

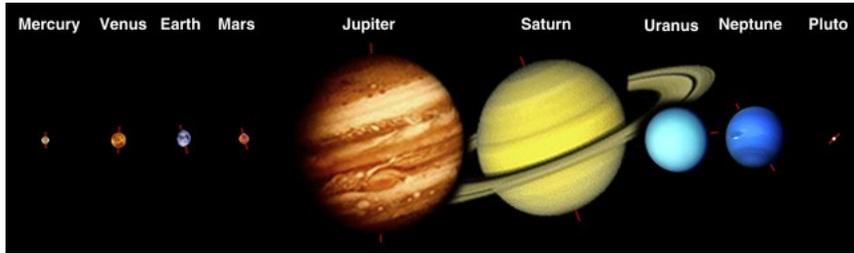


# Lezione 4

## Sistemi Planetari

Questa unità descrive le proprietà dei pianeti del Sistema Solare e dei sistemi planetari in genere, la teoria di formazione di un sistema planetario e infine la ricerca di sistemi planetari attorno a stelle diverse dal Sole.

# Proprietà del Sistema Solare



Le orbite dei pianeti giacciono tutte sullo stesso piano con piccole deviazioni, in particolare del pianeta più vicino al Sole, Mercurio.

$$1 \text{ U.A.} = 1.5 \times 10^8 \text{ km}$$

$$1 \text{ A.L.} = (3 \times 10^5 \text{ km/s}) \times (3.15 \times 10^7 \text{ s}) = 9.45 \times 10^{12} \text{ km}$$

$$1 \text{ pc} = 3.26 \text{ A.L.} = 3.09 \times 10^{13} \text{ km}$$

In figura sono mostrati i pianeti del Sistema Solare. Le dimensioni reciproche sono rispettate, mentre le distanze no.

In basso sono riportate le unità di misura tipicamente usate in astronomia: l'unità astronomica, ossia il raggio medio dell'orbita terrestre, l'anno-luce, ossia la distanza percorsa dalla luce in un anno e infine il parsec, ossia la distanza alla quale si vede perpendicolarmente l'unità astronomica sotto un angolo di  $1''$ .

- Il Sole ruota su se stesso con un periodo medio di circa 25 giorni, corrispondente ad una velocità tangenziale equatoriale di circa 2 km/s.
- I pianeti ruotano attorno al Sole nello stesso verso e le orbite sono quasi rigorosamente circolari, con l'eccezione di Mercurio. Anche Marte ha un'orbita con un'eccentricità apprezzabile.
- I pianeti a loro volta ruotano attorno al proprio asse che per la maggioranza dei pianeti è quasi perpendicolare al piano dell'orbita. Eccezioni importanti sono quella di Venere, che ha un moto retrogrado, e di Urano, che ha l'asse di rotazione quasi parallelo al piano dell'orbita.

Per confronto la velocità circolare all'equatore della Terra è circa 460 m/s, mentre su Giove è di circa 12.6 km/s.

planets not shown to scale >>									
	Mercury	Venus	Earth	Mars	Jupiter	Saturn	Uranus	Neptune	Pluto
Mean Distance from the Sun (AU)	0.3871	0.7233	1	1.524	5.203	9.539	19.19	30.06	39.48
Sidereal period of orbit (years)	0.24	0.62	1	1.88	11.86	29.46	84.01	164.79	248.54
Mean Orbital Velocity (km/sec)	47.89	35.04	29.79	24.14	13.06	9.64	6.81	5.43	4.74
Orbital Eccentricity	0.206	0.007	0.017	0.093	0.048	0.056	0.046	0.010	0.248
Inclination to ecliptic (degrees)	7.00	3.40	0	1.85	1.30	2.49	0.77	1.77	17.15
Equatorial Radius (km)	2439	6052	6378	3397	71490	60268	25559	25269	1160
Polar Radius (km)	same	same	6357	3380	66854	54360	24973	24340	same
Mass of planet (Earth=1)	0.06	0.82	1	0.11	317.89	95.18	14.53	17.14	0.002
Mean density (grams/centimeter <sup>3</sup> )	5.43	5.25	5.52	3.95	1.33	0.69	1.29	1.64	2.03
Body rotation period (hours)	1408	5832	23.93	24.62	9.92	10.66	17.24	16.11	153.3
Tilt of equator to orbit (degrees)	2	177.3	23.45	25.19	3.12	26.73	97.86	29.6	122.46
Number of observed satellites	0	0	1	2	>28	30	24	8	1

$$D_{TS} = 1.5 \times 10^8 \text{ km} = 1 \text{ U. A.}$$

$$T_{Terra} = 365 \text{ giorni} = 8760 \text{ ore} = 3.15 \times 10^7 \text{ sec}$$

$$M_{Terra} = 6 \times 10^{24} \text{ kg}$$

In tabella sono riportati i principali parametri per i pianeti del sistema solare.

Come si nota, al crescere della distanza dal Sole, aumenta il periodo orbitale e diminuisce la velocità orbitale media.

I pianeti con orbite più eccentriche, ossia meno circolari sono Mercurio (0.206) e Marte (0.093), come detto prima.

A parte Plutone, l'inclinazione delle orbite dei pianeti rispetto a quella terrestre sono molto piccole, entro qualche grado.

A parte Plutone, i pianeti più piccoli, più densi (tra 3 e 5 volte la densità dell'acqua) e meno massicci sono i 4 più vicini al Sole. Gli altri 4 pianeti sono più lontani, hanno tutti masse di diversi ordini di grandezza superiore e densità paragonabile all'acqua.



Mercurio      Venere      Terra      Marte

**Pianeti interni o terrestri**  
 $D_{\text{sole}} < 250$  milioni di km

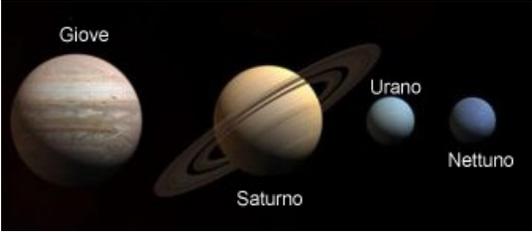
$T_{\text{PI}} > T_{\text{PE}}$

$r_{\text{PI}} < r_{\text{PE}}$

$M_{\text{PI}} < M_{\text{PE}}$

**Pianeti esterni o gioviani**  
 $D_{\text{sole}} > 700$  milioni di km



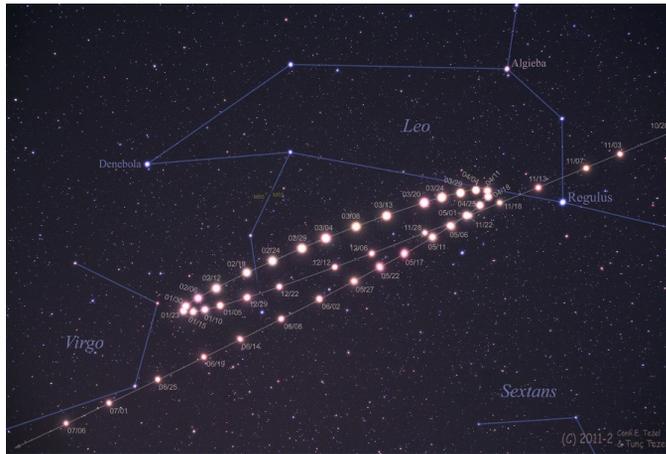
Giove      Saturno      Urano      Nettuno

Una regolarità importante nel sistema solare è la netta separazione dei pianeti in due famiglie principali con distanze dal Sole e proprietà fisiche distinte. I 4 pianeti più vicini al Sole o pianeti interni (Mercurio, Venere, Terra e Marte), detti anche **pianeti terrestri**, si trovano tutti entro circa 250 milioni di km dal Sole, mentre il successivo, Giove, è ad una distanza superiore ai 700 milioni di km. I pianeti esterni (Giove, Saturno, Urano, Nettuno) vengono chiamati anche **pianeti giovani** e si distinguono non solo per la distanza, ma anche per la più bassa temperatura che ne consegue, per la grande dimensione e per la densità notevolmente inferiore a quella dei pianeti terrestri. I valori superficiali di temperatura dei pianeti misurabili da Terra vanno da circa 300° C di Mercurio, nella parte rivolta al Sole, a circa -250° C di Plutone.

# Le Leggi di Keplero



Keplero (1571-1630)



Keplero trascorse tanto tempo studiando, con i dati di Tycho Brahe (suo maestro, morto nel 1601), l'orbita di Marte, che rivelava essere tutt'altro che una circonferenza. Alcuni punti del cerchio non collimavano con i dati di Tycho: Keplero rilevò uno scostamento di  $8'$  d'arco dalle osservazioni di Brahe.

L'ellisse è una figura il cui contorno è il risultato del taglio trasversale di un cono circolare. La forma di questo contorno dipende dall'inclinazione del taglio rispetto alla base del cono. La forma ottenuta è circolare se, e solo se, il taglio viene effettuato parallelamente alla base del cono.

Per Keplero ciò significava che la possibilità che un pianeta percorresse un'orbita circolare era praticamente nulla

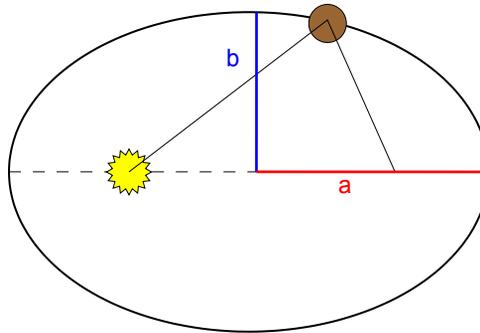
In figura è riportato un esempio del percorso in cielo di Marte durante l'anno.

1. Tutti i pianeti si muovono su orbite ellittiche, di cui il Sole occupa uno dei due fuochi.

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

$$a^2 - c^2 = b^2$$

$$e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}$$



Keplero pubblicò le prime due delle sue famose tre leggi, nel 1609 nell'opera *Astronomia Nova – De motibus stellae Martis ex observationibus Tichonis Brahe*.

La terza legge fu pubblicata nel 1619 nell'opera *Harmonices Mundi*.

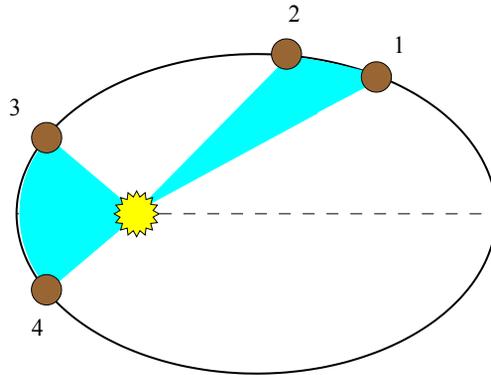
Qui vediamo enunciata la prima Legge di Keplero.

In basso è riportata l'ellisse di centro O con il Sole nel fuoco  $F_1$ . a e b sono i semiassi maggiore e minore, mentre c è la distanza dei fuochi dal centro.

A sinistra vediamo l'equazione dell'ellisse, la relazioni fra a,b e c e l'espressione dell'eccentricità che dà una misura dello schiacciamento dell'orbita ellittica. e varia da 0 a 1, il caso dell'orbita circolare ( $a = b$ ) corrisponde a  $e = 0$ .

2. Il segmento che collega un pianeta al Sole descrive aree uguali in tempi uguali.

$$\frac{\Delta A}{\Delta t} = \text{cost}$$

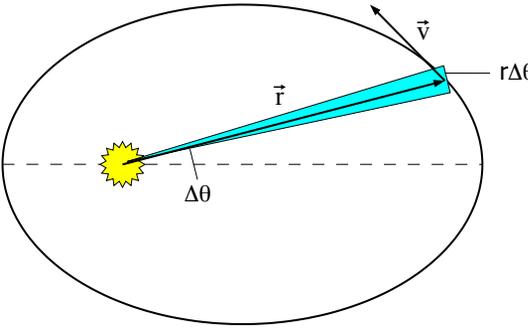


La seconda Legge di Keplero esprime la costanza della velocità areale.

Quando il pianeta si sposta da 1 a 2, il raggio Sole-pianeta descrive un'area identica a quella descritta quando si sposta da 3 a 4. Il tempo per percorrere l'arco 1-2 è identico a quello necessario per percorrere l'arco 3-4.

Di conseguenza, la velocità orbitale del pianeta è più elevata lungo l'arco 3-4 che lungo l'arco 1-2.

In pratica la velocità orbitale varia continuamente ed è massima quando il pianeta è alla minima distanza dal Sole (perielio), mentre è minima quando il pianeta è alla massima distanza dal Sole (afelio).



In un sistema isolato il momento angolare si conserva e il secondo membro è una costante

$$\frac{\Delta A}{\Delta t} = \frac{1}{2} \frac{r \Delta \theta \cdot r}{\Delta t} = \frac{1}{2} r^2 \frac{\Delta \theta}{\Delta t} = \frac{1}{2} r^2 \omega$$

$$\vec{L} = \vec{r} \wedge m \vec{v}$$

$$L = r m \cdot v \sin \theta = r m v_c = r m \omega r = m r^2 \omega$$

$$\frac{\Delta A}{\Delta t} = \frac{L}{2 m}$$

Se consideriamo l'angolo infinitesimo  $\Delta\theta$ , l'area spazzata dal raggio Sole-pianeta può essere approssimata all'area di un triangolo di base  $r \Delta\theta$ . Di conseguenza, la velocità areale risulta proporzionale al quadrato del raggio e alla velocità angolare.

Sapendo che il momento angolare  $L$  del pianeta è dato dal prodotto vettoriale fra il raggio e la quantità di moto del pianeta, si ottiene che  $L$  è proporzionale proprio al quadrato del raggio e alla velocità angolare.

Quindi, di fatto la velocità areale è proporzionale al rapporto fra il momento angolare del pianeta e la sua massa. Poiché in un sistema isolato, in cui la risultante delle forze esterne è nulla e la risultante delle forze interne non dissipative è anch'essa nulla, il momento angolare si conserva e quindi la velocità areolare è costante.

Questa dimostrazione spiega la seconda Legge di Keplero, ma non fu data da Keplero stesso e non dimentichiamo che Newton non era ancora arrivato (nasce nel 1642, quando muore Galileo).

3. Il quadrato del periodo di qualunque pianeta è proporzionale al cubo della sua distanza media dal Sole.

$$\frac{R^3}{T^2} = \text{cost}$$

$$F_g = F_c \Rightarrow G \frac{Mm}{r^2} = m \omega^2 r \Rightarrow \omega^2 r^3 = GM$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \Rightarrow \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 r^3 = GM$$

$$\frac{r^3}{T^2} = \frac{GM}{4\pi^2} = k$$

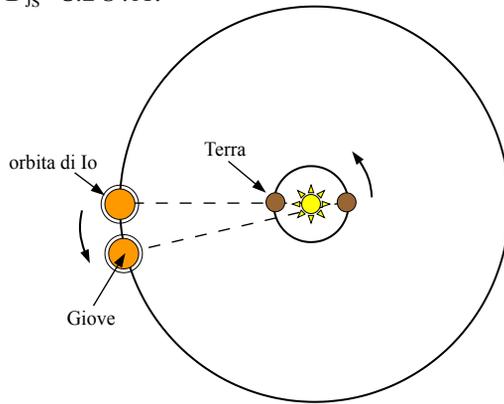
La terza legge di Keplero è facilmente dimostrabile considerando che un pianeta in orbita è caratterizzato dall'equilibrio fra due forze: la forza centripeta ( $F_c$ ) e la forza di gravità ( $F_g$ ). Indicando con  $M$  la massa del Sole, con  $m$  la massa di un pianeta, con  $\omega$  la velocità angolare del pianeta e con  $r$  la distanza Sole-pianeta, nell'ipotesi di orbita circolare, il rapporto fra il cubo della distanza e il quadrato del periodo orbitale ( $T$ ) è una costante che però dipende dalla massa centrale ( $M$ ).

## I satelliti di Giove e la misura della velocità della luce

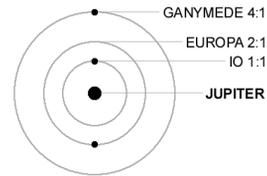
$$D_{Io} = 421700 \text{ km}$$

$$T_{Io} = 42^h 27^m 34^s$$

$$D_{JS} = 5.2 \text{ U. A.}$$



Olaf Rømer (1676)

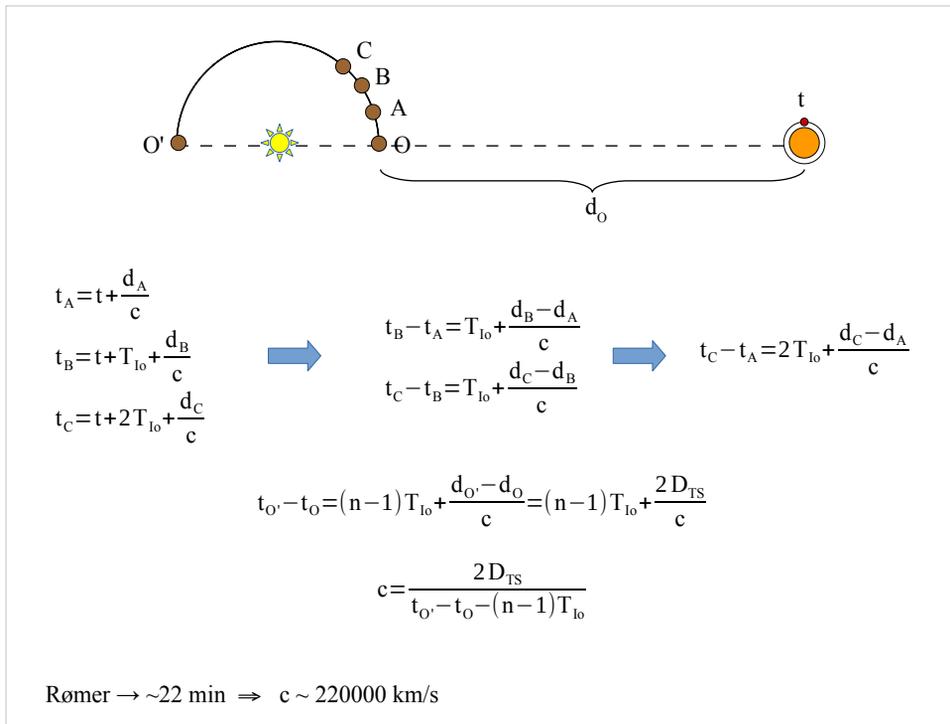


Olaf Rømer, astronomo danese (1644-1710). Dal 1672 lavorava presso l'Osservatorio di Parigi il cui direttore Giovanni Cassini studiando qualche anno prima i satelliti di Giove scoperti da Galileo ed in particolare il satellite Io, si era già accorto che il periodo di rivoluzione di questa luna attorno al pianeta non era costante nel corso dell'anno. Con ulteriori osservazioni Rømer notò che questo periodo si accorciava quando la Terra si avvicinava a Giove e si allungava 6 mesi dopo, quando era in allontanamento, e diede la seguente interpretazione: la luce si propaga con velocità finita, per cui, nella fase in cui la Terra è più vicina a Giove intercetta la luce in arrivo da una distanza minore e tutto appare come se l'orbita di Io sia stata effettuata in meno tempo. Il viceversa accade con la Terra in allontanamento.

Nella slide sono indicati: la distanza media di Io da Giove (simile a quella della Luna), il periodo di rivoluzione di Io attorno a Giove, la distanza media Giove-Sole.

In figura: in un istante iniziale Sole-Terra-Giove sono allineati, si dice che Giove è in opposizione (al Sole rispetto alla Terra). Dopo 6 mesi l'allineamento è Terra-Sole-Giove e Giove è in congiunzione.

La Terra si sposta di circa  $1^\circ$ /giorno, mentre Giove si sposta di circa  $0.08^\circ$ /giorno  $\sim 5'$ /giorno. Quindi dopo 6 mesi, la Terra ha coperto  $180^\circ$ , mentre Giove solo circa  $15^\circ$ .



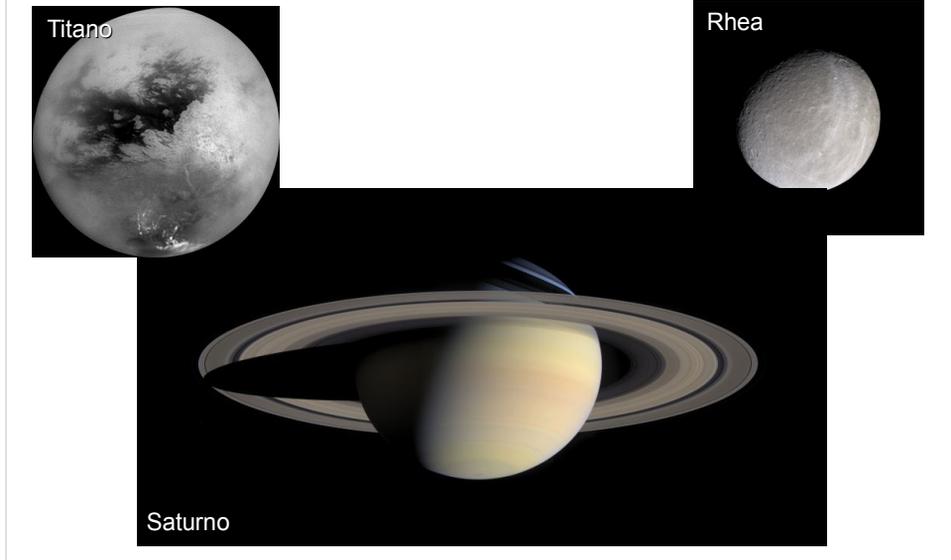
Rømer fece un ragionamento simile al seguente.

Supponiamo che la Terra si trovi nella posizione A, all'istante t Io esce dall'ombra di Giove, ma la sua luce arriva sulla Terra in un istante successivo  $t_A$  che dipende dalla distanza Terra-Giove =  $d_A$  e dalla velocità della luce  $c$ . Dopo una successiva rivoluzione di Io attorno a Giove ( $T_{Io}$ , che dura circa 1.77 giorni), la Terra si è spostata in B e quindi l'istante di uscita di Io dall'ombra (misurato a Terra), cioè  $t_B$ , è diverso dal precedente. Dopo un'altra rivoluzione di Io la Terra si trova in C. Calcoliamo adesso le differenze di tempo fra i due rispettivi intervalli e poi sommiamole. Vediamo che la differenza fra gli istanti C e A è pari a 2 volte il periodo di Io più un termine che dipende dalla differenza fra le due diverse distanze della Terra rispetto a Giove.

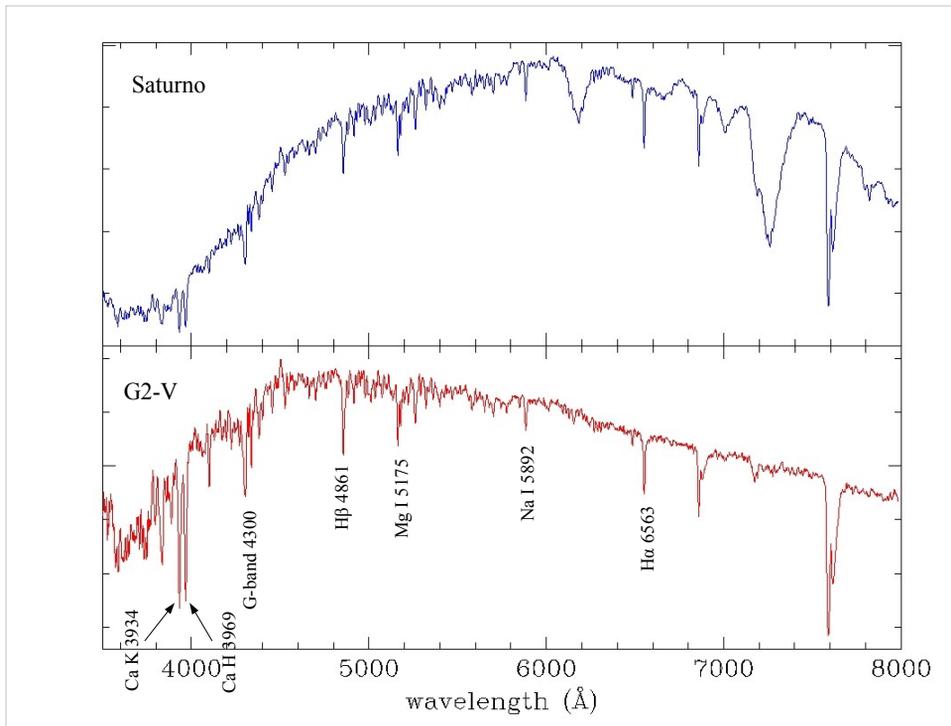
Immaginando di fare  $n$  misurazioni ripetute del periodo di Io dal momento in cui la Terra si trova in O al momento in cui si trova in O', ossia 6 mesi dopo, si ottiene una formula per la velocità della luce  $c$ , che contiene il diametro dell'orbita della Terra attorno al Sole. Il denominatore è proprio la differenza di periodo misurata rispettivamente in O' e in O.

La stima di Rømer fu di circa 22 minuti, che si traduceva in  $c \sim 220000$  km/s. Noi sappiamo oggi che la velocità della luce è quasi 300000 km/s e che quindi la luce percorre il diametro dell'orbita terrestre in circa 16.7 minuti. L'errore che Rømer commise fu causato da non avere un orologio preciso e un telescopio abbastanza potente per osservare il transito di Io con precisione, e di non conoscere il periodo orbitale vero di Io e la distanza Terra-Sole con precisione.

# Spettroscopia dei pianeti

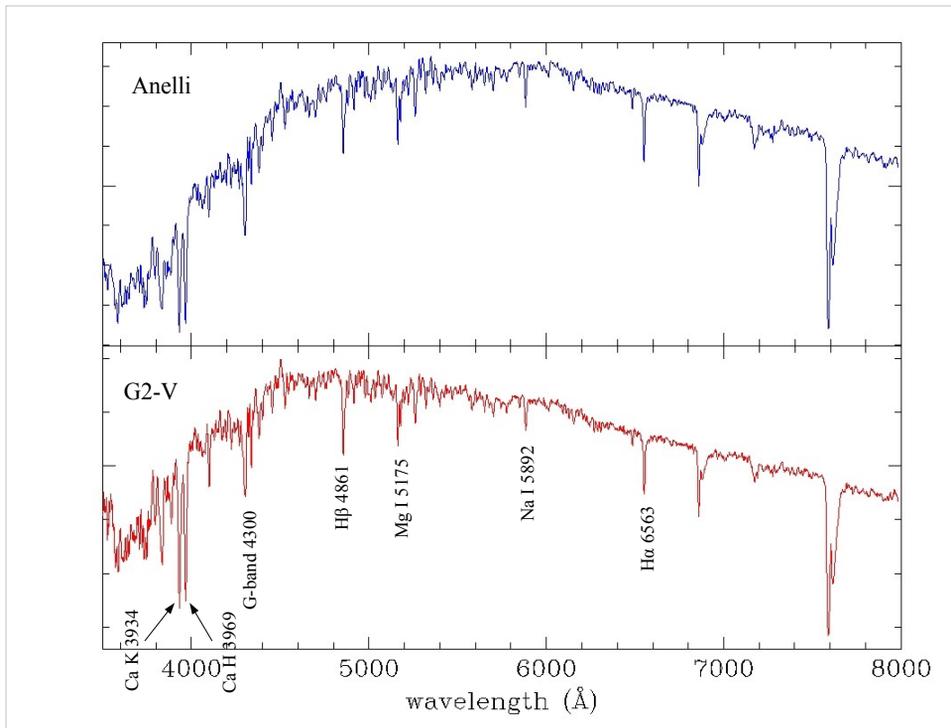


In questa sezione vedremo le caratteristiche spettroscopiche di Saturno e di due sue lune, Rhea e Titano.

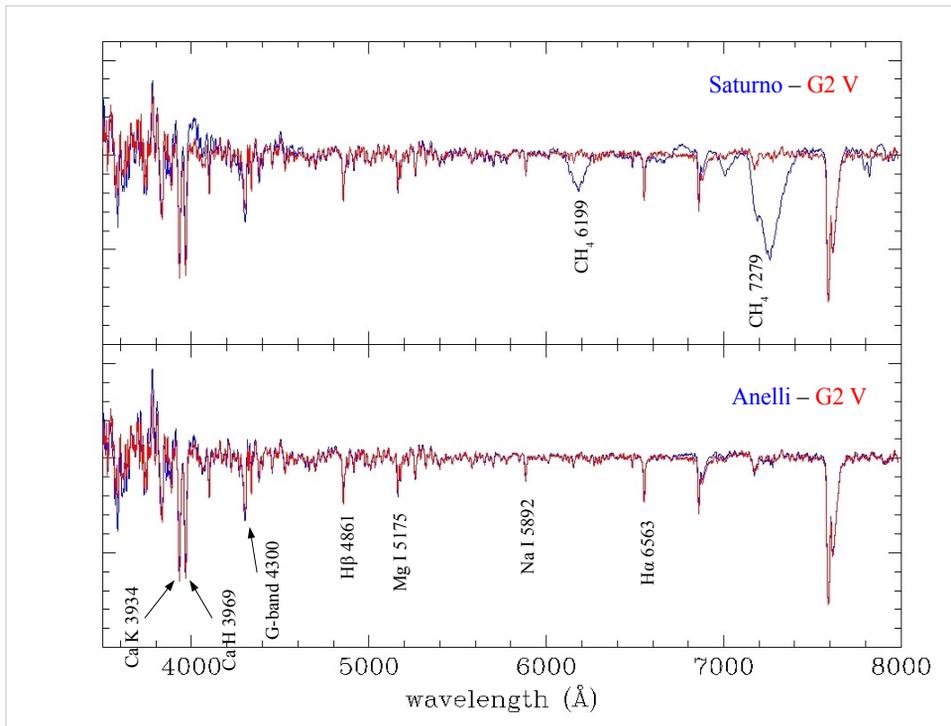


In alto è rappresentato lo spettro nel visibile di Saturno. In basso invece lo spettro di una stella di tipo spettrale G2-V, quindi simile al Sole.

Sono poi indicate le principali righe in assorbimento presenti nello spettro della stella.

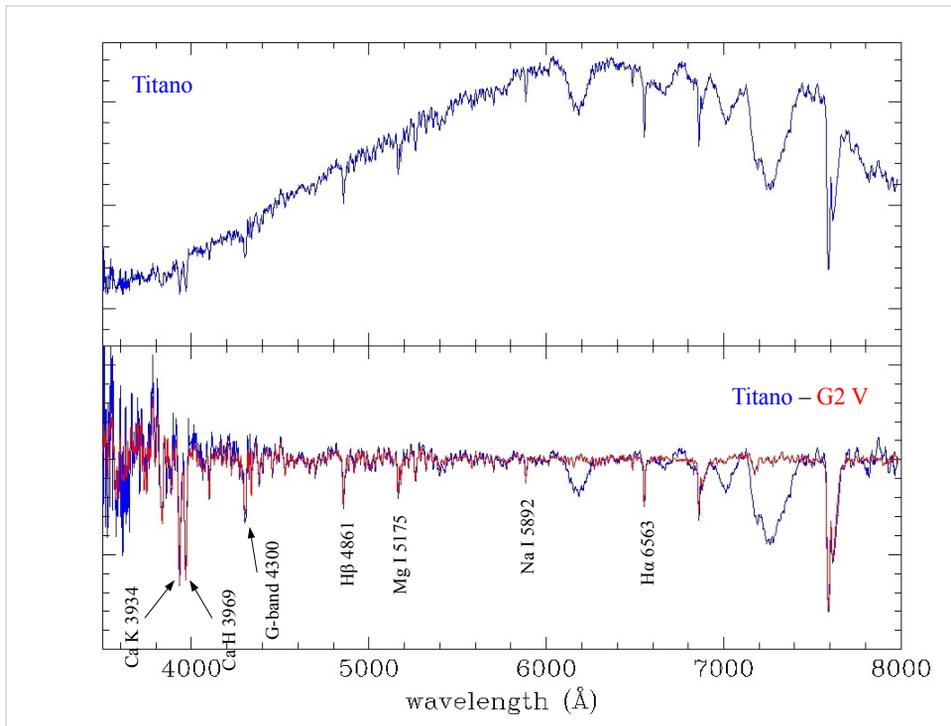


In questo caso, in alto è riportato lo spettro degli anelli di Saturno.



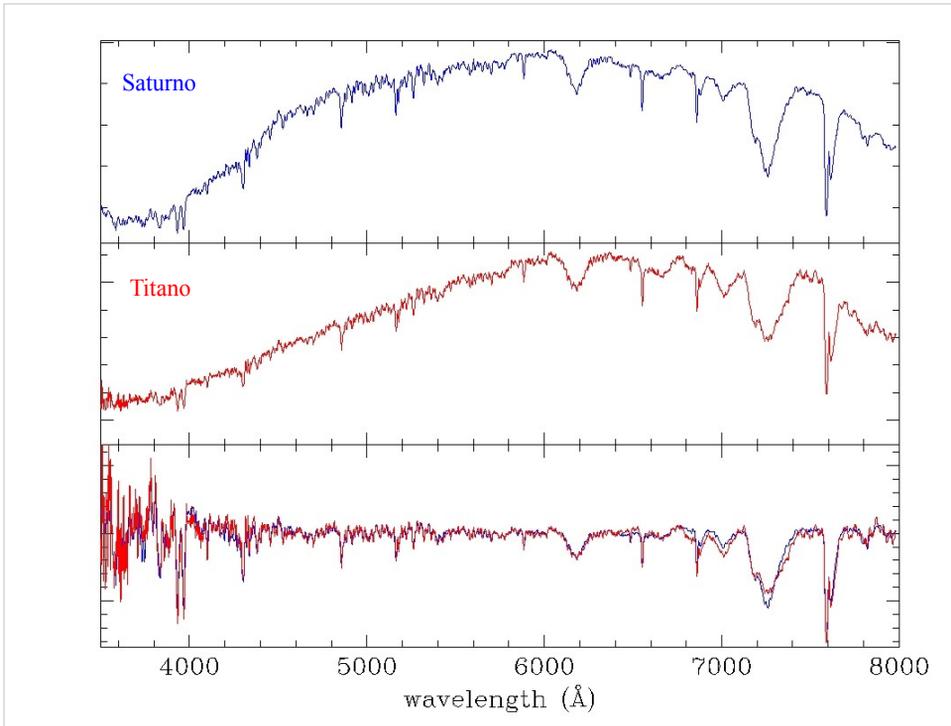
Per un migliore confronto, la forma dello spettro di Saturno, dei suoi anelli e della stella è stata rimossa. E' chiaramente osservabile una perfetta coincidenza fra lo spettro degli anelli e della stella, mentre ci sono differenze significative fra Saturno e la stella oltre i 6000 Å, dove compaiono larghe strutture in assorbimento provocate dalla presenza di metano e ammoniaca.

Se ne deduce quindi che il pianeta è caratterizzato da presenza di un'atmosfera, mentre gli anelli riflettono la luce del Sole (almeno nella regione di spettro elettromagnetico considerata).

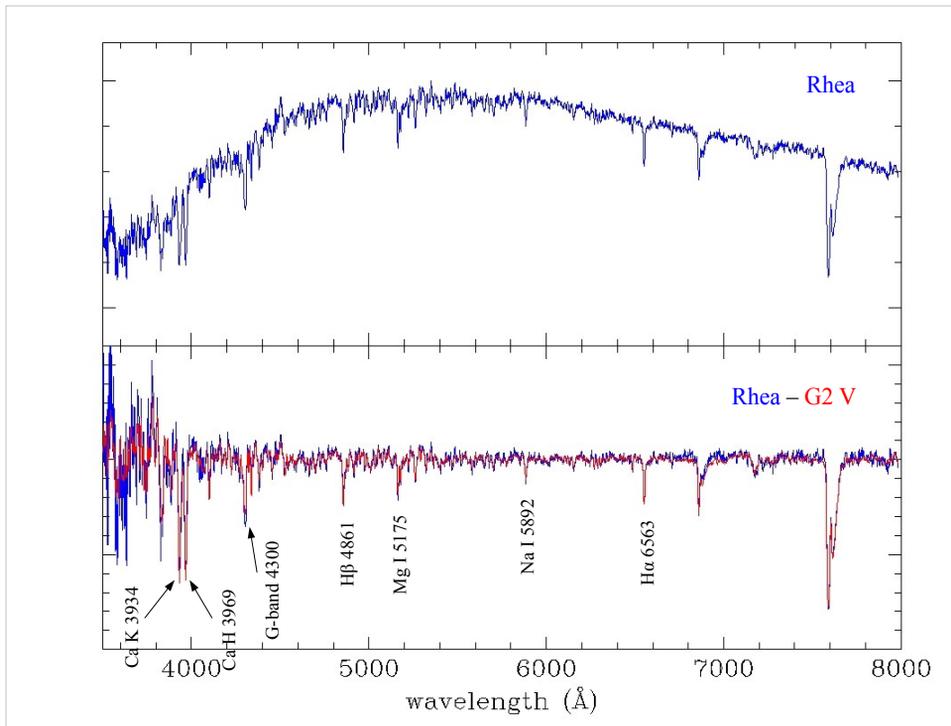


Lo spettro in alto è quello del satellite più grande di Saturno, cioè Titano.

Anche in questo caso si notano le bande molecolari in assorbimento, ad indicare che Titano ha un'atmosfera.



Confronto fra lo spettro di Saturno e di Titano. C'è una quasi perfetta sovrapposizione.

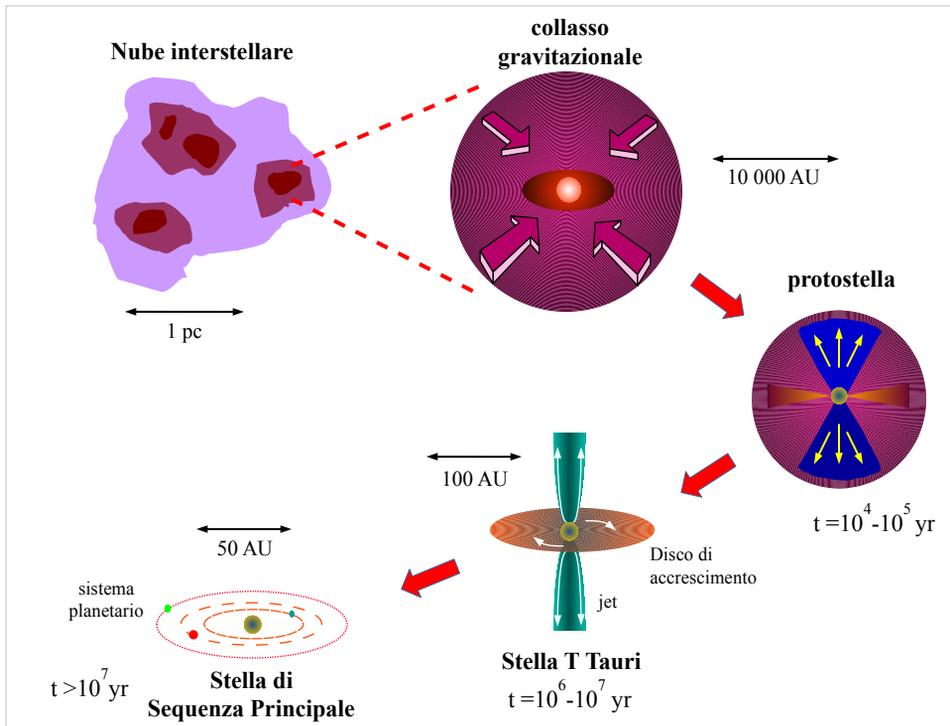


Lo spettro in alto è quello del satellite Rhea. Il confronto con la stella di tipo solare indica chiaramente che la luce proveniente dal satellite è essenzialmente luce del Sole riflessa.

# Formazione del Sistema Solare



Si ritiene oggi che le stelle si formino dalla contrazione gravitazionale di grandi nubi di gas di temperatura sufficientemente bassa da permettere la prevalenza della forza gravitazionale su quella della pressione interna del gas. Il processo, una volta avviato procede a velocità crescente, supersonica, con il gas in caduta libera verso il centro. La situazione di equilibrio viene raggiunta quando la densità del gas e la sua temperatura sono sufficienti per opporsi alla forza gravitazionale. Comunque il gas continua a perdere energia per irraggiamento e la contrazione prosegue, ma in tempi scala molto maggiori. Si forma così un corpo centrale sferico di alta temperatura, mentre nella parte esterna la contrazione porta ad un'elevata velocità di rotazione (per via della conservazione del momento della quantità di moto) e quindi all'appiattimento del sistema in un disco. Dalla dispersione attuale dei pianeti rispetto al piano dell'eclittica si stima che lo spessore del disco pre-planetario fosse dell'ordine di un 1/10 di U.A. Non c'è ancora accordo circa la temperatura di questo disco, mentre si stima che la massa del disco fosse circa 0.01 – 0.1 masse solari.



La temperatura del disco nella sua parte più interna è più alta che nella parte esterna. Sulla base dell'equilibrio termico tra energia ricevuta dal Sole e persa per irraggiamento, si stima che il gas alla distanza della Terra dal Sole 4.6 miliardi di anni fa avrebbe dovuto avere una temperatura compresa tra circa 300 K fino a 600 K. La temperatura nella parte esterna del disco, in prossimità dell'orbita di Plutone, avrebbe invece raggiunto pochi gradi al di sopra dello zero assoluto.

Si può facilmente dimostrare che solo i composti più refrattari come ossidi di ferro possono condensare alla distanza di Mercurio, mentre nell'orbita terrestre possono condensare anche ferro e nickel metallici oltre ai silicati, feldspati e alla triolite. E' importante notare che i ghiacci d'acqua non possono condensare nell'orbita terrestre. Questo processo può avvenire solo molto più lontano dal Sole, in prossimità dell'orbita di Giove, dall'evaporazione dei ghiacci dai nuclei di comete durante il loro avvicinamento al Sole. Il limite di condensazione dell'acqua è probabilmente attorno a 2.5 U.A. . Una prova che il modello di condensazione è corretto in prima approssimazione è la densità decrescente dei pianeti del sistema solare mano a mano che ci si allontana dal Sole. Gli ossidi di ferro e il ferro metallico infatti hanno un peso specifico superiore ai silicati, e questi a loro volta superiore a quello dei ghiacci d'acqua o di metano.

# Formazione dei protopianeti

condensazione del gas in particelle solide (grani)



aggregazione di grani di particelle solide fino alla formazione di planetesimi di dimensioni attorno al chilometro



agglomerazione dei planetesimi in protopianeti



acquisizione di gas dal mezzo interplanetario e/o produzione di gas da impatti successivi



formazione dell'atmosfera

Uno dei punti più critici nella formazione del sistema solare è l'aggregazione dei grani fino a raggiungere le dimensioni dei planetesimi attraverso una serie di urti. Sebbene la densità delle particelle solide sia abbastanza alta in questa fase occorre un meccanismo fisico tale da favorire l'aggregazione piuttosto della distruzione a seguito degli urti. Le simulazioni al computer mostrano che un disco rotante di planetesimi tende a rompersi in una serie di anelli e questi in una serie di nubi. Anche la crescita dei planetesimi fino alla formazione di protopianeti richiede condizioni di collisioni particolari. La velocità di impatto deve essere bassa, non molto superiore alla velocità di fuga del crescente planetesimo, inoltre i materiali devono avere delle proprietà coesive.

Quando un protopianeta è cresciuto abbastanza, per aggregazione di planetesimi, può anche catturare del gas direttamente dal mezzo interplanetario e crearsi un'atmosfera. Anche gli impatti successivi possono, per erosione del suolo, produrre del gas e contribuire alla creazione di un'atmosfera. Pianeti di dimensione superiore ad un centinaio di chilometri raccolgono sufficiente materiale da produrre un considerevole riscaldamento delle rocce per decadimento degli isotopi radioattivi. Il riscaldamento può fondere le rocce del pianeta e mantenere lo stato di fusione per un periodo sufficiente da permettere la differenziazione del materiale interno, cioè la separazione tra materiali pesanti (ferro e nickel) verso l'interno e materiali leggeri, come i silicati, verso l'esterno.

## Eliminazione della nube residua

Stella in fase T Tauri ( $10^6$ - $10^7$  anni)



Vento stellare con  $v = 400 - 500$  km/s



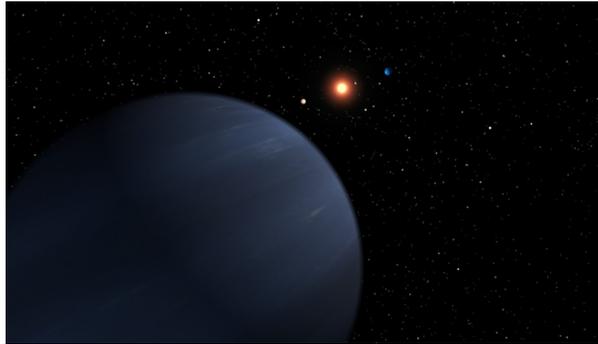
Il gas e le particelle con diametro inferiore a una decina di centimetri vengono eliminate dal sistema protoplanetario

Subito dopo la formazione dei pianeti la nebulosa solare conteneva ancora una notevole quantità di polveri e gas. Questo materiale deve essere stato espulso, non solo perché oggi non lo si osserva, ma anche perché la sua presenza a lungo andare avrebbe portato alla distruzione dei pianeti stessi facendoli spiraleggiare verso il Sole ad opera di un meccanismo di frenamento. E' possibile che questo sia successo in un primo tempo e che un numero non facilmente stimabile di pianeti sia precipitato nel Sole.

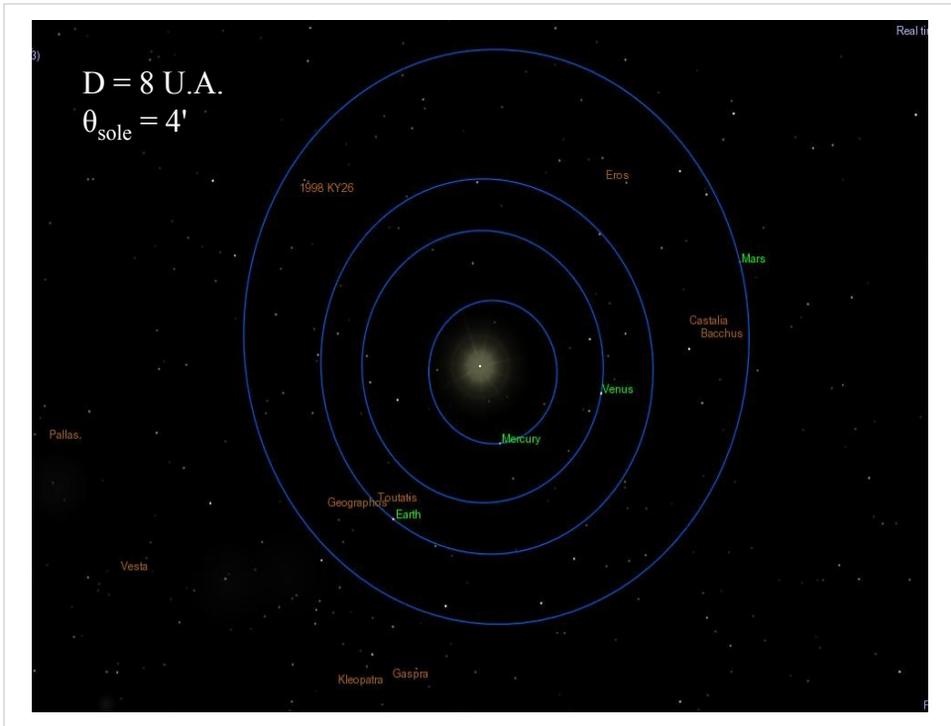
Certamente la nube è stata ripulita in un'epoca molto lontana. Uno dei meccanismi proposti è il vento solare durante la fase detta di T Tauri. Le stelle in fase di T Tauri sono stelle giovani, con un'età di circa  $10^6 - 10^7$  anni, di massa simile a quella solare, che presentano un intenso vento stellare, con velocità dell'ordine di  $400 - 500$  km/sec e intensità circa  $10^8$  volte quella solare. Questo vento è in grado di eliminare rapidamente tutto il gas da un sistema protoplanetario ed anche le particelle con diametro inferiore ad una decina di centimetri. Per corpi di dimensione superiore prevale invece l'attrazione del campo gravitazionale solare.

E' difficile dare una stima precisa di quando questa fase può essere terminata, ma è certo che i pianeti e satelliti del sistema solare interno mostrano tracce di intenso bombardamento meteorico nei primi 500 milioni di anni circa. Poi il fenomeno è sceso rapidamente.

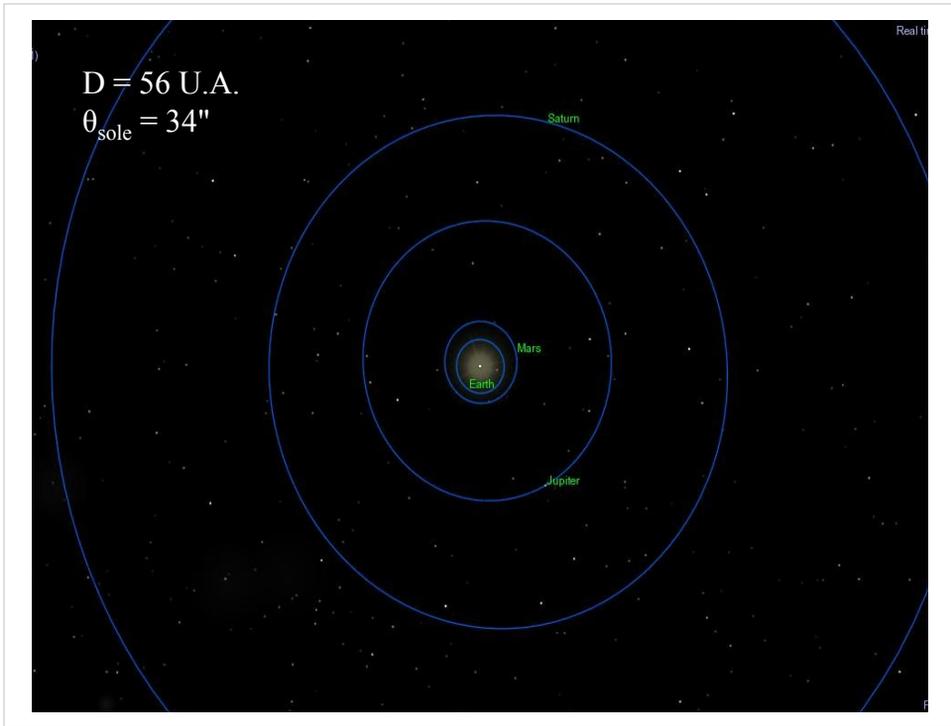
# La ricerca di pianeti extrasolari



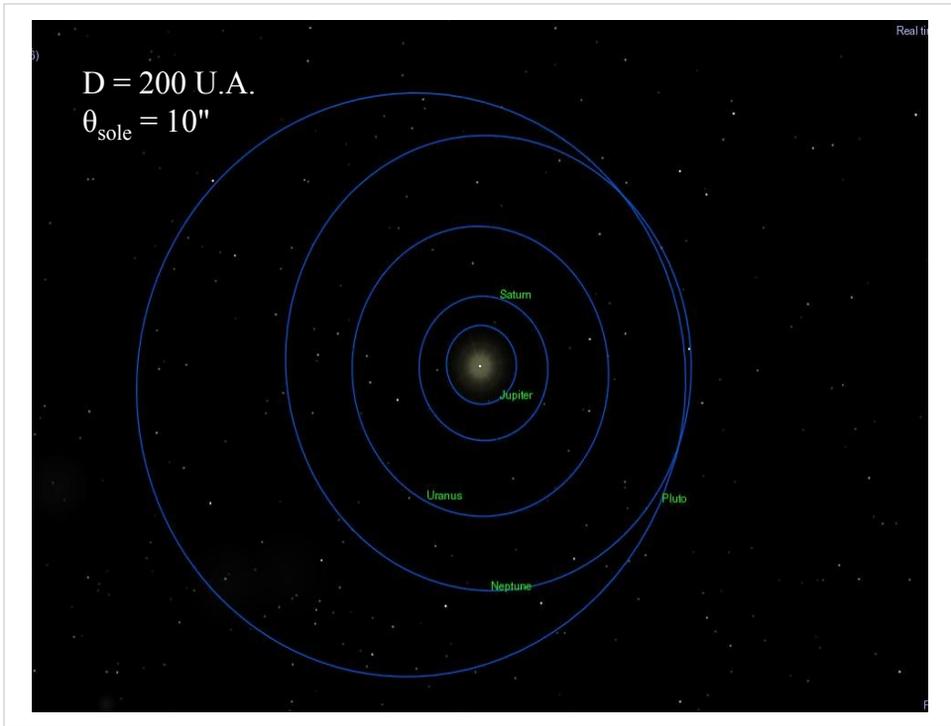
Uno dei settori dell'astronomia moderna più rilevanti nel prossimo futuro è sicuramente la ricerca di pianeti e/o sistemi planetari attorno a stelle diverse dal Sole. Sono i cosiddetti pianeti extrasolari o exoplanets.



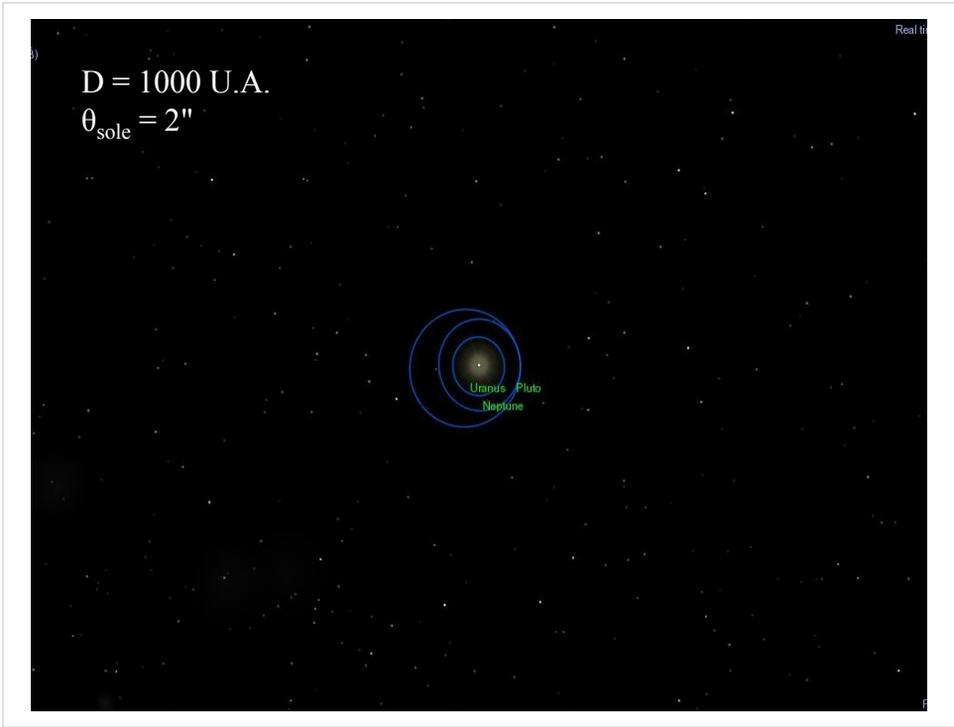
Questi schemi servono a comprendere il problema fondamentale nella ricerca di pianeti extrasolari. A una distanza 8 volte superiore a quella della Terra dal Sole, i pianeti del Sistema Solare sono ancora ben visibili.



A una distanza di 56 U.A., oltre l'orbita di Plutone, i pianeti interni cominciano a non essere più visibili. Il Sole ha una dimensione angolare di 34 secondi d'arco.



Allontanandosi ancora anche i pianeti esterni diventano via via meno visibili.



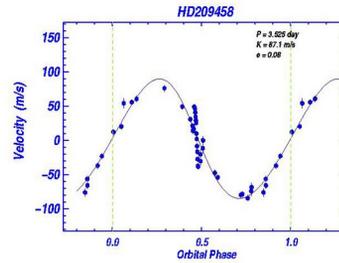
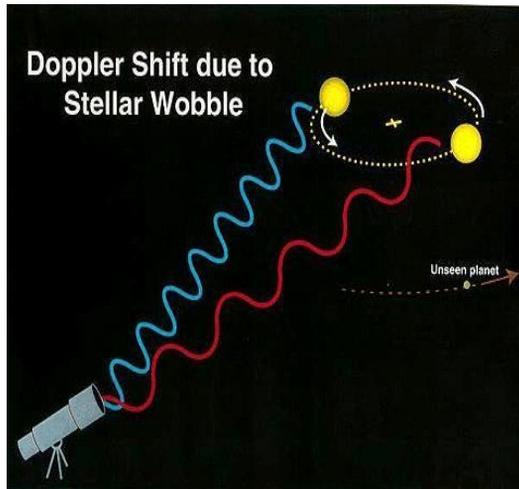




Alla distanza di 1/10 di anno-luce, il Sistema Solare sarebbe completamente immerso nella luce del Sole e quindi risulterebbe invisibile.

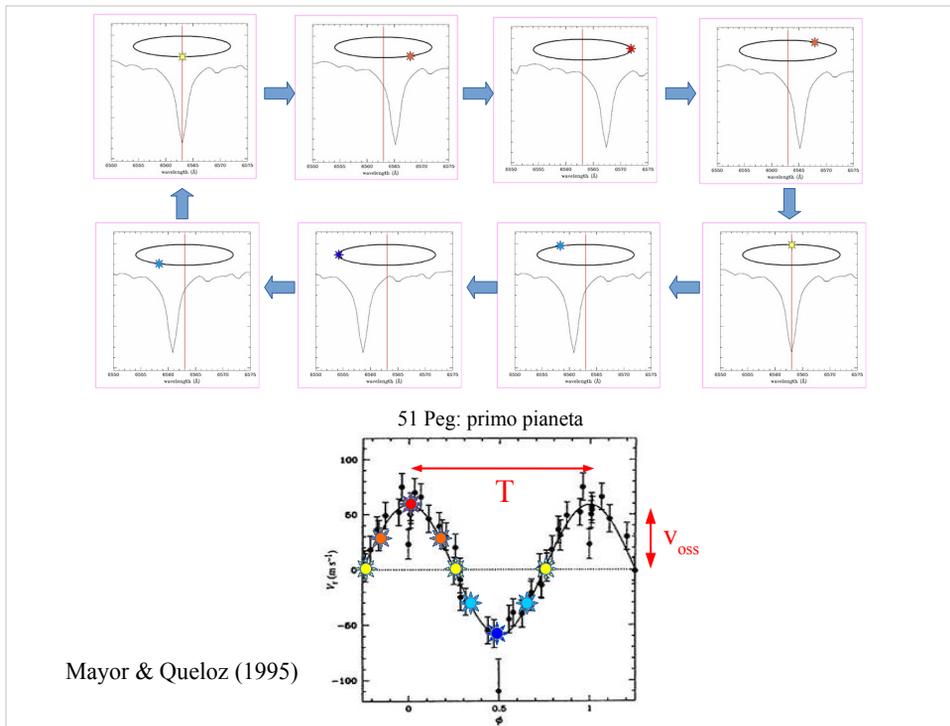
Se consideriamo che la stella più vicino al Sole si trova a circa 4 anni-luce, è facile capire che in nessun caso possiamo osservare sistemi planetari attorno ad altre stelle. Sono necessarie delle tecniche particolari per rilevare la presenza di pianeti.

# Tecnica spettroscopica: le velocità radiali



La tecnica delle velocità radiali prevede l'utilizzo della spettroscopia e si basa sulla misura dello spostamento delle righe spettrali della stella. Infatti, la presenza di un pianeta massiccio o di un sistema planetario causa uno spostamento del baricentro del sistema, che diversamente si dovrebbe trovare nel centro della stella. La stella quindi non solo ruota attorno al suo asse, ma anche attorno al baricentro del sistema planetario.

Grazie all'effetto Doppler, questo movimento continuo di avvicinamento e di allontanamento dall'osservatore si riflette in oscillazioni delle righe spettrali. La misura di queste oscillazioni si può convertire in velocità.



Qui vediamo un esempio di come funziona questa tecnica.

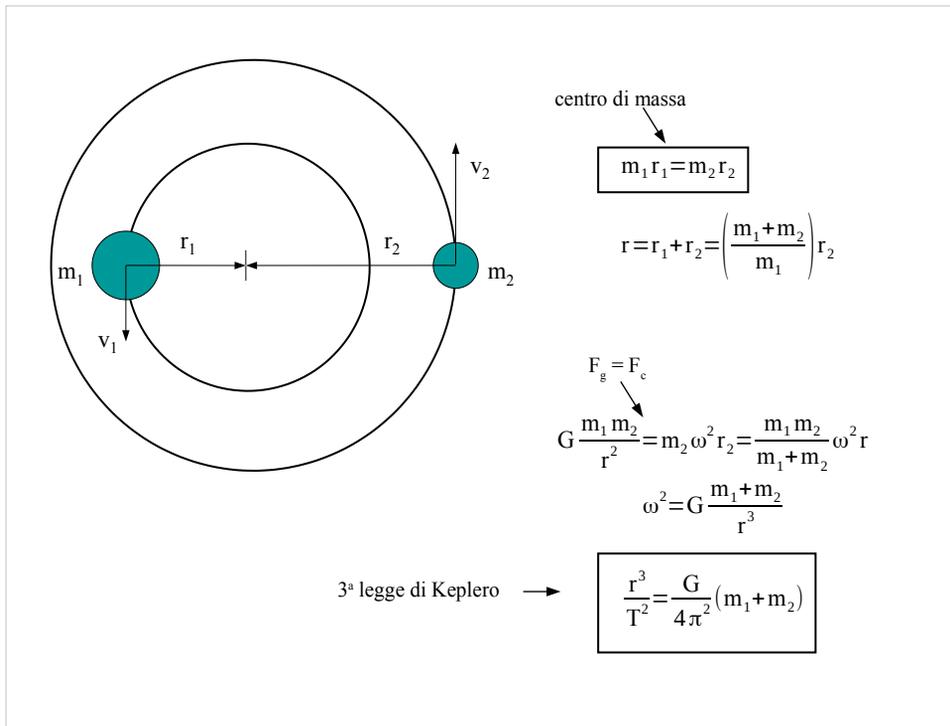
In teoria le righe spettrali delle stelle dovrebbero rimanere sempre alla stessa lunghezza d'onda, ma se la stella è in un sistema binario o al centro di un sistema planetario, le righe cambiano in posizione con il passare del tempo.

Partendo dal grafico in alto a sinistra, la riga è alla lunghezza d'onda di riposo (indicata dalla linea rossa) corrispondente a  $v = 0$  km/s. Poi si sposta progressivamente a  $\lambda$  maggiori, ossia a velocità positive crescenti, raggiunge il massimo spostamento e poi torna indietro alla posizione di riposo. Prosegue a  $\lambda$  minori, cioè velocità negative, raggiunge di nuovo uno spostamento massimo e torna indietro.

Riportando in un grafico le velocità misurate in funzione del tempo si ottiene una forma sinusoidale che ha un periodo  $T$ . La velocità massima misurata sarà la velocità circolare osservata  $v_{\text{oss}}$ .

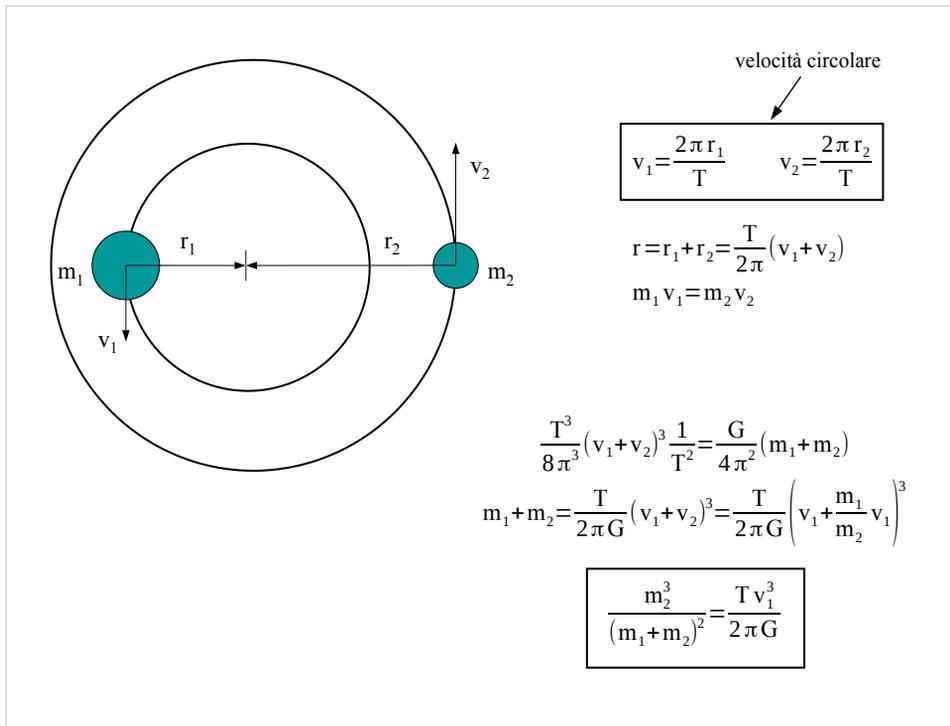
Il grafico in basso si riferisce al primo pianeta identificato nel 1995 da Mayor e Queloz attorno alla stella 51 Pegasi. Sul grafico sono riportate le corrispondenti posizioni della riga spettrale.

Attenzione: le velocità radiali misurate sono dell'ordine dei m/s, mentre l'esempio in alto (per chiarezza) mostra spostamenti dell'ordine dei km/s.



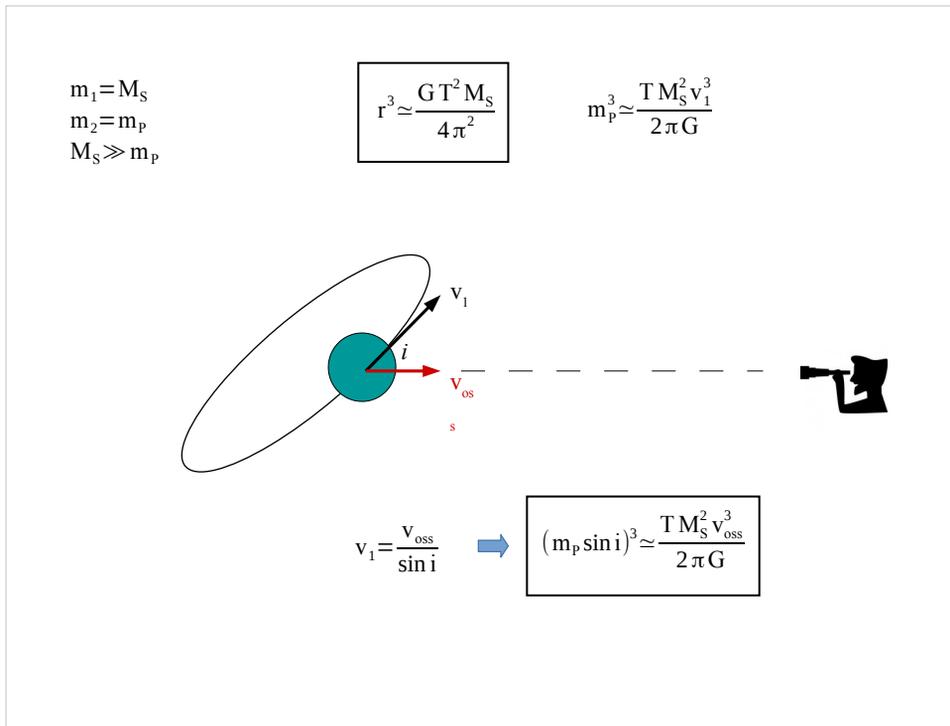
Vediamo ora come si usano  $v_{\text{oss}}$  e  $T$ .

Consideriamo due masse  $m_1$  e  $m_2$ , con  $m_1 > m_2$ , che orbitano attorno al baricentro comune, rispettivamente a distanza  $r_1$  e  $r_2$  dal baricentro. Partiamo dalla definizione di centro di massa, consideriamo la distanza  $r$  totale fra le due masse e uguagliamo la forza di gravità che  $m_1$  esercita su  $m_2$  alla forza centripeta che sente  $m_2$ . Il risultato è la terza legge di Keplero.



In caso di orbite circolari, esprimiamo le velocità circolari per entrambe le masse. La distanza  $r$  fra le due masse può essere scritta in funzione della somma delle velocità. Inoltre dalla definizione di centro di massa, segue la conservazione della quantità di moto.

Inserendo queste espressioni nella terza legge di Keplero trovata prima e esprimendo la velocità della seconda massa in funzione di quella della prima, otteniamo una formula per ricavare la massa  $m_2$ .



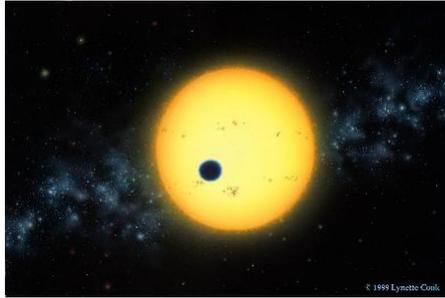
Applichiamo queste formule al caso di un sistema formato da una stella (S) e un pianeta (P). Osservativamente non vediamo P, ma solo la sua presenza come effetti sulla velocità radiale di S.

La stella avrà presumibilmente una massa molto maggiore di quella del pianeta. Giove ad esempio ha una massa che è circa 1/1000 di quella del Sole. Quindi possiamo approssimare la somma delle due masse alla massa della sola stella.

Potremo stimare la massa della stella confrontando il suo spettro con modelli teorici in grado di fornirci la sua classificazione spettrale e quindi i suoi parametri fisici (temperatura, raggio, luminosità, massa, ecc.)

Infine, non abbiamo idea di come sia orientato il piano dell'orbita del pianeta rispetto a noi. Siccome l'effetto Doppler funziona lungo la linea di vista, ciò che misuriamo quasi sicuramente non è la velocità circolare  $v_1$ , ma la sua componente lungo la linea di vista. Dovremo quindi tenere conto di un angolo  $i$  di inclinazione, che non conosciamo. La formula finale ci permette di stimare la massa del pianeta a meno di un  $\sin i$ , mentre la terza legge di Keplero ci permetterà di calcolarne la distanza dalla stella.

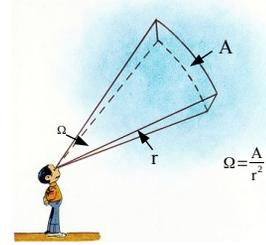
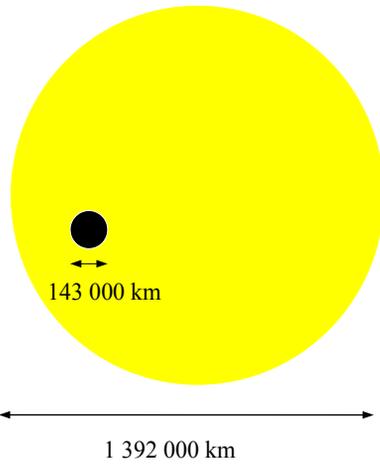
## Tecnica fotometrica: i transiti



Altra tecnica usata per rivelare pianeti extrasolari è il cosiddetto metodo dei transiti. In sostanza si tratta di monitorare una stella misurandone la magnitudine in funzione del tempo. Il passaggio di un pianeta davanti alla stella produce un effetto di eclissi che fa variare il flusso di energia emesso dalla stella. Ovviamente questo metodo non può funzionare in stelle variabili o con instabilità atmosferiche.

## Esempio Sole-Giove

$$D_{\text{oss}} \gg D_{\text{SG}}$$



$$\Omega_{\text{sole}} = \frac{\pi R_{\text{sole}}^2}{D_{\text{oss}}^2}$$

$$\Omega_{\text{giove}} = \frac{\pi R_{\text{giove}}^2}{D_{\text{oss}}^2}$$

$$\frac{\Omega_{\text{giove}}}{\Omega_{\text{sole}}} = \frac{R_{\text{giove}}^2}{R_{\text{sole}}^2} \approx 0.01$$

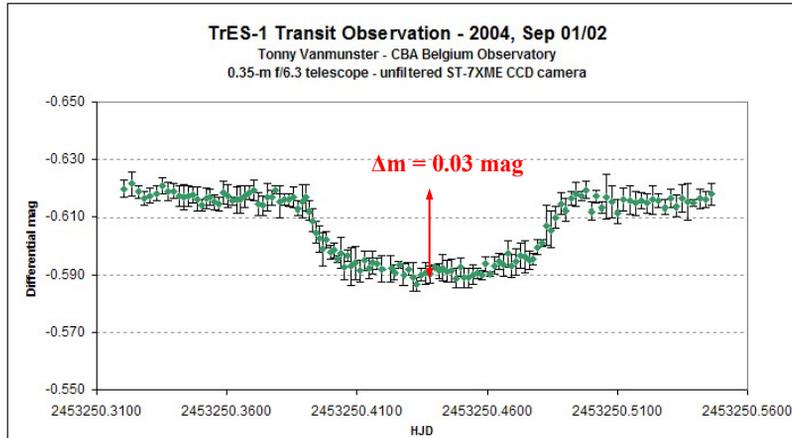
$$m'_{\text{sole}} - m_{\text{sole}} = -2.5 \log \left( \frac{f'_{\text{sole}}}{f_{\text{sole}}} \right)$$

$$f'_{\text{sole}} = f_{\text{sole}} - f_{\text{sole}} \frac{\Omega_{\text{giove}}}{\Omega_{\text{sole}}} = f_{\text{sole}} \left( 1 - \frac{\Omega_{\text{giove}}}{\Omega_{\text{sole}}} \right)$$

$$\Delta m_{\text{sole}} = -2.5 \log \left( 1 - \frac{\Omega_{\text{giove}}}{\Omega_{\text{sole}}} \right) = 0.01$$

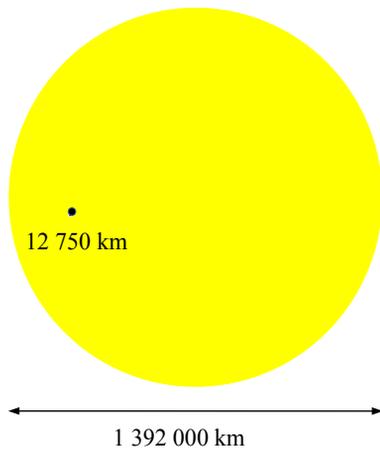
Immaginiamo di osservare il Sole a grande distanza e consideriamo il transito di Giove. Se calcoliamo l'angolo solido sotteso dal disco del Sole e dal disco di Giove e ne facciamo il rapporto, troviamo che il transito di Giove riduce il flusso di energia del Sole di una quantità vicina al 1%. In termini di magnitudini, questo significa che la magnitudine del Sole varia di 0.01 quando Giove si trova davanti al disco solare. Nelle formule,  $m'$  e  $f$  sono la magnitudine e il flusso del Sole durante il transito.

In senso più generale, un pianeta di tipo gioviano produce variazioni dell'ordine dei centesimi di magnitudine della stella durante il transito.



In questo esempio vediamo la curva di luce del pianeta TrES-1, che si trova nella costellazione della Lira e dista dalla Terra circa 500 anni-luce. La sua stella è di tipo K0 ed è di mag 11.8. Il pianeta ha una massa di circa 0.75 masse gioviane e un diametro circa 8% più largo di Giove. Il periodo orbitale del pianeta, che si trova a una distanza di circa 0.04 U.A., è di 3 giorni.

## Esempio Sole-Terra

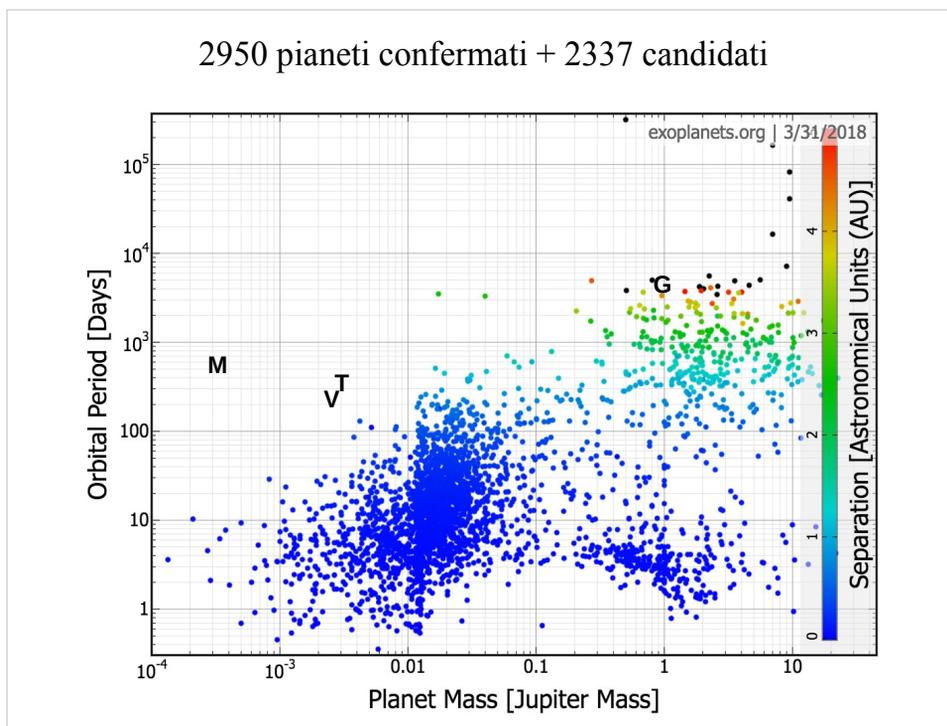


$$\frac{\Omega_{\text{terra}}}{\Omega_{\text{sole}}} = \frac{R_{\text{terra}}^2}{R_{\text{sole}}^2} \approx 0.000084$$

$$\Delta m_{\text{sole}} = -2.5 \log \left( 1 - \frac{\Omega_{\text{terra}}}{\Omega_{\text{sole}}} \right) \approx 0.0001$$

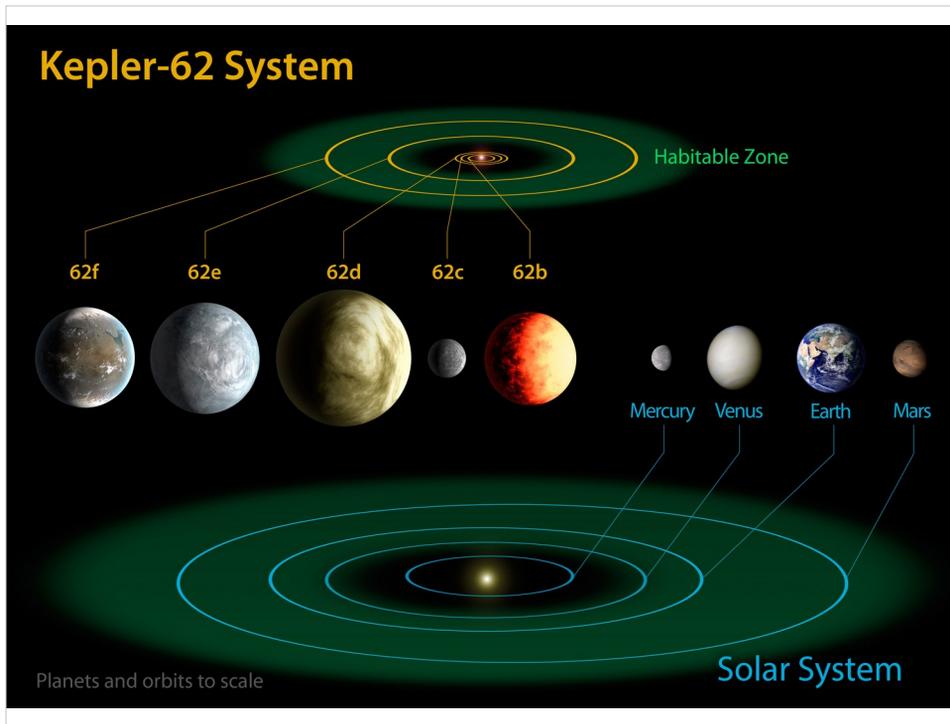
Vediamo ora cosa accadrebbe nel caso di un transito di un pianeta terrestre. Il rapporto fra gli angoli solidi sottesi dalla Terra e dal Sole, convertito in magnitudine come fatto nel caso di Giove, significa una variazione di un decimillesimo di magnitudine. E' chiaro che per poter rivelare un pianeta di taglia terrestre attorno a una stella, è necessaria un'osservazione fotometrica estremamente precisa, che dalla Terra è molto difficile a causa della presenza dell'atmosfera che è sempre in regime di turbolenza. Per questa ragione si è pensato di mandare telescopi nello spazio. Un esempio importantissimo è Kepler.

## 2950 pianeti confermati + 2337 candidati



Questo grafico è tratto dal sito [exoplanets.org](http://exoplanets.org) che raccoglie tutti i dati tecnici degli esopianeti scoperti finora. Ce ne sono 2950 confermati e altri 2337 sono candidati. In asse X sono riportate le masse in unità di massa di Giove, in asse Y il periodo orbitale di ogni pianeta attorno alla sua stella in unità di giorni. Inoltre la scala colorata riporta il valore del raggio dell'orbita dei pianeti.

Come si nota c'è una forte concentrazione di pianeti di piccola massa, breve periodo orbitale e piccolo raggio orbitale (inferiore al U.A.). Le lettere maiuscole servono a indicare dove si troverebbero in questo grafico, Giove, la Terra, Venere e Marte.



Qui vediamo un esempio di sistema planetario scoperto dal satellite Kepler. La rappresentazione grafica dei pianeti 62f,e, ecc. è di pura fantasia. Ma è interessante il confronto con i pianeti interni del sistema solare. All'inizio eravamo in grado di identificare solo pianeti di grande massa molto vicini alla loro stella, adesso grazie a Kepler siamo riusciti a scoprire pianeti di dimensione terrestre. Le orbite sono molto più vicine alla stella, rispetto al caso nostro. Ma la possibilità di vita è legata alla temperatura della stella, più questa è bassa e più la zona di abitabilità è vicina in termini di raggio orbitale.

# Kepler-90 System Planet Sizes

(Artist's Concepts)

