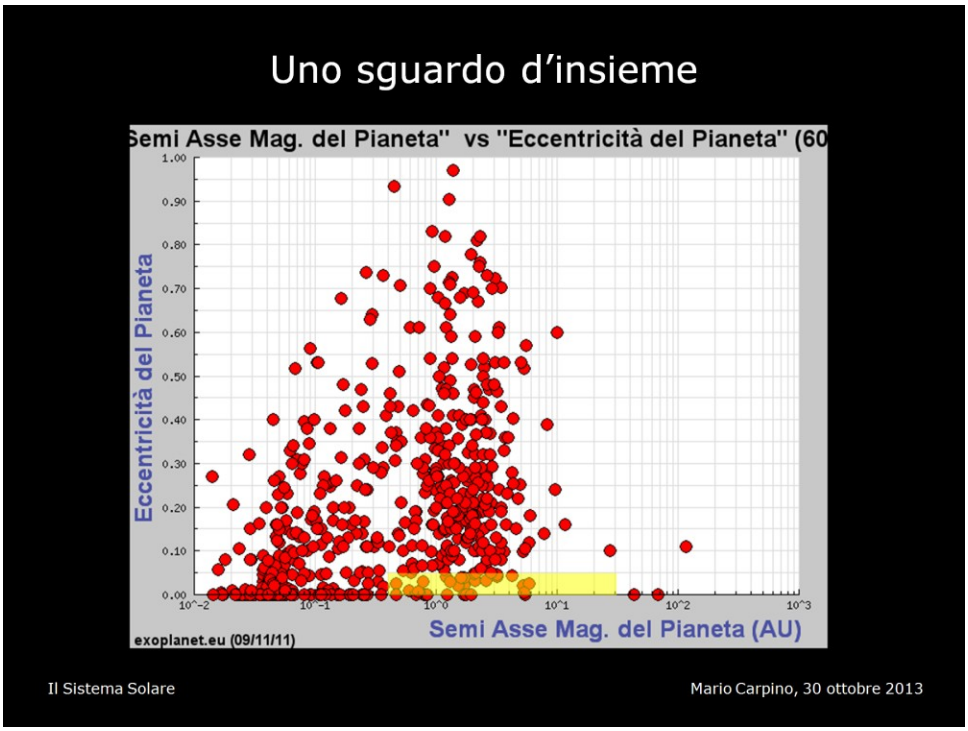
In questo grafico sono riportati i valori del *semiasse maggiore* dell'orbita (in ascissa) e della *massa* (in ordinata) dei pianeti scoperti fino ad ora. Si noti che il grafico usa una scala logaritmica, cioè intervalli uguali corrispondono a valori crescenti in progressione geometrica. Ad esempio le etichette riportate sull'asse orizzontale delle ascisse corrispondono a valori di 0,01, 0,1, 1, 10, 100, 1000 e 10000 unità astronomiche.



Per comprendere meglio il significato del grafico conviene riportarvi anche la posizione che su esso occupano due pianeti del nostro Sistema Solare, e cioè la Terra e Giove; per Mercurio è riportata solo una barra verticale in corrispondenza della sua distanza dal Sole, in quanto la sua massa è così piccola da portarlo al di fuori del valore minimo contemplato dal grafico.

Osservando il grafico si nota che la distribuzione delle masse e dei raggi orbitali dei pianeti extrasolari scoperti è molto diversa da quella dei pianeti del nostro Sistema Solare. In particolare la maggior parte dei pianeti hanno masse paragonabili o anche decisamente maggiori di quella di Giove (sono cioè pianeti giganti) ma distanze dalla loro stella molto minori rispetto a Giove; le loro orbite sono più piccole di quella della Terra, e spesso più piccole anche dell'orbita di Mercurio, il pianeta del Sistema Solare più prossimo al Sole.

Per interpretare correttamente il grafico bisogna tenere conto degli effetti di selezione introdotti dalle tecniche osservative. La maggior parte dei pianeti extrasolari sono stati scoperti con il metodo spettroscopico, che è sensibile alla velocità orbitale indotta dal pianeta sulla stella attorno a cui ruota e che perciò tende a privilegiare i pianeti aventi massa maggiore (che producono uno spostamento maggiore della stella) e raggio orbitale piccolo (e che quindi, per la terza legge di Keplero, sono più veloci lungo la loro orbita). Sicuramente questo è il motivo per cui sono stati scoperti così pochi pianeti di massa piccola, e nessuno di massa paragonabile a quella della Terra; sicuramente pianeti siffatti esistono, e probabilmente sono anche numerosi, ma per il momento sono al disotto della sensibilità dei nostri strumenti. Un effetto di selezione simile agisce anche nel caso di misure fotometriche: un pianeta avente una massa piccola ha anche dimensioni piccole, quindi intercetta una porzione minore della luce della stella ed è più difficile da rivelare.



Resta comunque il fatto che la scoperta di un così grande numero di "Giovi caldi" (*hot Jupiters*, come sono stati subito battezzati questi pianeti anomali) era inaspettata e inspiegabile sulla base di quanto si pensa di conoscere della nascita del Sistema Solare. Pianeti così grandi devono contenere un'elevata percentuale di elementi leggeri (semplicemente, nella nebulosa in cui si sono formati non poteva esserci una quantità sufficiente di elementi pesanti) e quindi devono essersi formati in orbite più lontane dalla stella di quelle in cui li vediamo ora. Cominciamo quindi a capire che il modo in cui si sono formati i pianeti del nostro Sistema Solare (su orbite quasi circolari che non si sono spostate in modo significativo dall'epoca della formazione ai nostri giorni) non è l'unico possibile, e che i sistemi planetari attorno ad altre stelle possono aver avuto storie evolutive molto diverse (con migrazioni di pianeti giganti dalle regioni esterne in cui si sono formati a orbite molto prossime alla loro stella, oppure per collasso gravitazionale diretto di parti della nebulosa protoplanetaria invece che per accrezione).

Un'altra caratteristica anomala delle orbite dei pianeti extrasolari è il fatto che sono molto più elongate di quelle dei pianeti del Sistema Solare, coma appare da questo grafico in cui viene riportata l'eccentricità orbitale in funzione della distanza dalla stella. Per confronto, la striscia gialla in basso rappresenta le regione del grafico occupata dai pianeti del Sistema Solare che, come si è detto, hanno eccentricità orbitali solitamente inferiori a 0,05.

Anche questo dato sembra suggerire che i "Giovi caldi" abbiano subito migrazioni dall'epoca della loro formazione. Infatti le orbite quasi circolari dei pianeti del Sistema Solare sono caratteristiche del processo di accrescimento graduale all'interno di un disco che ruota in modo ordinato attorno alla stella, mentre orbite fortemente eccentriche sono tipicamente il risultato di forti perturbazioni da parte di altri corpi celesti (ad esempio incontri ravvicinati) che possono aver spostato i pianeti dalla loro zona di origine.