



Laurea triennale in Fisica
a.a. 2010 - 2011

CORSO DI ASTRONOMIA

LEZIONE 12_1 – 31 maggio 2011

Prof. Angelo Angeletti

I pianeti extrasolari

- Un po' di storia
- Tecniche per la rilevazione dei pianeti extrasolari
- Il metodo dei transiti
- I risultati attuali

Un po' di storia

Che cos'è un pianeta?

Pianeta viene dal greco e significa vagabondo; con questo termine venivano indicati quegli astri che si spostavano nel cielo rispetto alle stelle fisse, ovvero la Luna, il Sole, Mercurio, Venere, Marte, Giove e Saturno. Gli unici visibili a occhio nudo.

Il 24 agosto 2006 l'Assemblea Generale di Praga dell'*International Astronomical Union* (IAU) ha stabilito che un pianeta è un corpo celeste che:

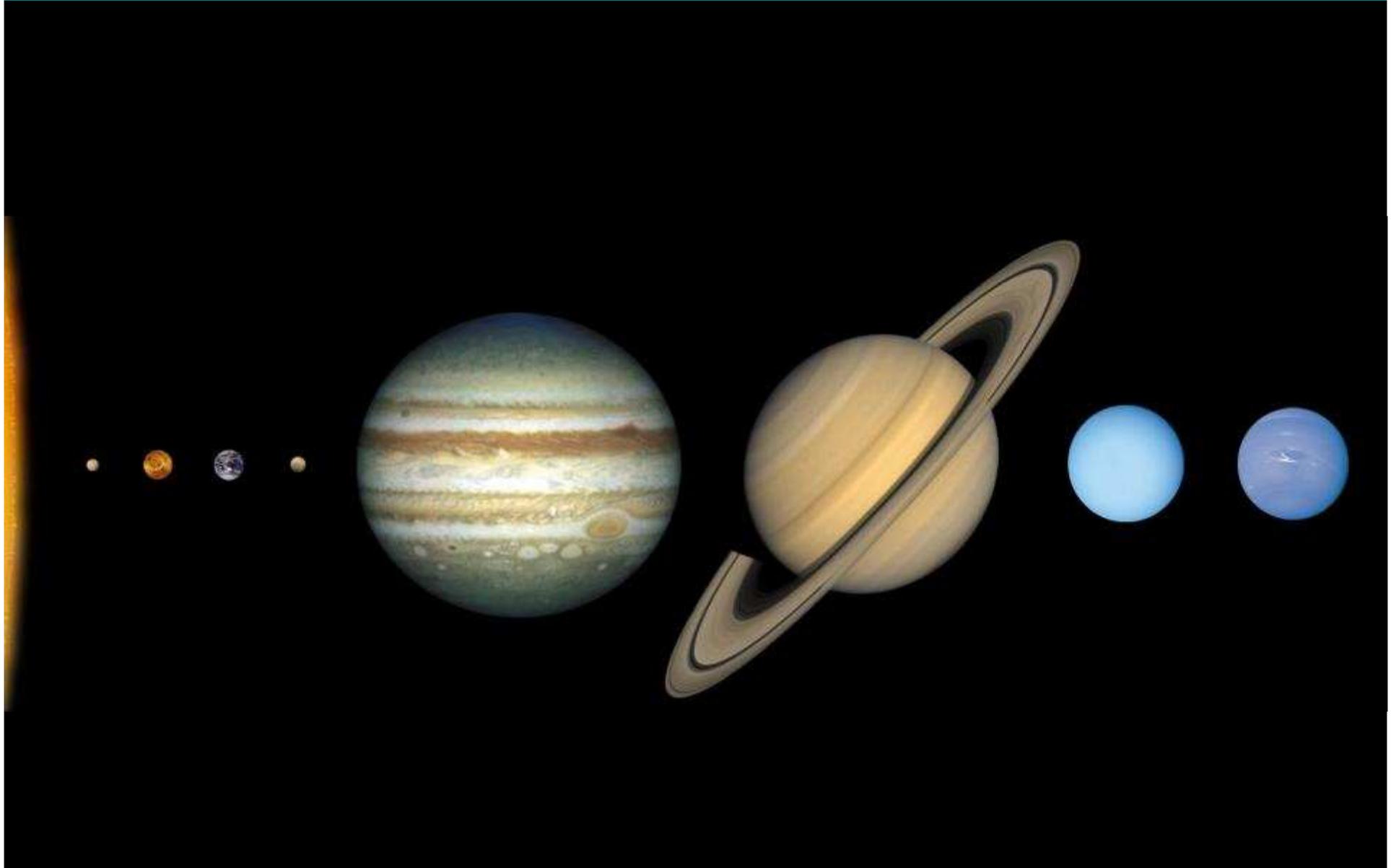
è in orbita intorno al Sole;

ha una massa sufficiente affinché possa assumere una forma quasi sferica;

ha “ripulito” le vicinanze intorno alla sua orbita.

Un po' di storia

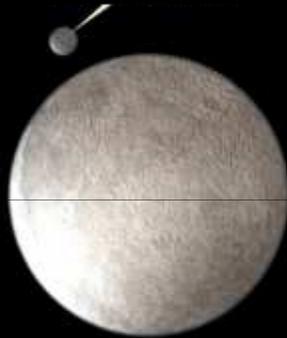
I pianeti del Sistema Solare



Un po' di storia

I pianeti nani

Dysnomia



Eris

Caronte



Plutone

Makemake



Haumea



Cerere



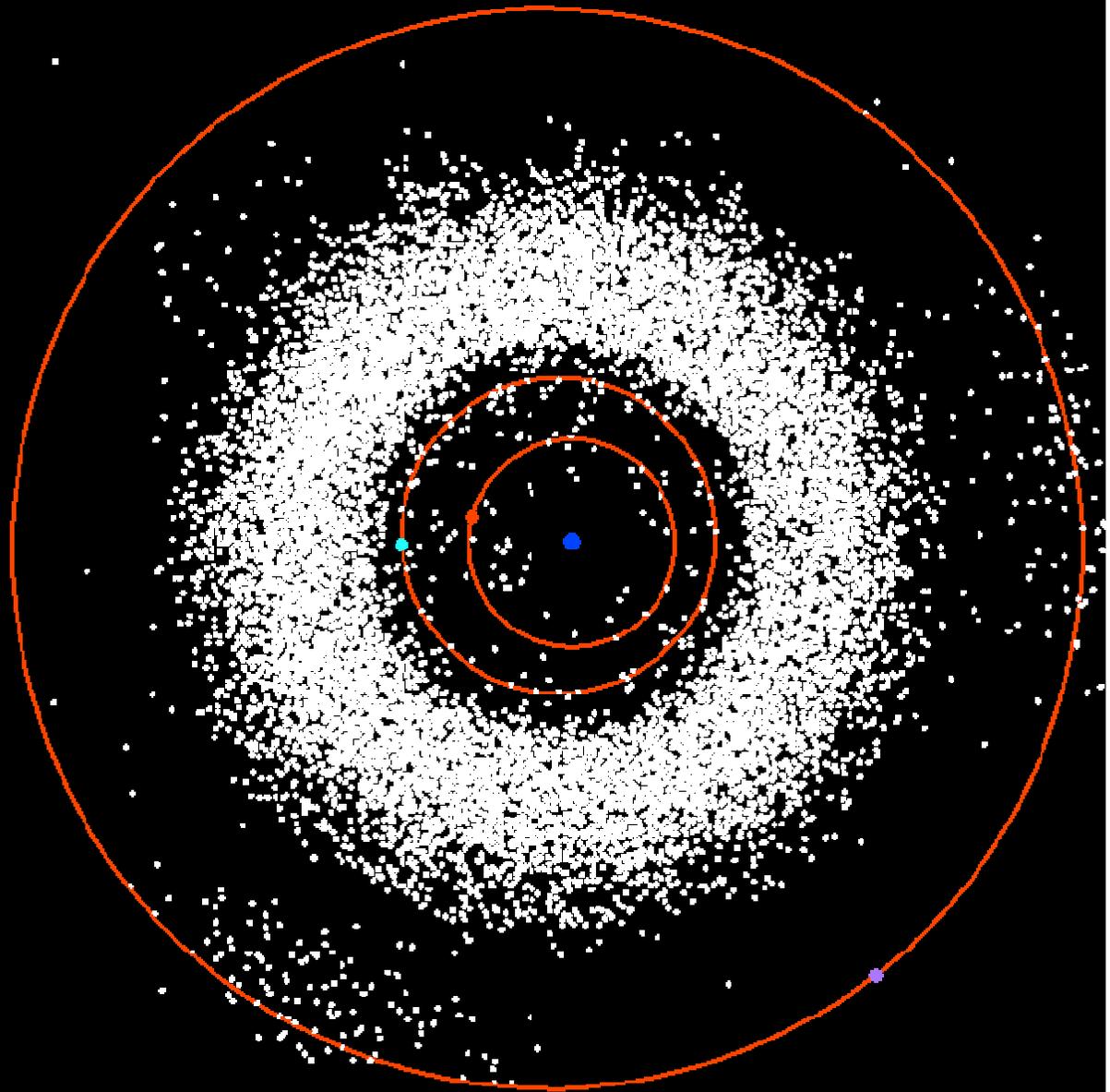
Un po' di storia

I Corpi Minori

Corpi minori sono tutti gli altri corpi del Sistema Solare.

Un gruppo importante di questi, detti asteroidi (o anche pianetini) si trova tra Marte e Giove.

Alcuni di essi hanno orbite che intersecano l'orbita della Terra.



Un po' di storia

I Corpi Minori

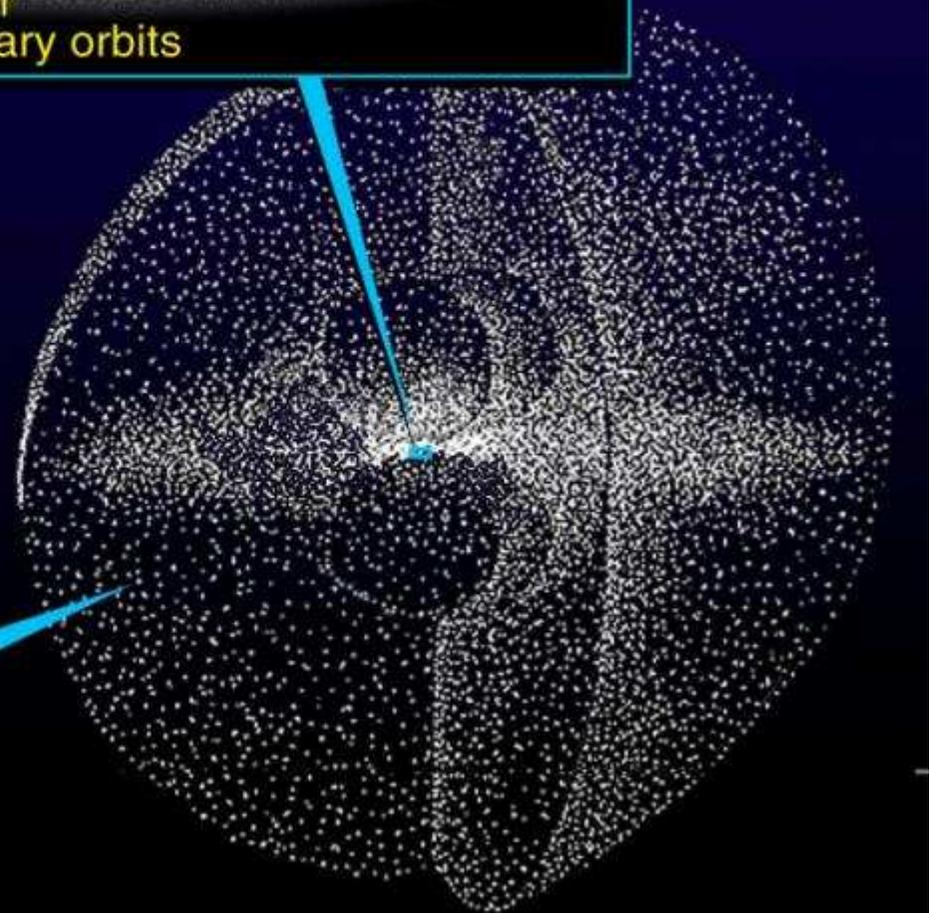
Un altro importante gruppo di oggetti si trova oltre l'orbita di Nettuno (per questo sono detti **TNO = Trans-Neptunians Objects**)

Sono distribuiti in una struttura detta **cintura di Kuiper** e esternamente costituiscono la cosiddetta **nube di Oort** che si estende probabilmente fino a metà della distanza che separa il Sole dalla stella più vicina: α Centauri



The Oort Cloud (comprising many billions of comets)

Oort Cloud cutaway drawing adapted from Donald K. Yeoman's illustration (NASA, JPL)



Un po' di storia

Come si è formato il Sistema Solare?

I primi modelli di formazione del Sistema Solare cercarono innanzitutto di rendere conto, in modo qualitativo, dei principali dati osservativi riguardanti le orbite dei pianeti, le cui caratteristiche principali si possono così riassumere:

- si trovano approssimativamente nello stesso piano;
- sono praticamente circolari ;
- i pianeti ruotano nello stesso senso, che è pure quello di rotazione del Sole;
- le distanze eliocentriche obbediscono alla legge empirica di Titius-Bode.

Verso la fine del XIX secolo, inoltre, assunse molta rilevanza il problema del momento angolare: il Sole contiene il 99% della massa del Sistema Solare, ma possiede solo il 3% del momento angolare totale.

Un po' di storia

Come si è formato il Sistema Solare?

Dalla metà del XX secolo le nuove teorie riguardanti la formazione stellare, insieme alla determinazione delle età dei vari corpi minori (come le meteoriti), fornirono nuovi elementi di riflessione per le nuove e più moderne teorie cosmogoniche.

Questo insieme di conoscenze portò a costruire diversi modelli, riassumibili in quattro teorie principali:

quella della *formazione turbolenta*,
quella *mareale*,
quella di *cattura*
quella della *teoria nebulare*.

Un po' di storia

Come si è formato il Sistema Solare?

I modelli basati sulla turbolenza

René Descartes (1596-1650) fu il primo che cercò di dare una spiegazione scientifica dell'esistenza del Sistema Solare e che introdusse l'idea di evoluzione.

Nella sua opera *Teoria dei vortici* (1644), avanza l'ipotesi che l'Universo sia costituito da materia ed etere e sia pieno di vortici di diverse dimensioni.

Non è però chiaro il meccanismo fisico tramite il quale dai “vortici” si siano poi prodotti i pianeti.

Il modello è soltanto qualitativo ed uno dei suoi maggiori difetti è che non spiega la complanarità delle orbite planetarie: esso venne abbandonato dopo la scoperta delle leggi della gravità di Newton.

Il concetto di turbolenza fu però ripreso e riconsiderato da numerosi autori nel XX secolo (von Weizsäcker, ter Haar, Kuiper, Whipple e McCrea).

Un po' di storia

Come si è formato il Sistema Solare?

Le teorie mareali

La prima versione della teoria si deve al conte di Buffon che ipotizzò che il materiale che ha formato i pianeti fosse stato “strappato” al Sole da una cometa entrata in collisione con esso, circa 70000 anni fa.

La credibilità di questa teoria era legata al fatto che, a quei tempi, la natura delle comete era completamente sconosciuta e che non si avevano criteri attendibili per una stima delle età dei corpi celesti.

Bickerton (1880) e Chamberlain (1901) sostituirono la cometa con una stella massiccia, rendendo l'ipotesi fisicamente verosimile.

Avvicinandosi al Sole la stella avrebbe strappato parte del suo materiale producendo filamenti con elevato momento angolare, che poi si sarebbero condensati sul piano dell'eclittica.

Rimane però difficile spiegare la formazione dei pianeti giganti esterni, anche se vengono risolte due delle maggiori obiezioni che hanno a lungo reso la vita difficile al modello originale di Kant e Laplace: il problema del momento angolare e la diversa composizione chimica dei pianeti rispetto al Sole.

Un po' di storia

Come si è formato il Sistema Solare?

Le teorie di cattura

Nel 1964 M. Woolfson presentò una variante dell'ipotesi mareale, detta teoria della cattura. Il materiale che ha formato i pianeti sarebbe il risultato dell'interazione mareale tra il Sole e una protostella, di massa ridotta e ancora in contrazione, che passò vicino alla nostra stella.

Neppure questa teoria gode di largo credito.

Le obiezioni più importanti (che mettono in difficoltà anche le teorie mareali) sono:

- a) il materiale caldo strappato al Sole si disperderebbe con grande facilità nello spazio anziché formare pianeti;
- b) incontri ravvicinati con stelle massicce sono rarissimi (e i sistemi planetari, a quanto pare, no);
- c) non si riesce a spiegare la presenza della nube di Oort e della fascia di Edgeworth-Kuiper;
- d) il fatto che Sole e pianeti abbiano la stessa età ($4,55 \pm 0,05$ miliardi di anni) costituirebbe una coincidenza troppo speciale.

Un po' di storia

Come si è formato il Sistema Solare?

L'ipotesi nebulare di Kant-Laplace

Nel 1755 il filosofo Immanuel Kant suggerì che il Sistema Solare si fosse formato dal collasso di una nube di gas. Nel 1796 il matematico P. S. de Laplace riprese l'idea dal punto di vista matematico, includendo anche l'effetto della rotazione. Nel 1854 R. Roche discusse il problema del momento angolare (non ancora del tutto risolto).

La rotazione fa appiattare la nube e si forma un disco, nel quale poi condensano i futuri pianeti.

La teoria spiegava tutti i dati osservativi conosciuti al suo tempo, e per questo ebbe da subito successo: nell'Ottocento conobbe un periodo di crisi, perché non riusciva (nella sua forma originale) a spiegare la distribuzione di momento angolare e le differenze di composizione chimica tra il Sole e i pianeti. Quest'ultima obiezione è ormai pienamente superata; per quanto riguarda il momento angolare, è ormai stato compreso il meccanismo fisico che consentì il suo trasferimento dal Sole verso l'esterno.

I dettagli del processo, tuttavia, non sono stati completamente chiariti a causa della sua enorme complessità..

Un po' di storia

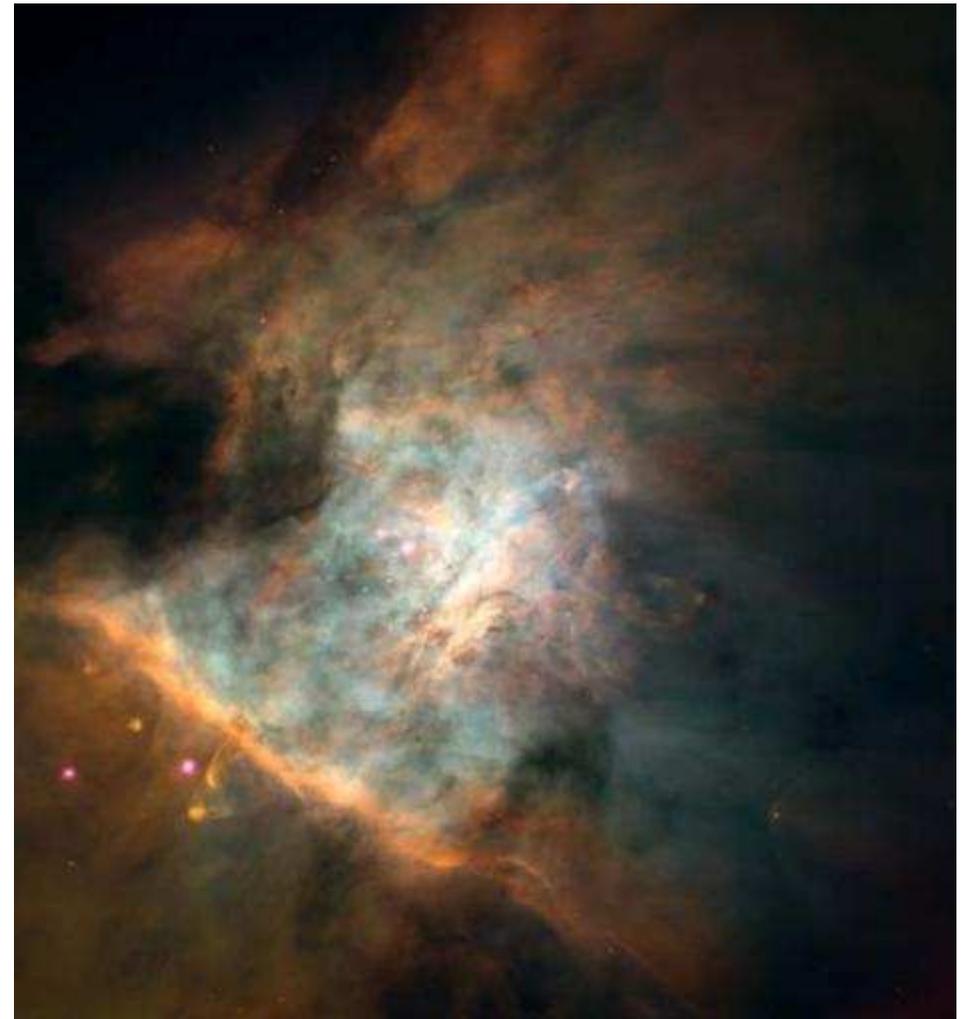
Come si è formato il Sistema Solare?

L'ipotesi nebulare di Kant-Laplace

Riassumiamo i dettagli più significativi ipotizzati per il processo di formazione del Sistema Solare.

Nel centro del disco, tra 5 e 4,6 miliardi di anni fa, si è formato il Sole, con quasi tutta la massa della nube.

I pianeti nascono attraverso un processo molto complicato, in un'area estesa a gran parte del disco e su un periodo di tempo piuttosto lungo (da migliaia a milioni di anni, a seconda del pianeta).



La nebulosa di Orione

Un po' di storia

Come si è formato il Sistema Solare?

L'ipotesi nebulare di Kant-Laplace

Dapprima grani solidi di “polvere” si condensano dal gas nebulare, con un meccanismo chimico complesso: poi i grani si accrescono progressivamente dando vita ai planetesimi attraverso un processo ugualmente complicato, ma di tipo dinamico-collisionale.

Infine anche i planetesimi si urtano in modo catastrofico e si fondono: nascono i protopianeti, che inglobando il materiale residuo formano i pianeti.

Il parametro fondamentale per la condensazione è la temperatura: essa è naturalmente più alta verso il centro del disco, dove la protostella si sta formando, mentre diminuisce progressivamente andando verso l'esterno.

Dalla temperatura dipende il tipo di composti chimici che possono condensare dal gas.

Un po' di storia

Come si è formato il Sistema Solare?

L'ipotesi nebulare di Kant-Laplace

Sotto i 2000 K circa condensano silicati e ossidi metallici: per la condensazione di composti organici e di ghiacci di vario tipo – di acqua, di metano, di ammoniaca, di azoto – bisogna scendere sotto i 270 K, fino verso lo zero assoluto.

Questa differenziazione chimica è alla base della dicotomia esistente tra i pianeti interni (o terrestri) e pianeti esterni (o gassosi).

I primi sono caratterizzati da: dimensioni ridotte (la Terra è il più grande), nuclei ferrosi, mantelli rocciosi, grande densità, crosta rocciosa solida e atmosfere sottili: i secondi hanno invece nucleo misto (roccia e ghiaccio), grandi dimensioni, densità bassa e atmosfere molto estese.

Il secondo gruppo si può ulteriormente suddividere: da una parte Giove e Saturno (più massicci), dall'altra Urano e Nettuno.

Un po' di storia

Come si è formato il Sistema Solare?

L'ipotesi nebulare di Kant-Laplace

Si può scrivere un'equazione approssimata per l'andamento della temperatura, al variare della distanza, nella nebulosa protosolare:

$$T \text{ (K)} \simeq \frac{631}{R^{0,77}}$$

R è espresso in unità astronomiche (UA =).

La zona della nebulosa dove il vapore acqueo può solidificare ($T \leq 273 \text{ K}$, cioè $0 \text{ }^\circ\text{C}$) si trova a circa 3 UA dal Sole (linea del ghiaccio), nella regione oggi occupata dalla fascia degli asteroidi.

A distanze maggiori i nuclei planetari si accrescono rapidamente (perché aumenta il materiale disponibile) e possono catturare anche il gas della nebulosa; ciò spiega le atmosfere di idrogeno ed elio dei pianeti gassosi – infatti il gas nebulare è composto quasi al 98% di questi gas.

Un po' di storia

Come si è formato il Sistema Solare?

L'ipotesi nebulare di Kant-Laplace

Il processo di condensazione accresce la propria efficacia grazie ai grani di polvere. La “polvere” doveva probabilmente essere un insieme di silicati molto refrattari, grafite, composti metallici e forse altri composti organici complessi.

La fase successiva alla condensazione, detta accrescimento, è caratterizzata dalle collisioni tra grani, che aderiscono l'uno all'altro ingrandendosi progressivamente.

I meccanismi fisici sono due: *collisione geometrica* e *collisione gravitazionale*.

Nella prima l'accrescimento riguarda soltanto i grani che possono scontrarsi direttamente (il concetto portante è quello di sezione d'urto, cioè la superficie disponibile per un impatto: per un grano sferico di raggio r essa è l'area del cerchio massimo, πr^2), mentre nella seconda l'influenza gravitazionale esercitata dalla particella è in grado di attirare anche del materiale che non le sarebbe finito direttamente addosso.

Un po' di storia

Come si è formato il Sistema Solare?

L'ipotesi nebulare di Kant-Laplace

Poiché la gravità di un oggetto dipende dalla sua massa, la collisione gravitazionale è all'inizio trascurabile, ma non appena la massa dei grani cresce fino ad un certo valore critico di soglia, il meccanismo di cattura gravitazionale diventa dominante.

Una discussione matematica del modello mostra che, se abbiamo a che fare con particelle di raggio r , l'efficienza della collisione geometrica dipende da r^2 , mentre quella della collisione gravitazionale dipende da r^4 .

Il processo, di crescita esponenziale, porta in brevissimo tempo le dimensioni degli oggetti all'interno della nebulosa protosolare da un metro ad alcuni km: i cosiddetti *planetesimi*.

I planetesimi continuano ad accrescersi, sia per mutue collisioni sia per cattura di particelle più piccole e raggiungono dimensioni paragonabili a quelle della Luna o a anche di Marte: a questo punto sono diventati *protopianeti*.

Un po' di storia

Come si è formato il Sistema Solare?

L'ipotesi nebulare di Kant-Laplace

Per i pianeti di tipo terrestre gli stadi finali dell'accrescimento devono essere violenti e drammatici.

I protopianeti hanno collisioni più rare rispetto agli stadi precedenti, ma catastrofiche: è solo attraverso tale processo che si possono formare pianeti come Venere o la Terra. Si ritiene che esistano alcune testimonianze residue di questa fase:

a) Formazione della Luna a causa dell'impatto di un protopianeta grande come Marte contro la Terra;

b) Rotazione retrograda di Venere. L'asse di rotazione di questo pianeta è inclinato di $177,4^\circ$ sul piano orbitale, e il periodo di rotazione (243 giorni!) è più lungo del periodo di rivoluzione attorno al Sole (225 giorni). L'ipotesi più attendibile è che un impatto abbia rallentato la rotazione iniziale di Venere.

c) Anomalie di Urano. L'asse di rotazione è inclinato di $97,9^\circ$ sul piano orbitale e questo potrebbe essere spiegato da un altro impatto:

d) La "sottigliezza" del mantello di Mercurio. Le misure di densità e del campo magnetico indicano che il nucleo di questo pianeta è sproporzionatamente grande e ciò potrebbe essere stato prodotto da un impatto.

Un po' di storia

Come si è formato il Sistema Solare?

L'ipotesi nebulare di Kant-Laplace

La fascia degli asteroidi comprende un enorme numero di corpi le cui dimensioni sono tipiche dei planetesimi: la loro evoluzione si è infatti arrestata allo stadio dell'accrescimento, perché Giove si è formato con grande rapidità (le grandi masse hanno un'evoluzione molto accelerata, perché catturano con maggiore efficacia) e ha perturbato le traiettorie dei planetesimi vicini ad esso, accelerandoli e innescando un meccanismo distruttivo di collisioni che ha frantumato gli asteroidi anziché aggregarli insieme. Il processo continua ancora oggi: la massa totale della fascia è stimata in circa $5 \cdot 10^{21}$ kg, ovvero circa un quindicesimo della massa della Luna (rispetto all'inizio la fascia ha perso una parte notevole della sua massa).

I pianeti esterni devono essersi formati in maniera più semplice rispetto a quelli interni.

Le massicce quantità di ghiaccio disponibili oltre le 3 UA di distanza dal Sole si sono unite ai grani preesistenti in grandi nuclei misti (roccia + ghiaccio), capaci di catturare e trattenere grandi involucri di gas della nebulosa protosolare.

Un po' di storia

Come si è formato il Sistema Solare?

L'ipotesi nebulare di Kant-Laplace

Per Giove sono stati stimati i seguenti dati: massa del nucleo di roccia/ghiaccio: ~ 35 masse terrestri, massa totale del pianeta ~ 318 masse terrestri. Dunque la maggior parte della massa di Giove è nell'involuppo di idrogeno ed elio, e lo stesso vale per Saturno, Urano e Nettuno.

Va comunque detto che questo resta un punto debole del modello, perché il Sole all'inizio della sua vita ha attraversato una fase detta fase T-Tauri, caratterizzata da un vento stellare molto intenso e da una forte emissione ultravioletta; in tale situazione tutto il materiale non ancora aggregato nei pianeti doveva essere spazzato via dal Sistema Solare.

Il problema è che i modelli di evoluzione stellare prevedono che per il Sole la fase T-Tauri debba iniziare al massimo dieci milioni di anni dopo la sua formazione: come hanno fatto a formarsi Urano e Nettuno?

La domanda non ha ancora ottenuto una risposta convincente.

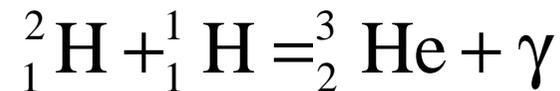
Un po' di storia

Che cos'è un pianeta extrasolare?

Il *Working Group on Extrasolar Planets* (WGESP) dell'IAU dà la seguente definizione di pianeta extrasolare
(è una definizione di lavoro, quindi suscettibile a revisioni) :

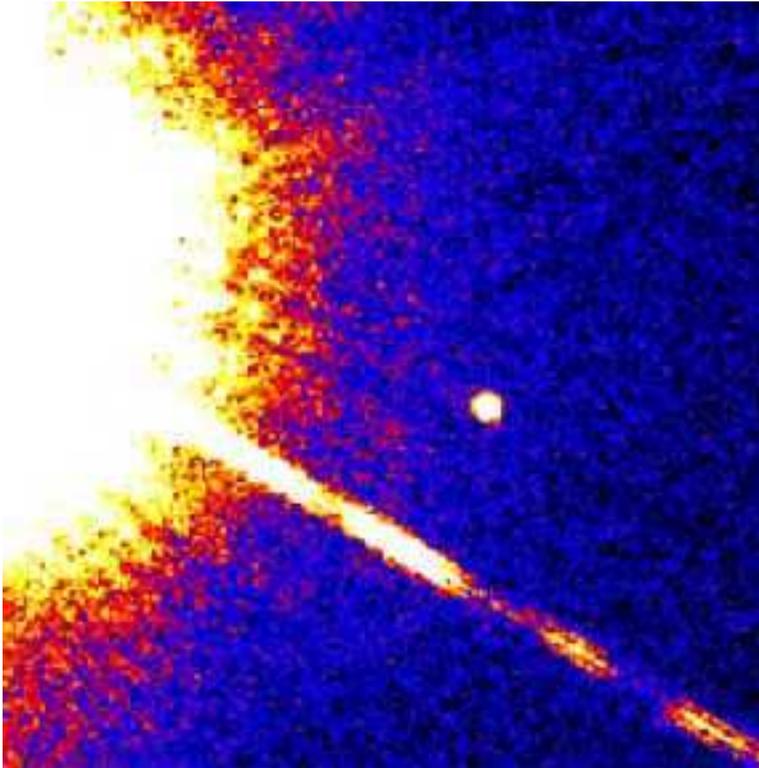
Oggetti con massa inferiore alla massa limite per la fusione termonucleare del deuterio che orbitino intorno a stelle o resti di stelle (non importa come si siano formati) e superiore al minimo di massa che si usa nel Sistema Solare (Mercurio $M=3.3 \cdot 10^{23}$ kg).

Attualmente il limite per la fusione del deuterio è stimata pari a 13 volte la massa di Giove [$M_J=1,9 \cdot 10^{27}$ kg] per gli oggetti di metallicità solare.



Un po' di storia

Che cos'è un pianeta extrasolare?



Gliese 229 A e B. A sinistra, molto più brillante, la nana rossa Gliese A, al centro la nana bruna Gliese B.

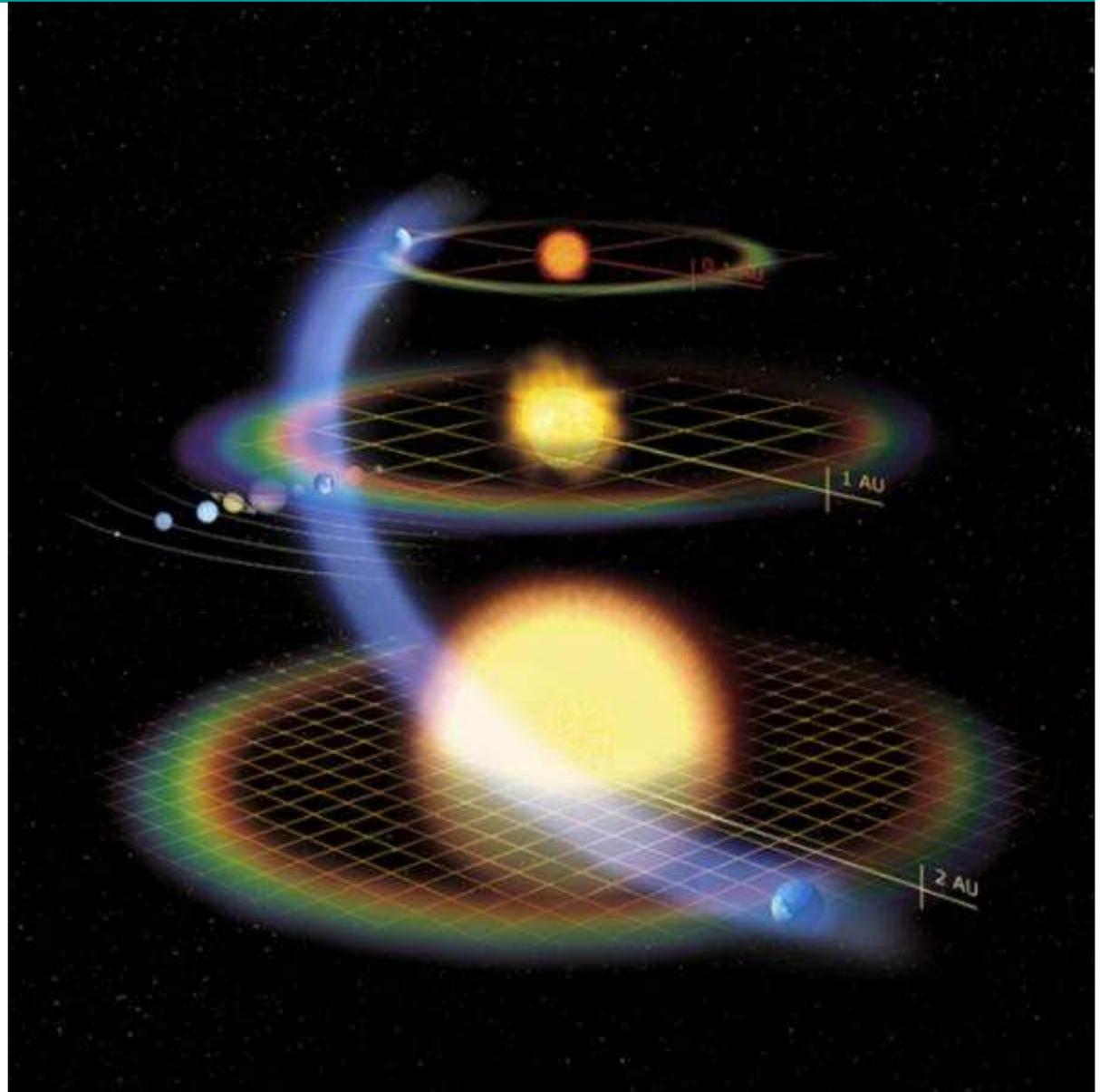
Oggetti con massa minore di $70 M_J$ ($\sim 7\% M_S$), ma superiore a $13 M_J$ sono “nane brune”, non importa come si siano formate, nè dove si trovino.

Oggetti liberi in ammassi di stelle giovani con massa inferiore a $13 M_J$ non sono pianeti, ma “sotto-nane brune”.

Un po' di storia

La zona di abitabilità

Nella ricerca di pianeti extrasolari riveste un particolare interesse quelli che si trovano nella cosiddetta *zona di abitabilità di un sistema planetario*, ossia nell'intervallo di distanze dalla stella in cui, su di un pianeta roccioso, è possibile trovare acqua allo stato liquido.



Un po' di storia

Perché cercare pianeti extrasolari?

La ricerca dei pianeti extrasolari è una recentissima branca dell'astronomia che sta assumendo sempre più un ruolo fondamentale per le sue rilevanti implicazioni in ambito sia culturale sia filosofico.

È da lì che potrebbe giungere una risposta, forse in un futuro neppure troppo lontano, ad una delle domande cruciali per l'umanità:

***nell'Universo esistono altre forme di vita,
altri mondi abitati?***

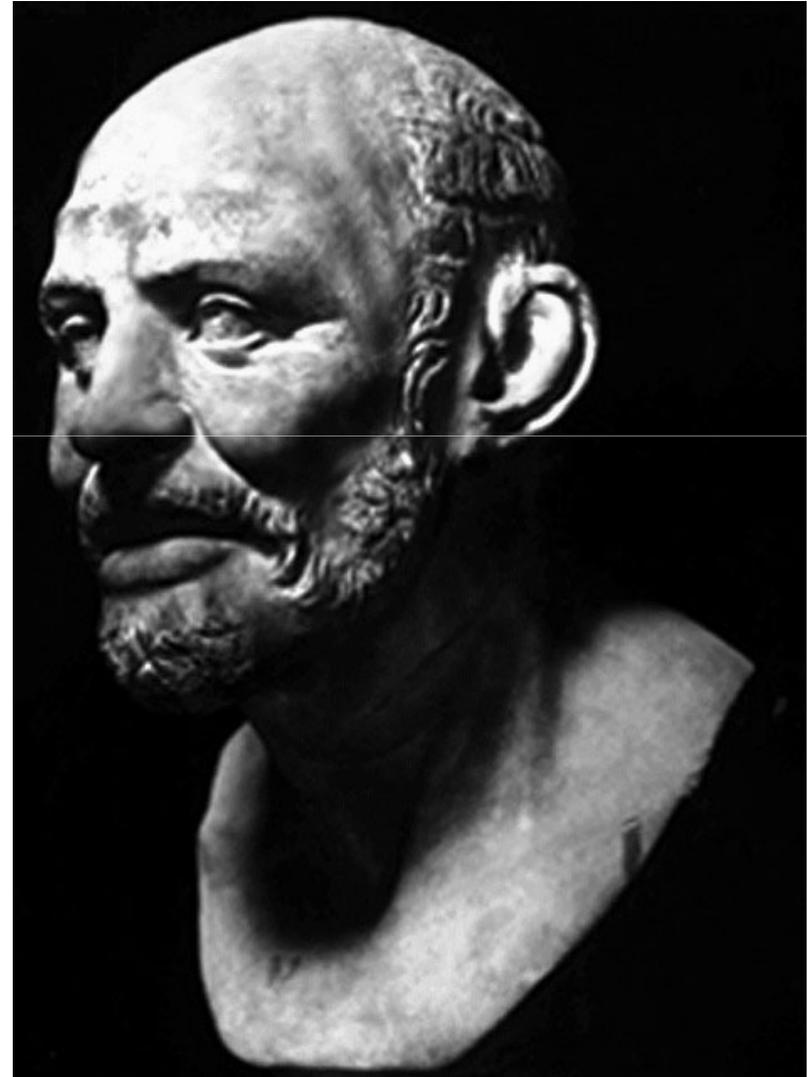
Un po' di storia

Gli inizi

In alcuni mondi non ci sono né Sole né Luna, in altri essi sono più grandi che nel nostro, in altri più numerosi. [..]

Vi sono alcuni mondi privi di creature viventi o piante e di qualsiasi umidità.

Democrito ~460 - 370 a. C.

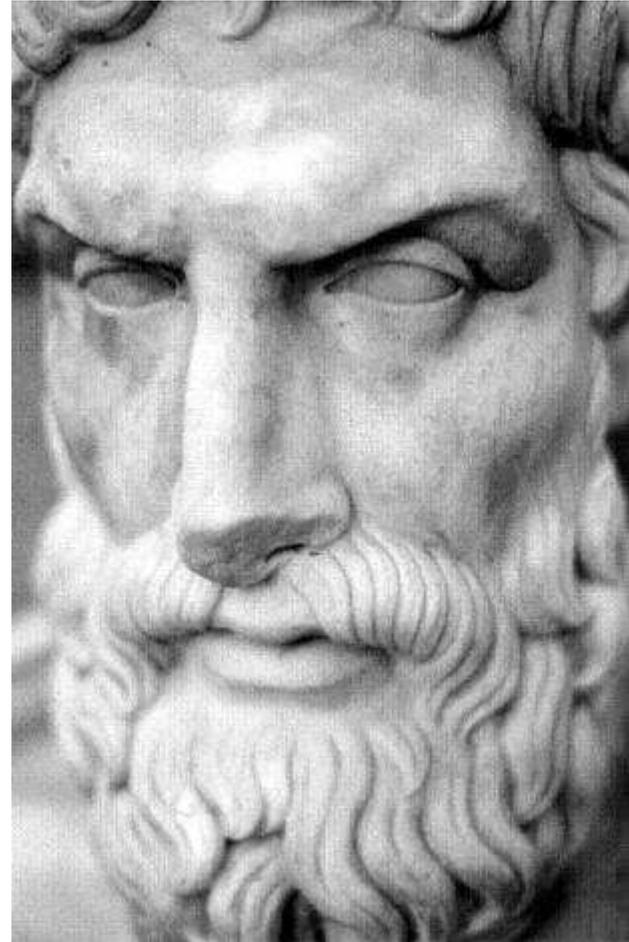


Un po' di storia

Gli inizi

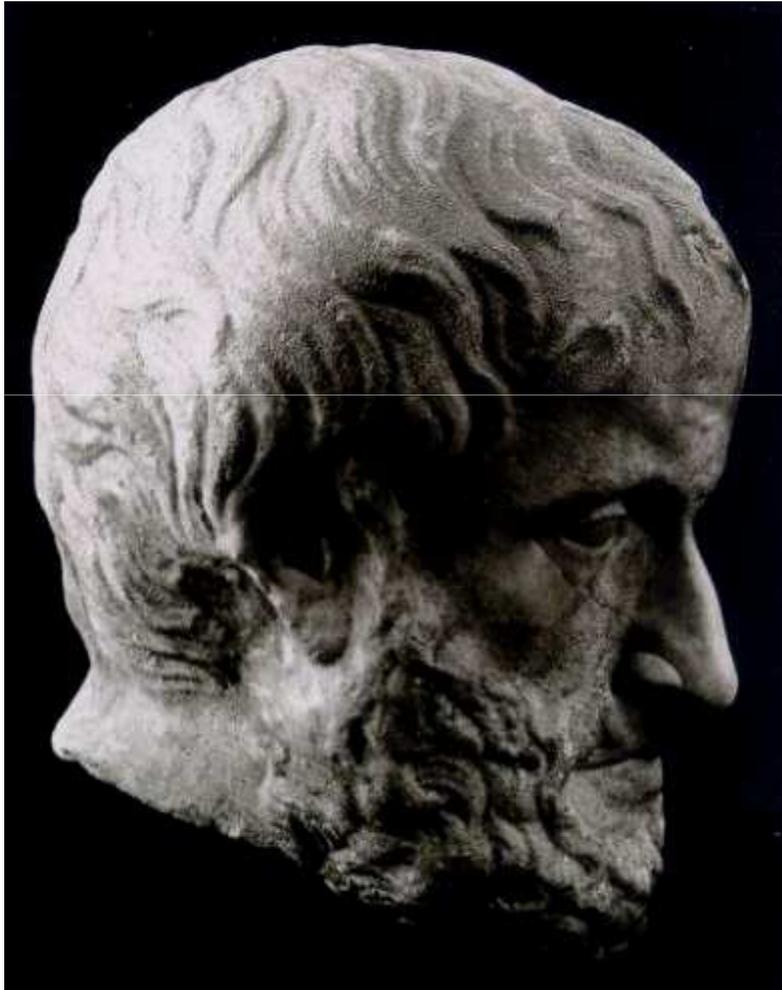
*Vi sono infiniti mondi, sia simili
che differenti dal nostro. Poiché gli
atomi sono infiniti in numero [...],
non vi è ostacolo all'esistenza di
infiniti mondi.*

Epicuro 341 - 270 a. C.



Un po' di storia

Gli inizi



*Non possono esserci altri mondi
oltre al nostro.*

Aristotele 384 – 322 a.C.

Un po' di storia

Gli inizi

[...] Il solo infinito è perfetto e di esso nulla può essere più importante e migliore, il Dio come sola natura intera e universale.

Universo è sinonimo di verità, unità e bontà; per questo l'infinito viene chiamato universo. Dio è glorificato non in uno ma in innumerevoli Soli, non in un'unica Terra, ma in un'infinità di mondi.

Giordano Bruno (1548-1600)



Un po' di storia

Gli inizi

[...]

quante saranno le stelle e i loro mondi.

*Giacomo Leopardi (1798 – 1837) – Operette
moralì: Il Copernico*

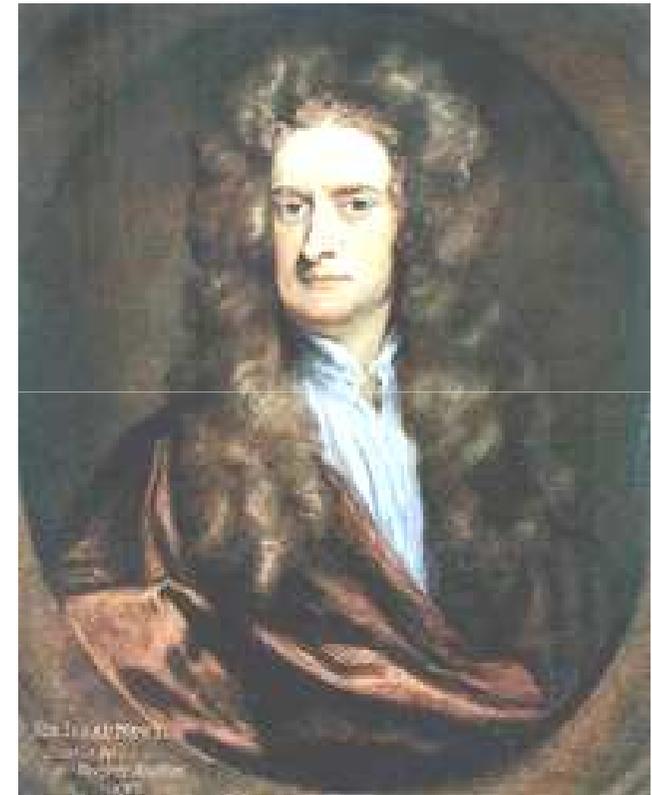


Un po' di storia

Gli inizi

Nel campo scientifico, anche Newton ipotizzava l'esistenza di esopianeti e la sua statura scientifica fu senz'altro uno stimolo per la loro ricerca.

Ma per tutto il XIX secolo vi furono solo falsi annunci di scoperte.



La ricerca scientifica dei pianeti extrasolari inizia nel XX secolo e porta a dei risultati solo nell'ultima dozzina di anni.

Un po' di storia

Il XX secolo

Nel 1952, Otto Struve (1897 – 1963) accenna all'osservabilità dei pianeti extrasolari, immaginando sia il fenomeno dei transiti che l'osservazione delle velocità radiali.



Un po' di storia

Il XX secolo

Previsioni di Otto Struve

(The Observatory, 72, 199-200 (1952))

PROPOSAL FOR A PROJECT OF HIGH-PRECISION STELLAR RADIAL VELOCITY WORK

By Otto Struve

With the completion of the great radial-velocity programmes of the major observatories, the impression seems to have gained ground that the measurement of Doppler displacements in stellar spectra is less important at the present time than it was prior to the completion of R. E. Wilson's new radial-velocity catalogue.

I believe that this impression is incorrect, and I should like to support my contention by presenting a proposal for the solution of a characteristic astrophysical problem.

One of the burning questions of astronomy deals with the frequency of planet-like bodies in the galaxy which belong to stars other than the Sun. K. A. Strand's¹ discovery of a planet-like companion in the system of 61 Cygni, which was recently confirmed by A. N. Deitch² at Poulkovo, and similar results announced for other stars by P. Van de Kamp³ and D. Reuhl and E. Holmberg⁴ have stimulated interest in this problem. I have suggested elsewhere that the absence of rapid axial rotation in all normal solar-type stars (the only rapidly-rotating G and K stars are either W Ursae Majoris binaries or T Tauri nebular variables,⁵ or they possess peculiar spectra⁶) suggests that these stars have somehow converted their angular momentum of axial rotation into angular momentum of orbital motions of planets. Hence, there may be many objects of planet-like character in the galaxy.

But how should we proceed to detect them? The method of direct photography used by Strand is, of course, excellent for nearby binary systems, but it is quite limited in scope. There seems to be at present no way to discover objects of the mass and size of Jupiter; nor is there much hope that we could discover objects ten times as large in mass as Jupiter, if they are at distances of one or more astronomical units from their parent stars.

But there seems to be no compelling reason why the hypothetical stellar planets should be more numerous than is the case. It is therefore test whether there are a

Velocità Radiali

We know that stellar companions can exist at very small distances. It is not unreasonable that a planet might exist at a distance of 1/50 astronomical unit, or about 3,000,000 km. Its period around a star of solar mass would then be about 1 day.

We can write Kepler's third law in the form $V^3 \sim \frac{1}{P}$. Since the orbital velocity of the Earth is 30 km/sec, our hypothetical planet would have a velocity of roughly 200 km/sec. If the mass of this planet were equal to that of Jupiter, it would cause the observed radial velocity of the parent star to oscillate with a range of ± 0.2 km/sec—a quantity that might be just detectable with the most powerful Coudé spectrographs in existence. A planet ten times the mass of Jupiter would be very easy to detect, since it would cause the observed radial velocity of the star to oscillate with ± 2 km/sec. This is correct only for those orbits whose inclinations are 90° . But even for more moderate inclinations it should be possible, without much difficulty, to discover planets of 10 times the mass of Jupiter by the Doppler effect.

There would, of course, also be eclipses. Assuming that the mean density of the planet is five times that of the star (which may be optimistic for such a large planet) the projected eclipsed area is about 1/50th of that of the star, and the loss of light in stellar magnitudes is about 0.02. This, too, should be ascertainable by modern photoelectric methods, though the spectrographic test would probably be more accurate. The advantage of the photometric procedure would be its fainter limiting magnitude compared to that of the high-dispersion spectrographic technique.

Permitted spectrographic systems, where the convenient and reliable standard of velocity, and should help in establishing at once whether one (or both) members are spectroscopic binaries of the type here considered.

Fenomeno dei Transiti

Berkeley Astronomical Department,
University of California.
1952 July 24.

References

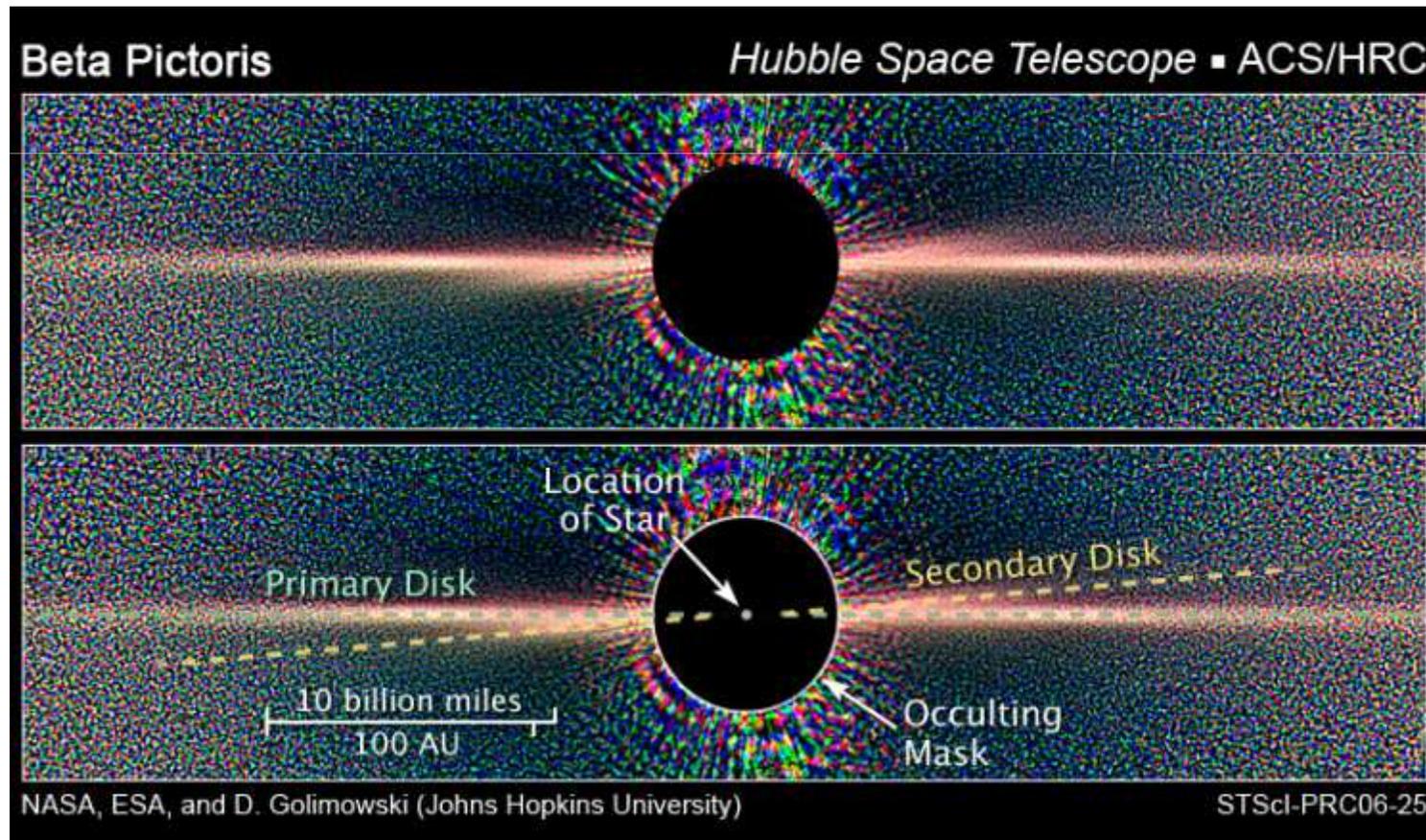
1. *A. J.*, 51, 12, 1944; *Pub. A.S.P.*, 55, 29, 1952.
2. *Izvestia Gl. Astr. Obs., Poulkovo*, 18, No. 146, 1951.
3. *A. J.*, 51, 7, 1944.
4. *Ap. J.*, 97, 41, 1943.
5. See G. Herbig's paper presented at the Victoria 1952 meeting of the A.A.S. and A.S.P.
6. See P. W. Merrill's note on HD 117555 in *Pub. A.S.P.*, 60, 382, 1948.

Un po' di storia

Il XX secolo

Nel 1984 avviene la scoperta che inizia ad aprire un nuovo orizzonte:

attorno alla stella β Pictoris c'è un disco di materia !



Un po' di storia

Il XX secolo

Negli anni successivi vengono fatti diversi annunci di scoperte.

Nel 1989 Latham scopre un corpo di circa $10 M_J$ attorno alla stella HD 114762.

Nel 1991 Alexander Wolszczan identifica due pianeti di massa paragonabile alla massa terrestre, ma in orbita attorno ad una pulsar (PSR 1257+12).

Nel 1993 Gordon Walker sostiene l'ipotesi che le oscillazioni della velocità radiale della stella γ Cephei potrebbero essere dovute alla presenza un pianeta di circa $2 M_J$.

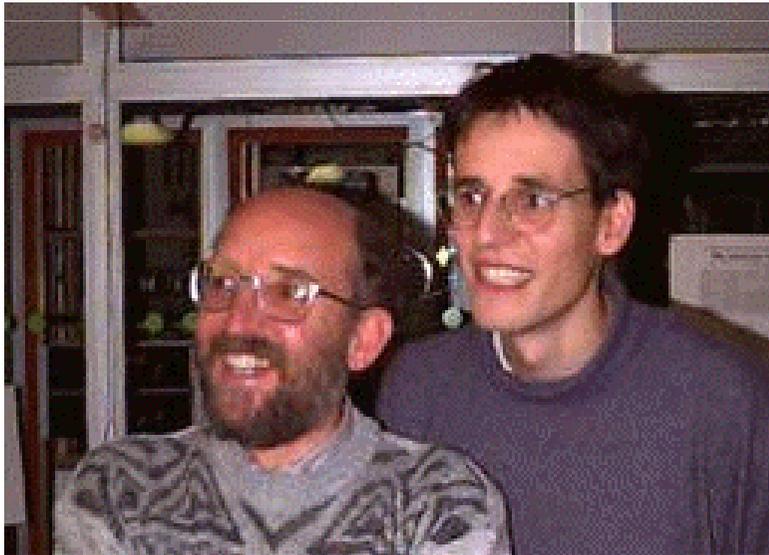
Sono troppo “strani” e le tecniche ancora non sufficientemente precise; la comunità scientifica non prende troppo sul serio questi eventi.

Un po' di storia

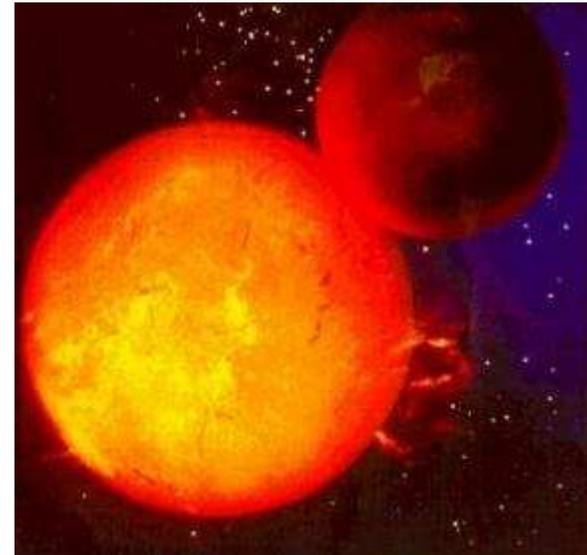
Il XX secolo

Il 6 ottobre 1995, a Firenze, venne annunciata la scoperta di un pianeta attorno alla stella 51 Pegasi, molto simile al Sole, distante 50 anni luce.

Il pianeta è circa 160 volte più massiccio della Terra e orbita attorno alla sua stella in poco più di 4 giorni a 7,5 milioni di km.



Gli scopritori: Michel Mayor e Didier Queloz dell'Osservatorio di Ginevra



Rappresentazione artistica di 51 Pegasi

Un po' di storia

Oggi

Il 6 ottobre 1995 può essere considerata la data che ha segnato l'inizio della ricerca sistematica e convinta di pianeti extrasolari.

*Al 31 maggio 2011 sono noti 552 pianeti extrasolari
intorno a 461 stelle.*

401 sistemi con 1 pianeta
42 sistemi con 2 pianeti
10 sistemi con 3 pianeti
5 sistemi con 4 pianeti
1 sistema con 5 pianeti
2 sistemi con 6 pianeti

Fonte: <http://exoplanet.eu>

Tecniche per la rilevazione

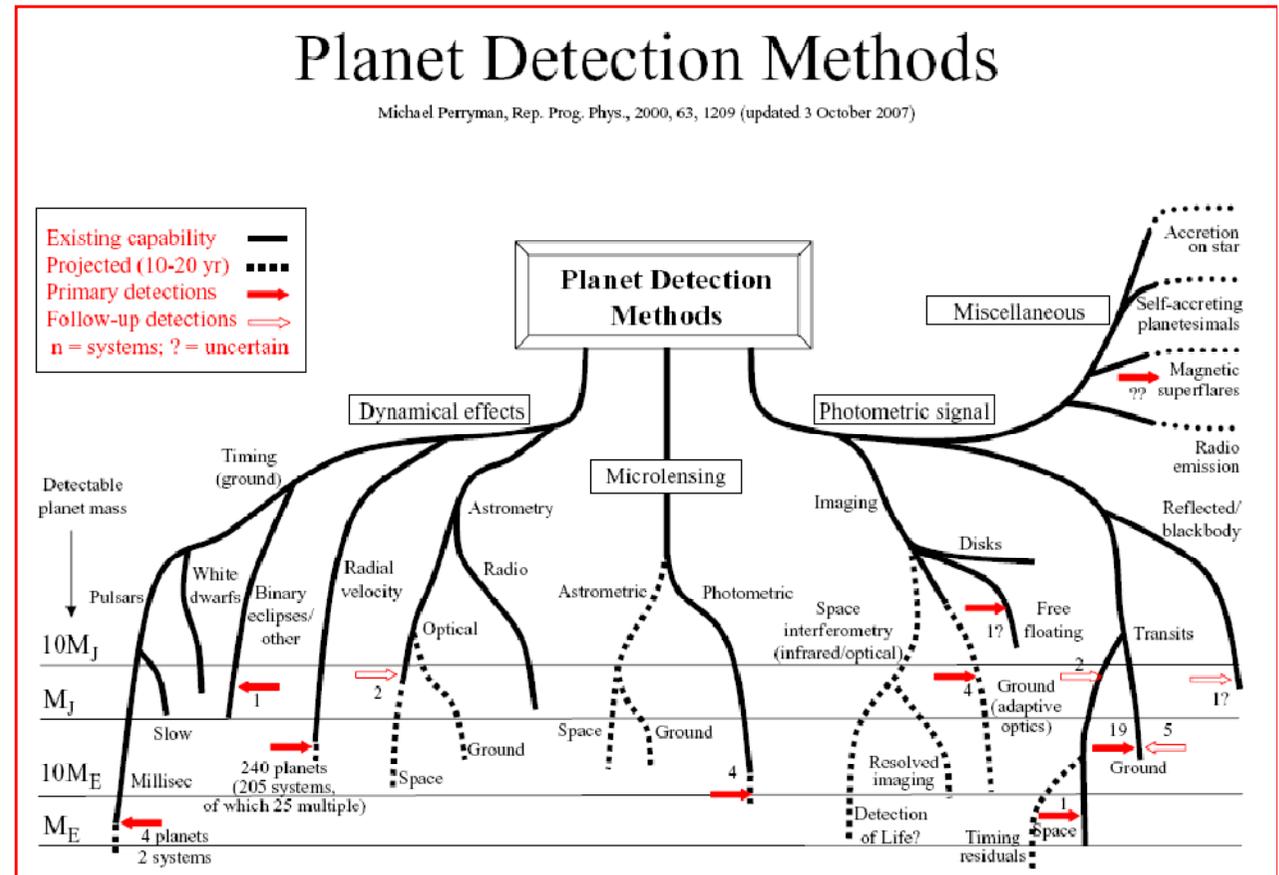
I metodi di rilevamento

Metodi diretti:

individuazione della presenza di un pianeta osservando la radiazione proveniente dall'oggetto.

Metodi indiretti:

studio degli effetti del pianeta (o dei pianeti) sul moto della stella intorno alla quale orbita.



Tecniche per la rilevazione

Metodi diretti

Un pianeta, che orbita intorno ad una stella di luminosità L_* , avrà una luminosità L_P che dipende dalla lunghezza d'onda λ , dal raggio planetario R_P e dal semiasse maggiore dell'orbita:

$$\frac{L_P}{L_*} = p(\lambda, \alpha) \left(\frac{R_P}{a} \right)^2$$

dove $p(\lambda, \alpha)$ è una funzione che tiene conto dell'inclinazione dell'orbita e delle proprietà dell'atmosfera del pianeta.

α è la distanza angolare del pianeta dalla stella.

Da circa 16 anni luce di distanza il Sole è 10^9 volte più luminoso di Giove.

Tecniche per la rilevazione

Metodi diretti

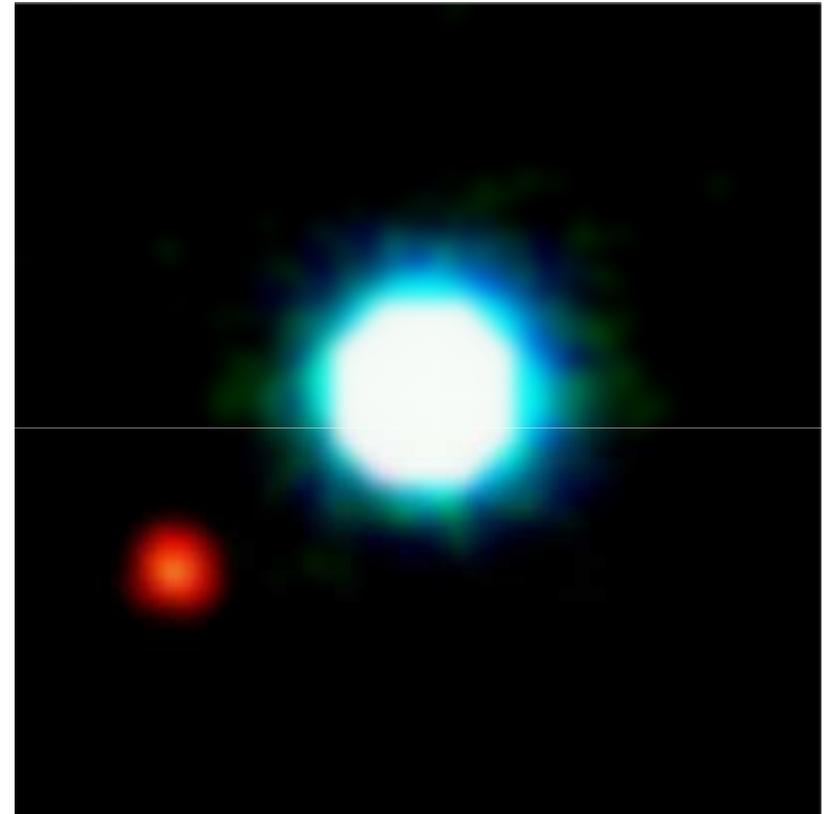
A causa delle diverse temperature della stella e del pianeta, nell'infrarosso, il rapporto migliora di un fattore 10^5 .

Per il sistema Sole-Giove ciò accade per $\lambda = 20 \mu\text{m}$.

Problemi come la diffrazione dello strumento e il seeing atmosferico, nei moderni telescopi, vengono superati con tecniche molto sofisticate.

Col metodo diretto oggi sono stati rilevati 24 candidati intorno a 21 stelle.

La stragrande maggioranza dei pianeti extrasolari viene scoperta con metodi indiretti



2M1207 b, uno dei 24 pianeti extrasolari scoperti per osservazione diretta

Tecniche per la rilevazione

Metodi indiretti

METODI DINAMICI

- Metodo astrometrico
- Metodo della velocità radiale (422 sistemi, 504 pianeti, 51 sistemi multipli)
- Metodo del Pulsar Timing (7 sistemi, 12 pianeti, 4 sistemi multipli)

METODI FOTOMETRICI

- Metodo di microlensing (11 sistemi, 12 pianeti, 1 sistema multiplo)
- Metodo del transito (124 sistemi, 132 pianeti, 10 sistemi multipli)

METODI ALTERNATIVI

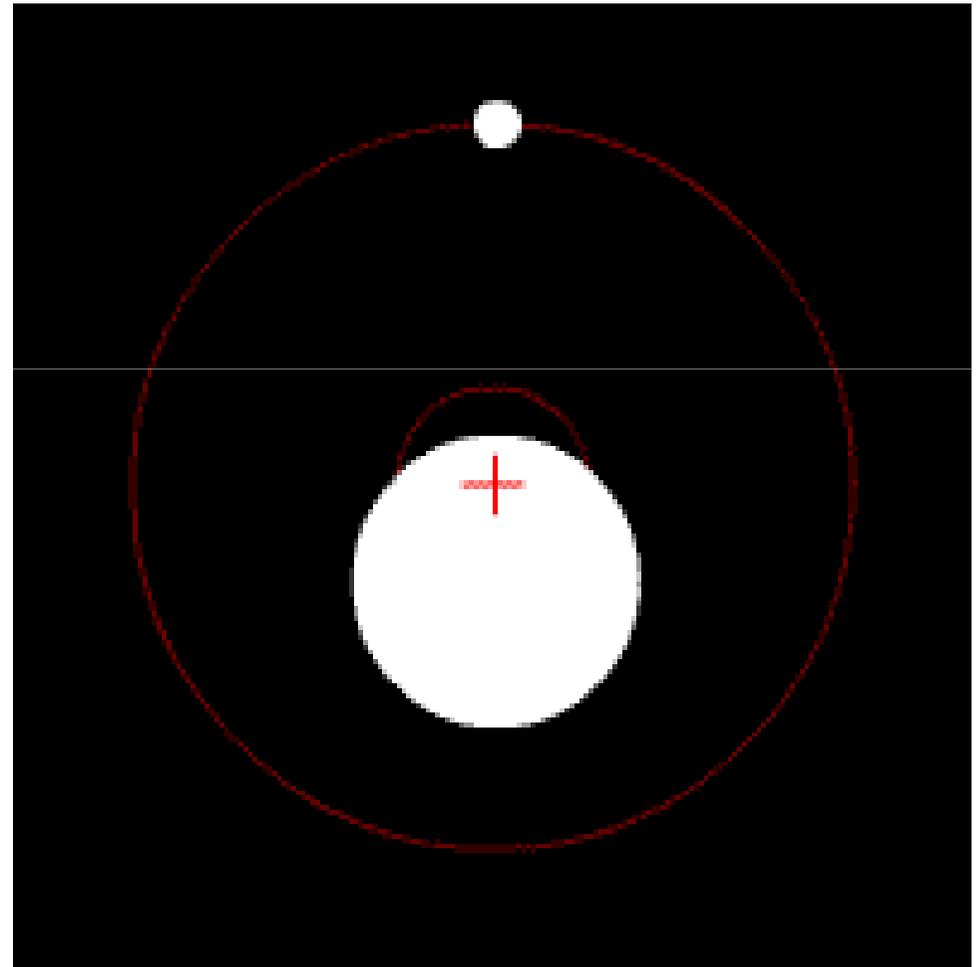
- Tracce di dischi di polveri
- Emissione radio
- Emissione di onde gravitazionali

Tecniche per la rilevazione

Metodo astrometrico

Consiste nella misurazione dello spostamento di una stella sulla sfera celeste dovuto alla presenza di un pianeta.

La proiezione del moto della stella, intorno al baricentro del sistema, su un piano perpendicolare alla linea di vista, è un'ellisse.

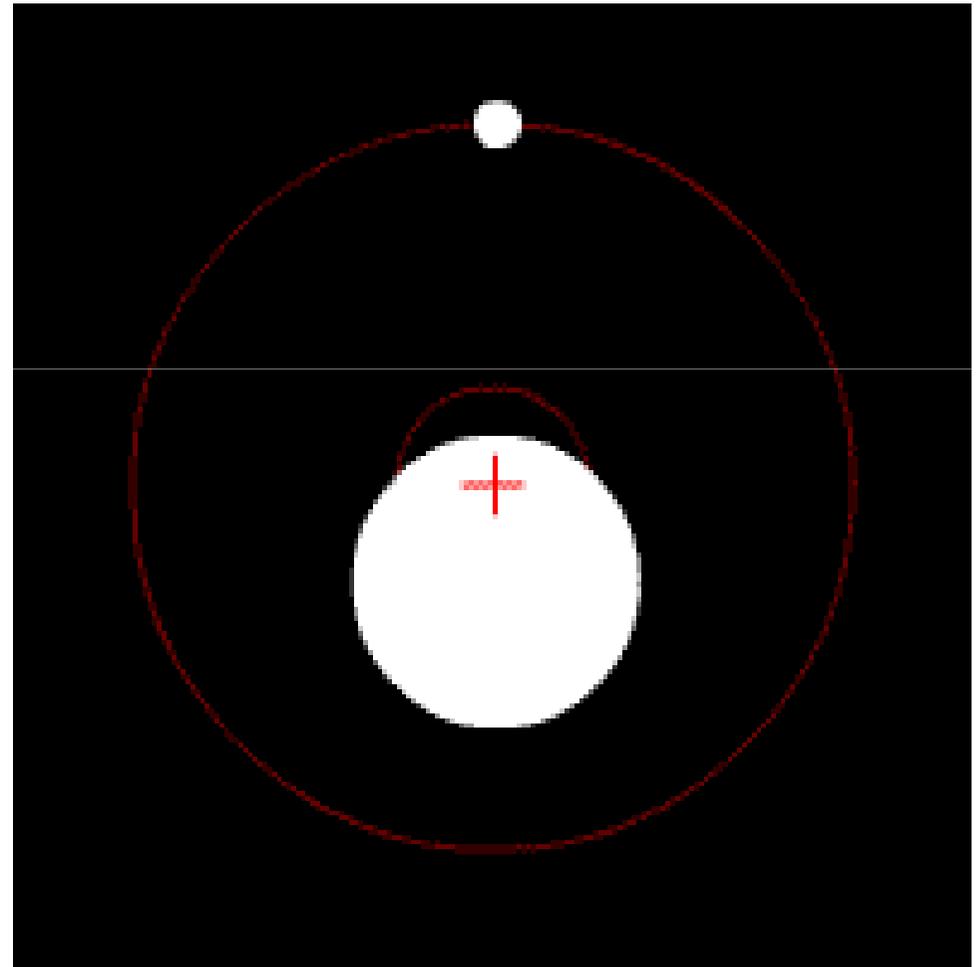


Tecniche per la rilevazione

Metodo astrometrico

Giove, a 10 anni luce, provoca al Sole un'oscillazione di circa 3,2 millesimi di secondo d'arco in circa 12 anni.

La Terra, alla stessa distanza, solo 2 milionesimi di secondo d'arco.



Tecniche per la rilevazione

Metodo astrometrico

Con questa tecnica si possono rilevare solo pianeti molto massicci e molto vicini alla propria stella: i cosiddetti **pianeti gioviani caldi** (*hot Jupiter*).

Un pianeta gioviano caldo ha una massa confrontabile con quella di Giove, ma orbita a meno di 0,05 UA (7,5 milioni di chilometri) dalla propria stella, ovvero è otto volte più vicino ad essa rispetto a quanto Mercurio dista dal Sole.

La temperatura tipica di questi oggetti, nella parte rivolta verso il loro sole, raggiunge facilmente migliaia di gradi.



*Rappresentazione artistica di HD 209458b.
La coda blu è l'atmosfera del pianeta che
evapora a causa della vicinanza eccessiva
alla sua stella.*

Tecniche per la rilevazione

Metodo astrometrico

Il Satellite **GAIA** (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics), una missione spaziale astrometrica dell'ESA, compilerà un catalogo di circa un miliardo di stelle con l'obiettivo principale di effettuare misure astrometriche di altissima precisione.

Il satellite determinerà la posizione esatta di ogni stella in tempi diversi, ciò permetterà di effettuare senza dubbio scoperte di pianeti extrasolari con il metodo astrometrico.

Il lancio è previsto per la primavera del 2012, e il satellite occuperà un'orbita attorno a L2.



Rappresentazione artistica della missione dell'ESA GAIA

Tecniche per la rilevazione

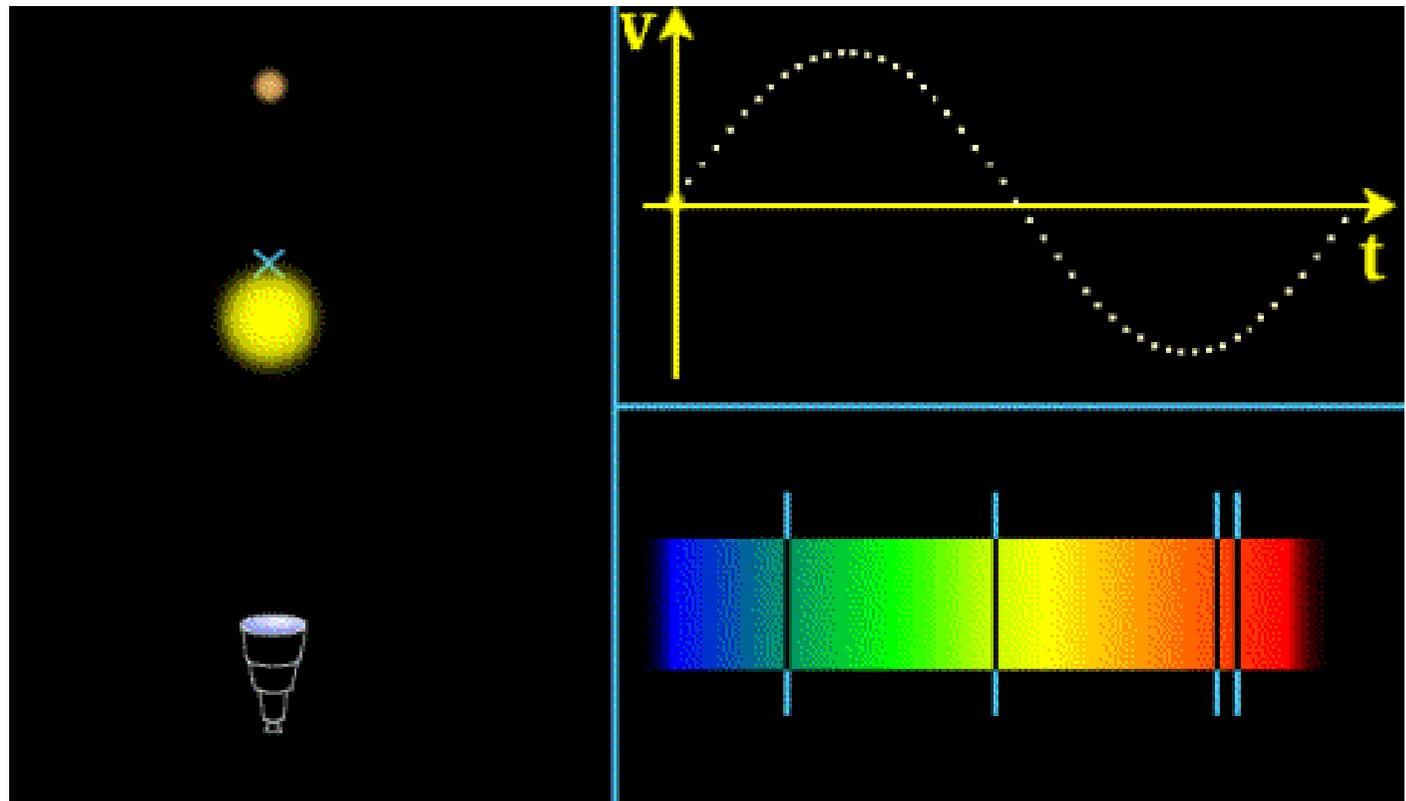
Metodo della velocità radiale

La presenza di un pianeta intorno ad una stella produce in essa una variazione della componente radiale della velocità.

Analizzando gli spostamenti delle sue righe spettrali, dovuti all'effetto Doppler, si possono dedurre alcune caratteristiche fisiche del pianeta.

Gli spostamenti dello spettro sono molto piccoli!

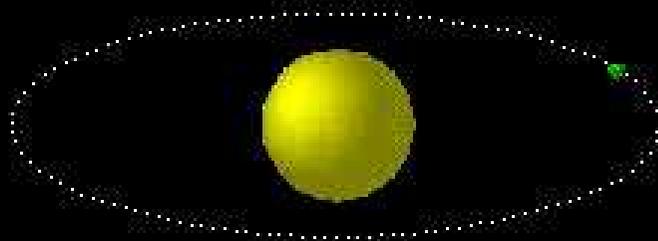
Giove produce sul Sole uno spostamento delle righe di $\sim 10^{-5}$ nm.



Tecniche per la rilevazione

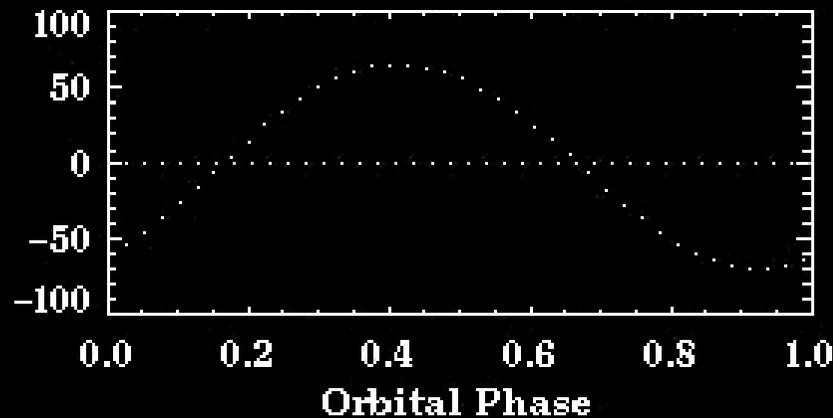
Metodo della velocità radiale

Circular Orbit: rho CrB



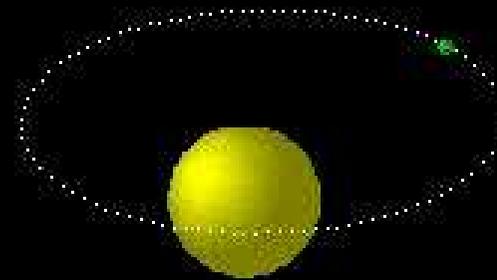
$K = 67.4 \text{ m/s}$ $e = 0.03$
 $\omega = 210.0 \text{ deg.}$ $\sin(i) = 0.3$ (*)

Radial Velocity Curve
of the Star [m/s]



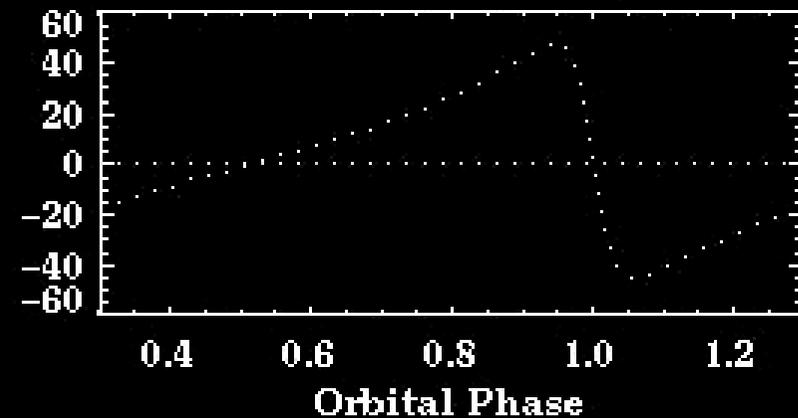
S.G. Korzennik (CfA, © 1997)

Highly Eccentric Orbit: 16 Cyg B



$K = 46.6 \text{ m/s}$ $e = 0.67$
 $\omega = 86.8 \text{ deg.}$ $\sin(i) = 0.3$ (*)

Radial Velocity Curve
of the Star [m/s]

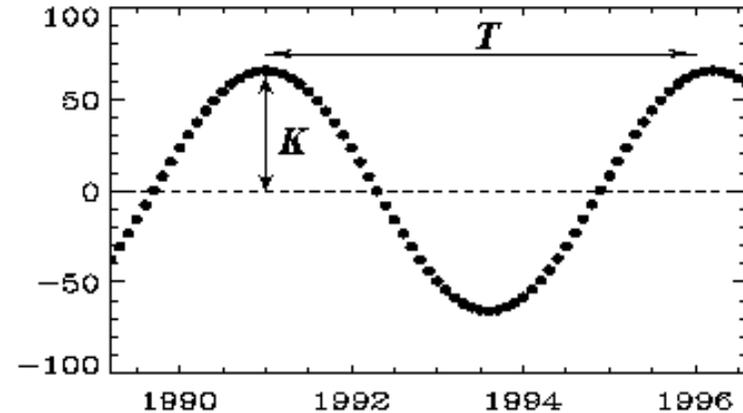


S.G. Korzennik (CfA, © 1997)

Tecniche per la rilevazione

Metodo della velocità radiale

Il modulo K dell'ampiezza dell'oscillazione della velocità radiale di una stella avente massa M_* , dovuta all'interazione con un oggetto di massa M_P , è dato da



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

Dove T ed e sono il periodo e l'eccentricità dell'orbita e i è l'angolo che il piano orbitale forma con il piano perpendicolare alla linea di vista (osservatore - stella).

Tecniche per la rilevazione

Metodo della velocità radiale

Dalla misurazione della variazione della velocità radiale si deduce il periodo T e l'eccentricità; essendo $M_p \ll M_*$, dalla terza legge di Keplero si ricava il semiasse maggiore dell'orbita. Si ottiene quindi una stima dalla massa del pianeta:

$$M_p \sin i \cong \left(\frac{T}{2\pi G} \right)^{1/3} \cdot K \cdot M_*^{2/3} \sqrt{1-e^2}$$

Nella maggior parte dei casi non si conosce l'angolo di inclinazione dell'orbita i e quindi si può determinare solo un limite inferiore per la massa.

Tecniche per la rilevazione

Metodo della velocità radiale

Oltre alla stima della massa del pianeta, la conoscenza dell'intera curva della velocità radiale porta alla determinazione dei parametri di un'orbita kepleriana:

- la velocità del centro di massa del sistema (detta *velocità sistemica*)
- la semiampiezza della velocità
- il periodo orbitale (e quindi il semiasse maggiore)
- l'epoca del passaggio al periastro
- l'eccentricità
- l'argomento del periastro.

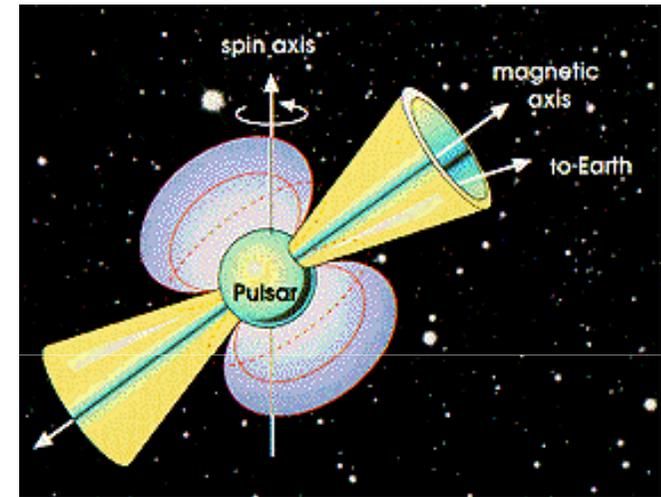
Fino ad oggi è la tecnica che ha dato i maggiori risultati.

Tecniche per la rilevazione

Metodo del Pulsar Timing

Il metodo consiste nella misurazione delle variazioni degli intervalli di emissioni di una pulsar.

Una pulsar (il residuo piccolo e ultradenso di una stella che è esplosa in una supernova) ruotando emette onde radio a intervalli estremamente regolari.



Essenzialmente esistono due tipi di pulsar:

- **Normal Pulsar**, con periodi di rotazione dell'ordine del secondo
- **Millisecond Pulsar**, con periodi dell'ordine del millisecondo

Tecniche per la rilevazione

Metodo del Pulsar Timing

Le Millisecond Pulsar hanno un periodo di rotazione oltre che molto breve anche molto stabile nel tempo. L'ordine di variazione è di un secondo in 10^{19} s, contro i 10^{15} delle Normal Pulsar.

Piccole anomalie negli intervalli delle emissioni possono essere usate per tracciare cambiamenti nel moto della pulsar, causati dalla presenza di uno o più pianeti.

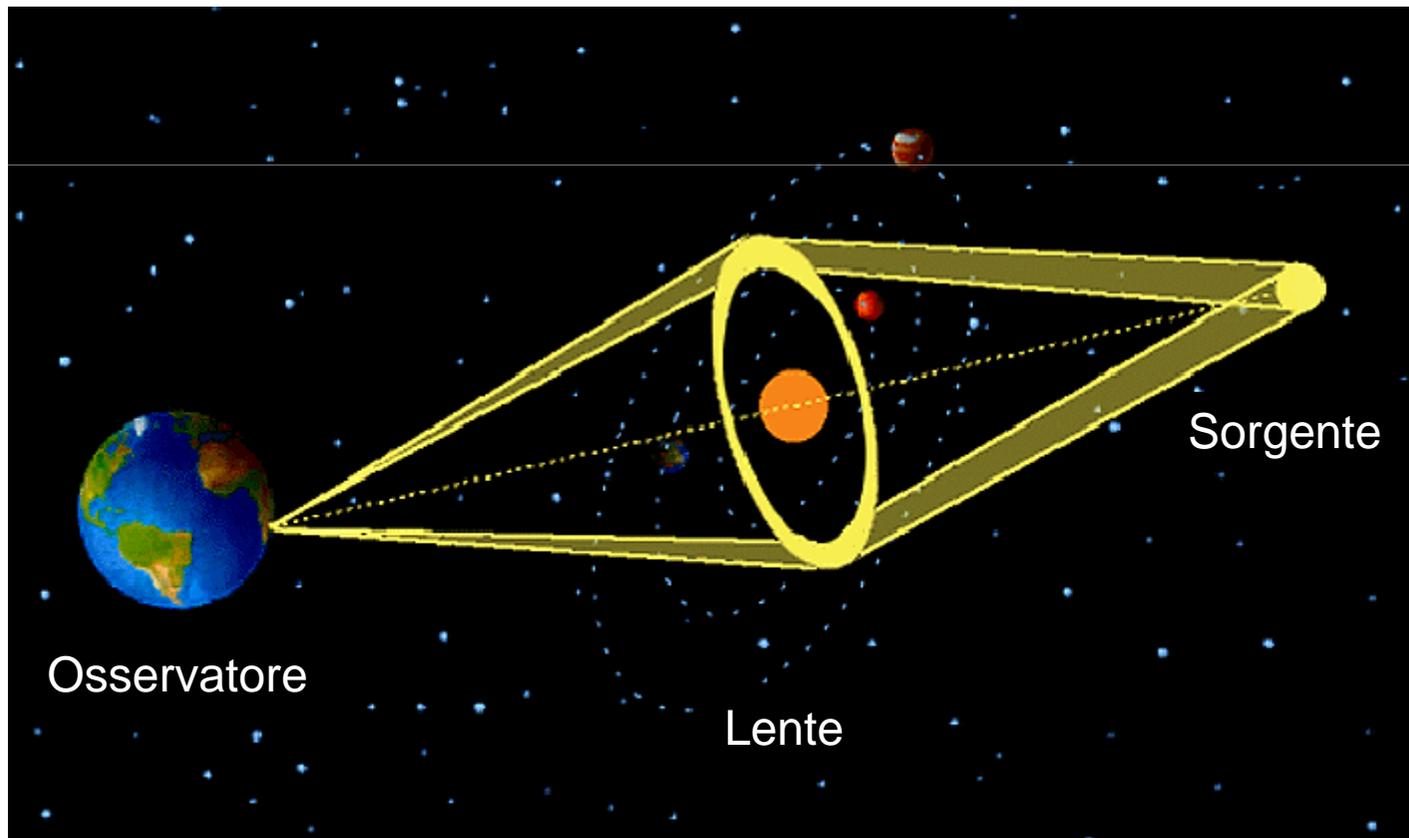
Grazie alla precisione delle attuali misure nelle radiofrequenze si può apprezzare una variazione della frequenza d'arrivo dell'ordine $\Delta v/v \approx 10^{-11}$ che equivale ad una velocità radiale di 1 cm/s.

Ciò permette di rilevare pianeti con masse inferiori a quelle della Terra.

Tecniche per la rilevazione

Metodo di microlensing

Quando la luce proveniente da una stella lontana passa in prossimità di una stella più vicina viene incurvata producendo un aumento di luminosità (*effetto lente gravitazionale*).

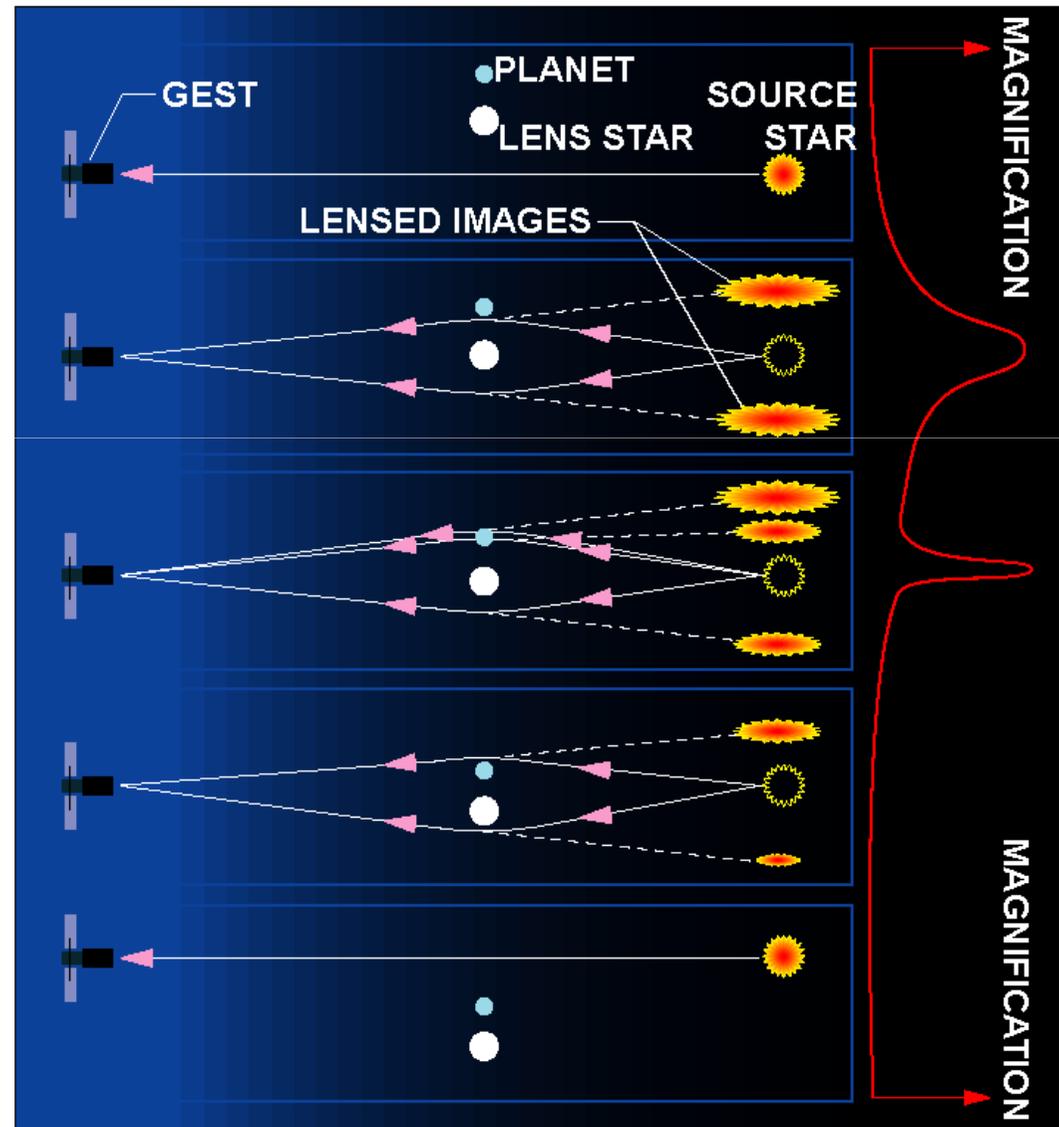


Tecniche per la rilevazione

Metodo di microlensing

La geometria della lente porta ad un aumento di magnitudine della stella misurabile.

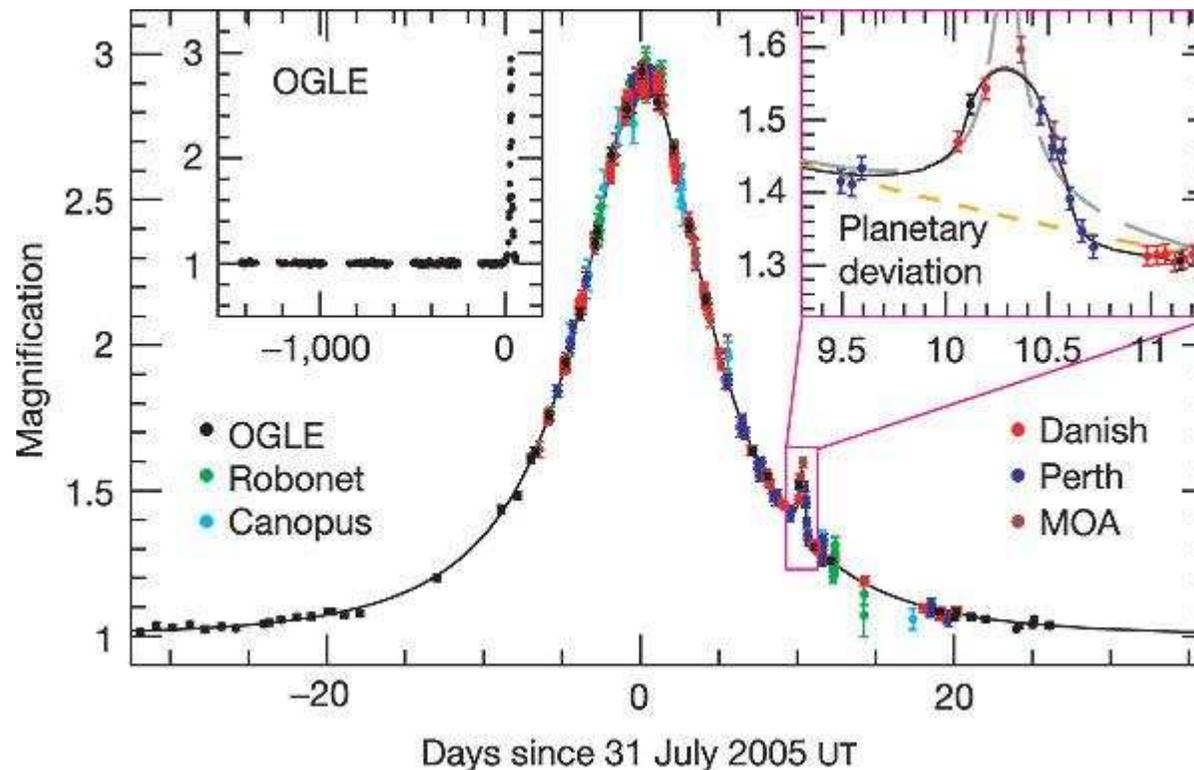
Quando si scopre un evento di microlensing si analizza la curva di luce della stella alla ricerca di difetti della lente dovuti alla presenza di un pianeta



Tecniche per la rilevazione

Metodo di microlensing

Se la stella vicina ha un pianeta si produce un secondo picco di luminosità.

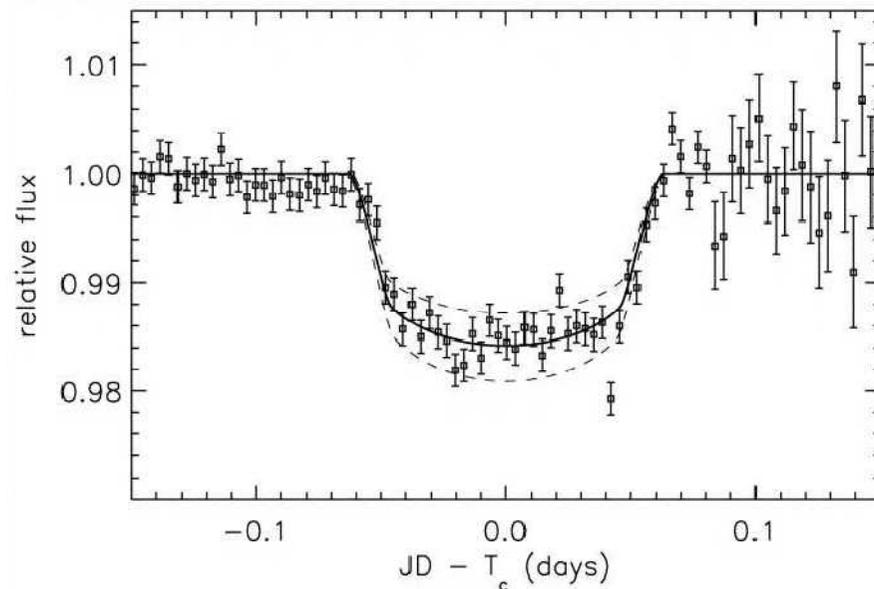


Tipica curva di luce di un evento di microlensing con la presenza di un pianeta.

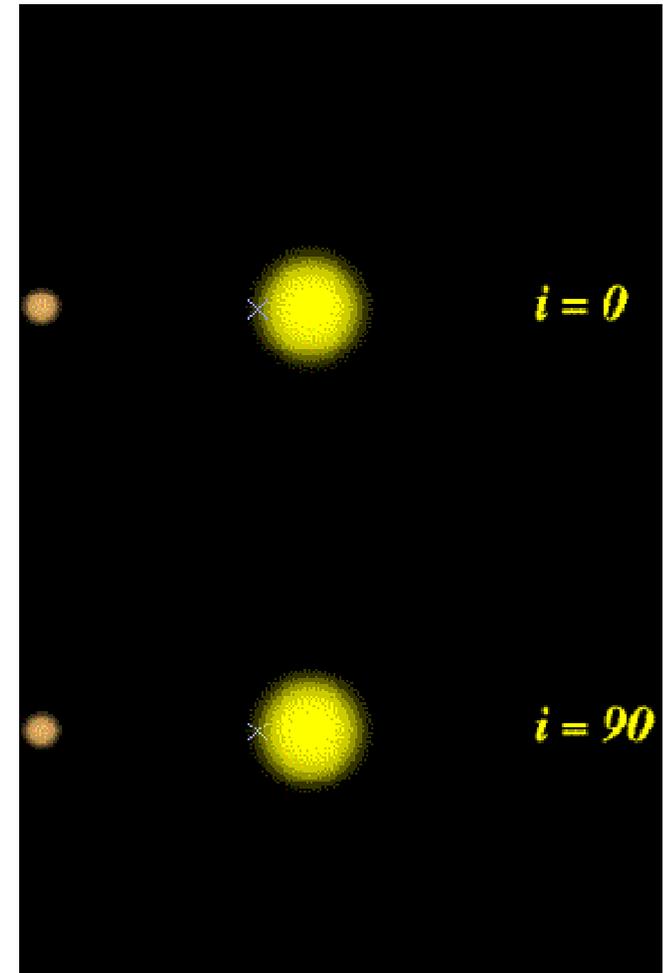
Tecniche per la rilevazione

Metodo del transito

Se un pianeta passa davanti alla sua stella provoca una piccola eclisse e la luminosità della stella diminuisce leggermente.



La curva di luce di HD 209458: il primo transito planetario osservato.



Tecniche per la rilevazione

Tracce di dischi di polveri

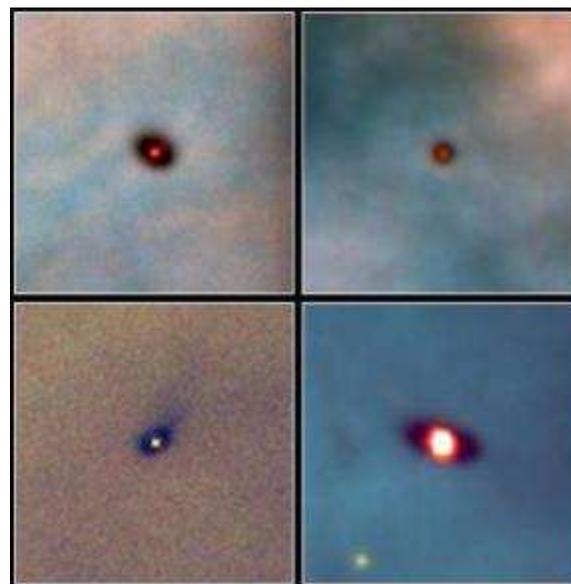
Un approccio recente consiste nello studio delle nubi di polveri.

Molti sistemi solari contengono una quantità notevole di polvere, la cui presenza è dovuta a passaggi di comete e di collisioni tra asteroidi e pianeti.

Questa polvere forma un disco attorno alla stella, assorbe una parte della sua radiazione e la riemette come

radiazione infrarossa.

La pressione di radiazione esercitata dalla stella spingerebbe le particelle di polvere nello spazio interstellare in un tempo scala relativamente breve.



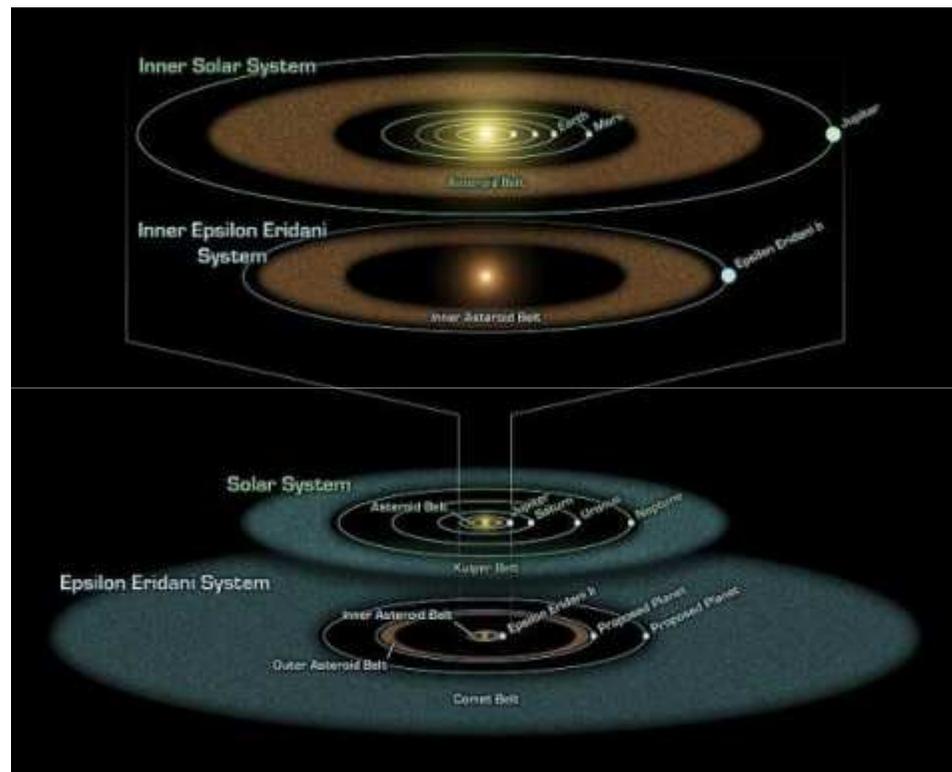
*Dischi
protoplanetari
nella nebulosa
di Orione*

Tecniche per la rilevazione

Tracce di dischi di polveri

La rilevazione di polvere indica un continuo rimpiazzamento dovuto a nuove collisioni, e fornisce una evidenza indiretta della presenza di piccoli oggetti quali comete ed asteroidi che orbitano attorno alla stella madre.

Il rilevamento di una eventuale cavità centrale nel disco è compatibile con l'ipotesi dell'esistenza di un pianeta che sta spazzando la polvere presente nella propria orbita, mentre la presenza di un "grumi" potrebbe essere determinata dall'influenza gravitazionale di un pianeta.



Entrambe queste caratteristiche sono presenti nel disco di polvere che circonda ϵ Eridani e suggeriscono la presenza di un pianeta con un raggio orbitale di circa 40 UA.

Tecniche per la rilevazione

Tracce di dischi di polveri

Il nostro Sistema Solare contiene una quantità di polvere pari ad un decimo della massa della Luna; questa quantità è insignificante nel totale della massa, ma il volume è così elevato che, da grandi distanze, l'emissione infrarossa della polvere sarebbe 100 volte più intensa di quella di tutti i pianeti.

Questo metodo può oggi essere utilizzato anche da Terra, ma le osservazioni migliori vengono dallo spazio.

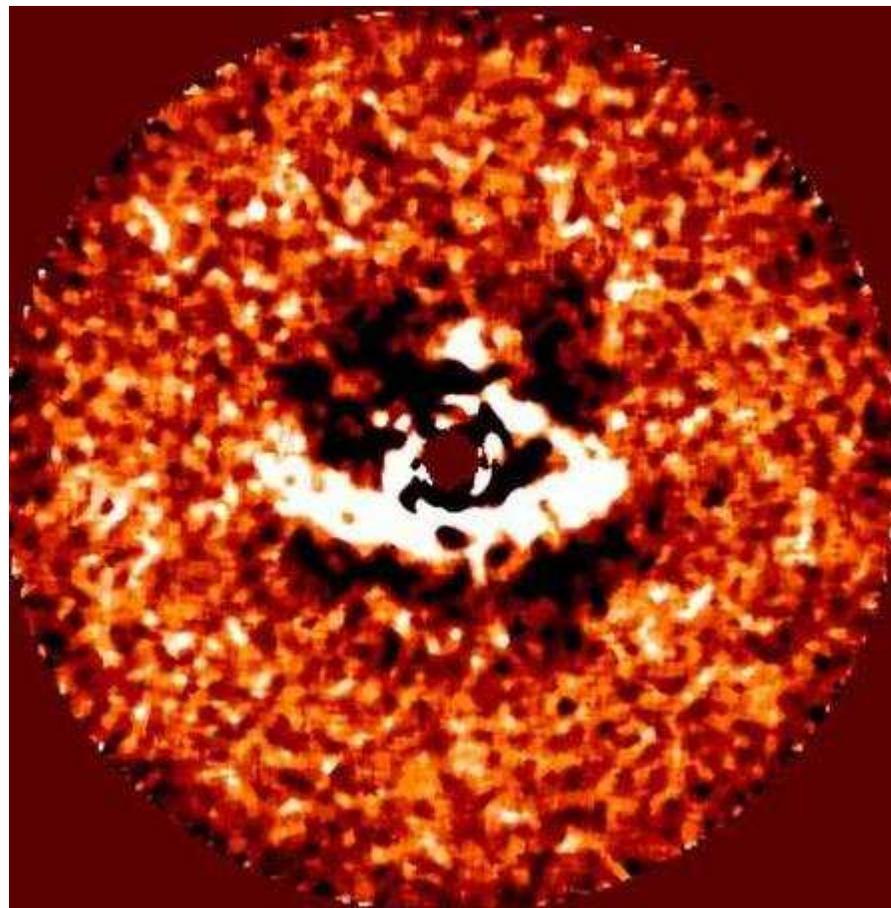


Immagine del Telescopio Subaru del disco protoplanetario intorno alla stella LkCa 15, una stella di pochi milioni di anni, situata a circa 450 a.l. Precedenti osservazioni aveva rilevato la presenza di un vuoto al centro del disco; le nuove immagini mostrano una forte luce brillante dalla superficie del disco che evidenzia il bordo di tale vuoto, così grande che potrebbe contenere il sistema solare. Ha una forma ellittica, ma non è centrato nella stella; ciò fa ipotizzare la presenza di uno o più pianeti.