

**Sezione**

**Il Sistema Solare**

**Testo Parte IVa**

<p>Argomenti trattati</p>  <p><b>LA FORMAZIONE DEL SISTEMA SOLARE II</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La formazione del Sistema Solare- Introduzione</li> <li>• La storia delle teorie della formazione del Sistema Solare</li> <li>• I modelli basati sulla "turbolenza"</li> <li>• La teoria "nebulare" di Kant e Laplace</li> <li>• Obiezioni alla teoria di Laplace</li> <li>• Sviluppi moderni della teoria di Laplace</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La teoria mareale</li> <li>• Le teorie di accrescimento</li> <li>• Vincoli teorici ed osservativi alla costruzione di un modello di formazione del Sistema Solare</li> <li>• La datazione delle rocce terrestri, lunari e meteoritiche</li> <li>• Tempi di decadimento radioattivo</li> <li>• Principali tipi di meteoriti</li> <li>• Il Sistema Solare</li> <li>• Le reazioni nucleari nel protosole</li> <li>• La misura del rapporto Deuterio/Idrogeno nei pianeti giganti</li> <li>• Lo sviluppo di un modello plausibile per la formazione del Sistema Solare</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• L'instabilità gravitazionale</li> <li>• La massa coinvolta nella contrazione</li> <li>• Il disco protoplanetario</li> <li>• Il limite di Roche</li> <li>• La formazione dei grani</li> <li>• La sequenza di condensazione</li> <li>• Tabella delle sequenze di condensazione</li> <li>• Il collasso dei grani verso il piano equatoriale</li> <li>• La formazione dei pianeti per accrescimento</li> <li>• L'effetto del vento solare</li> <li>• La relazione di Titius-Bode</li> <li>• La relazione di Titius-Bode, legge o coincidenza ?</li> <li>• Il problema del momento angolare</li> <li>• Conclusioni</li> </ul>
---	--	---





## ***La formazione del Sistema Solare - Introduzione.***

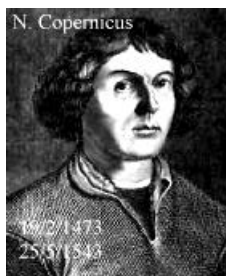
Lo studio del Sistema Solare è stato effettuato con grande precisione sin dai tempi antichi. Il problema della sua origine non è però stato affrontato in modo esauriente prima della rivoluzione copernicana. I primi modelli di formazione del Sistema Solare cercarono innanzitutto di rendere conto, in modo qualitativo, dei principali dati osservativi.

### ***Le orbite dei pianeti***

- le orbite dei pianeti sono prossime al piano orbitale terrestre
- sono praticamente circolari (esclusa l'orbita di Plutone scoperto nel 1929)
- i pianeti ruotano nello stesso senso che è pure quello di rotazione del Sole
- le distanze eliocentriche obbediscono alla legge di Titius-Bode

### ***Il problema del momento angolare***

- Inoltre alla fine del 19<sup>esimo</sup> secolo i fisici teorici dedicarono particolare attenzione al problema del momento angolare. **Il Sole contiene il 99% della massa del Sistema Solare ma possiede solo il 2% del momento angolare posseduto dagli altri pianeti !** Dalla metà del 20<sup>esimo</sup> secolo le nuove teorie riguardanti la formazione stellare insieme alla determinazione delle età dei vari corpi minori, ad esempio i meteoriti, fornirono nuovi elementi di riflessione per le nuove e più moderne teorie cosmogoniche.



## ***La storia delle teorie della formazione del Sistema Solare.***

Tra i greci il primo a proporre una teoria "eliocentrica" fu Aristarco di Samo attorno al 280 B.C. La sua intuizione fu però ben presto dimenticata in favore della teoria "geocentrica" della scuola Aristotelica che rimase in auge fino ai tempi di Copernico (1473-1543).

I contributi fondamentali di Keplero, Galileo e Newton permisero di definire una nuova visione del "mondo" in un sistema completo ed esauriente fondato su fatti fisici e non su presupposti filosofici.

Le principali idee relative alla genesi e formazione del sistema solare si basarono su:

- i modelli di turbolenza
- la teoria nebulare
- la teoria mareale
- le teorie di accrescimento

***31 mar. 1596***

***Cartesio***

***11 feb. 1650***



## ***I modelli basati sulla "turbolenza".***

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

Nella sua opera *Teoria dei vortici*, pubblicata nel 1644, Descartes 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. Infatti il modello è soltanto qualitativo ed una delle maggiori obiezioni che gli si può rivolgere riguarda il fatto che non favorisce la formazione dei pianeti sul piano dell'eclittica. 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<sup>esimo</sup> secolo

**Iperastro- Il Sistema Solare-La formazione del Sistema Solare-Approfondimento-Parte IVa**  
(Von Weizsäcker, ter Haar, Kuiper, Whipple e McCrea).



**La teoria "nebulare" di Laplace e Kant.**

L'idea di una nebulosa primitiva da cui si formarono sia il Sole che i pianeti fu proposta da Kant (1724-1804) e Laplace (1749-1827). Secondo Laplace la nebulosa si contrae per effetto della gravitazione e la sua velocità rotazionale cresce sino a quando non collassa in un disco. In seguito gli anelli di gas, che così si formano, sono rimodellati e vanno a condensarsi in strutture che portano alla formazione dei pianeti e dei loro satelliti.

**Questo modello ha il merito di spiegare tutti i fenomeni, relativi al Sistema Solare, noti nel 18<sup>esimo</sup> secolo ed in particolare quelli riferiti ai moti dei pianeti.**


**Obiezioni alla teoria di Laplace.**

Due importanti obiezioni al modello di Kant e Laplace apparvero all'inizio del XIX<sup>esimo</sup> secolo:

1. come Maxwell (1831-1879) mostrò è piuttosto difficile spiegare la formazione di un pianeta in seguito all'accrescimento da un anello di planetoidi
2. la maggior parte del momento angolare risiede nei pianeti mentre nel modello di Kant e Laplace rimane al Sole

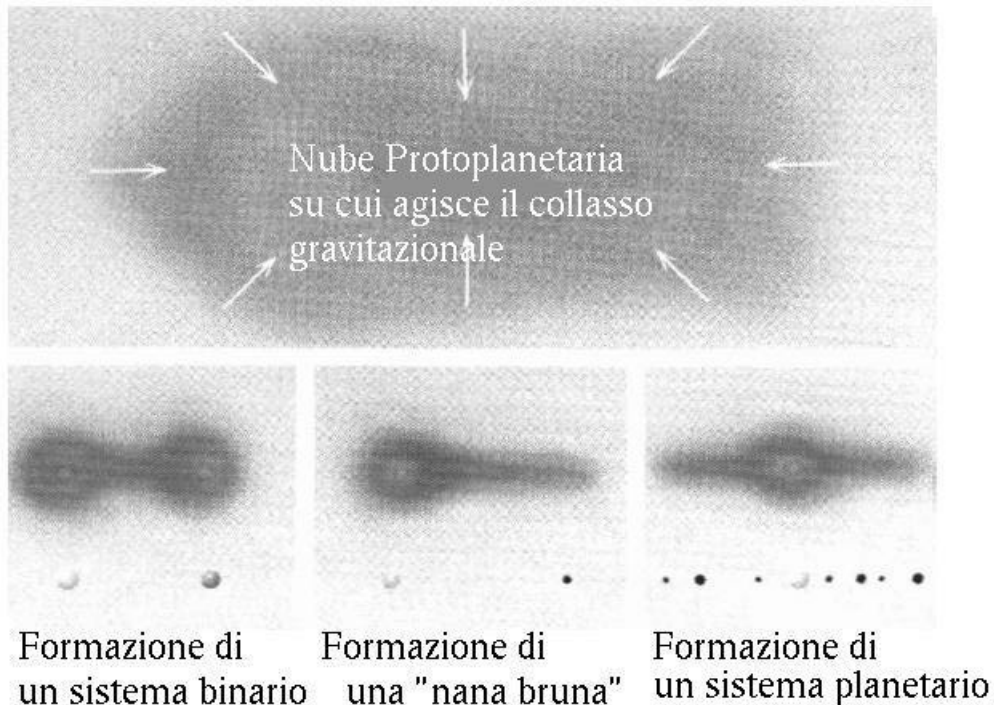
Dal momento che il Sole comprende la maggior parte della massa del Sistema Solare, si sarebbe dovuto "trascinare" dietro anche la maggior parte del momento angolare. Avvenne invece proprio il contrario, in quanto il 99.5 % del momento angolare (sia di rivoluzione che di rotazione dei futuri pianeti) è detenuto dai pianeti che hanno solo 1/750 della massa complessiva !

Un altro problema rimasto irrisolto nell'ambito della teoria di Kant e Laplace riguarda la composizione del materiale della nebulosa primeva.

 **Il primo caso riguarda l'ipotesi che il materiale utilizzato nella formazione del Sistema Solare non era lo stesso che ha formato il Sole.**

 **Nella seconda possibilità il materiale utilizzato nella formazione del Sistema Solare**

era invece stato espulso dal Sole.



### ***Sviluppi moderni della teoria di Laplace.***

L'idea attuale di formazione del Sistema Solare, si è sviluppata dalla teoria di Kant e Laplace ed è riassunta nel modello della "nebulosa molecolare primitiva". I modelli di evoluzione del disco si dividono in due categorie :

#### ***Il modello della nebulosa massiva di Cameron.***

Questo modello presuppone che si parta da un disco di circa *una Massa solare* ( $M_S$ ). Una gran parte della sua massa, circa l'85 %, venne spazzata via dal vento solare in un tempo piuttosto breve di circa 100.000 anni. Cioè che rimase andò a formare il Sole. Secondo questa ipotesi i pianeti si sarebbero formati direttamente dalla nebulosa primordiale in seguito all'innescarsi delle instabilità gravitazionali.

#### ***Il modello della nebulosa a piccola massa di Safronov ed Hayashi.***

Secondo quest'altra ipotesi invece la massa del disco, di circa  $0.01 M_S$ , collassò. Il disco poi andò raffreddandosi, la polvere si accumulò nel piano centrale e formò i planetesimi di massa pari a  $10^{18}$  gr. Dai planetesimi, in seguito alla loro combinazione, si produssero poi i pianeti.

### ***La teoria mareale.***

Secondo l'ipotesi che il materiale utilizzato nella formazione del Sistema Solare **era** invece stato espulso dal Sole l'unica possibilità di "estrarre" materiale dal Sole può avvenire tramite un'azione mareale dovuta ad un incontro ravvicinato con un altro corpo celeste. Dapprima si pensò che le comete fossero in grado di produrre questa forza di marea ma poi si scoprì che erano oggetti molto piccoli e che quindi non avevano alcuna possibilità di produrre sul Sole effetti così devastanti. Rimaneva allora solo la possibilità di un incontro con un'altra stella ma un tale evento appare, date le enormi distanze tra le stelle, talmente improbabile da rendere questo secondo meccanismo poco plausibile.

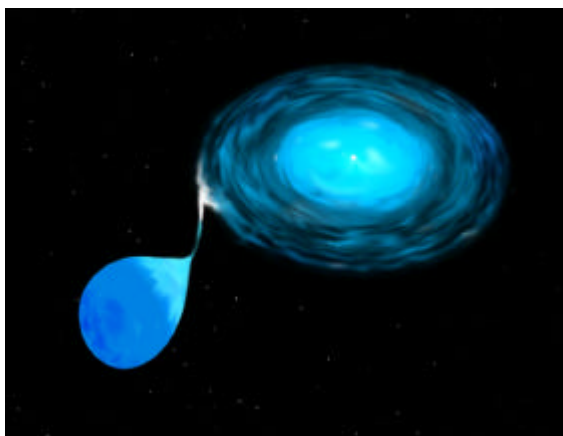
La teoria mareale venne sviluppata, come teoria catastrofica di formazione del Sistema Solare, dal naturalista Buffon(1707-1788). Essa afferma che la sua formazione avvenne a causa di una "estrazione" di materiale dal Sole in seguito ad una collisione, o ad un passaggio ravvicinato, con una cometa avvenuto circa 70000 anni fa. Bisogna ricordare 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 nel 1880 e Chamberlain nel 1901 sostituirono la cometa con una stella rendendo più accettabile, dal punto di vista fisico, l'intensità della forza mareale.

Secondo questo meccanismo, la stella avvicinandosi al Sole 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 con questo meccanismo la formazione dei pianeti giganti esterni anche se vengono risolte due delle maggiori obiezioni relative al modello di Kant e Laplace :

- il problema del momento angolare
- ed la diversa composizione chimica dei pianeti rispetto al Sole.



### ***Le teorie di accrescimento.***

Le teorie di accrescimento si basano invece sulla possibilità che il Sole sia riuscito a

## ***Iperastro- Il Sistema Solare-La formazione del Sistema Solare-Approfondimento-Parte IVa***

"catturare" del materiale interstellare. Per escludere che questo materiale a sua volta collassi nel Sole è necessario presupporre un'azione stabilizzante dovuta ad una stella vicina. Secondo Schmidt la presenza di un'altra stella potrebbe aver permesso la coalescenza del gas e delle polveri in modo da formare i pianeti. Un'altra possibilità invece sostiene che il Sole abbia incontrato, nel suo moto lungo il piano delle Galassia, due distinte nebulose:

- una consistente di polveri da cui sono nati i pianeti interni
- ed una di gas, principalmente idrogeno, che ha prodotto i pianeti esterni.

La maggiore obiezione a queste teorie, è legata al fatto che le collisioni tra le particelle avrebbero portato ad una dispersione delle stesse, salvo il caso in cui fossero confinate lungo strutture ad anello simili a quelle dei pianeti giganti. In questo modo si potrebbero produrre corpi simili ai satelliti dei pianeti ma non pianeti veri e propri!

### ***Vincoli teorici ed osservativi alla costruzione di un modello di formazione del Sistema Solare.***

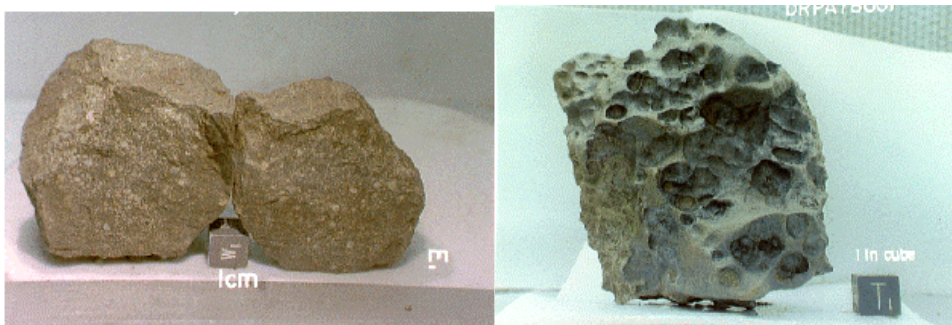
L'efficacia dei modelli di formazione del Sistema Solare risiede essenzialmente nella loro capacità di rispondere a due domande:

- ammesso che il Sole ed i pianeti si siano formati assieme dove e quando ciò è avvenuto ?
- il Sistema Solare si è formato da materiale interstellare freddo o da materiale solare riprocessato dalle reazioni termonucleari avvenute nel suo interno ?

A queste due possibilità le evidenze osservative permettono di dare una risposta esauriente con un elevato grado di accuratezza. È necessario a questo punto affrontare :

- il problema dell'età delle rocce terrestri, lunari e dei meteoriti
- ed indagare su come avviene la formazione stellare nella nostra galassia

### ***La datazione delle rocce terrestri, lunari e dei meteoriti.***



Il principio base della datazione si fonda sulla misura degli elementi radioattivi presenti nelle rocce sottoposte ad esame. Un elemento radioattivo "primario" dissociandosi dà luogo ad elemento "secondario". In un intervallo di tempo  $t$  le abbondanze si modificano seguendo una



**Iperastro- Il Sistema Solare-La formazione del Sistema Solare-Approfondimento-Parte IVa**  
legge del tipo:

$$d = d_0 + p ( e^{t\lambda} - 1 )$$

dove :

- $d_0$  è l'abbondanza iniziale dell'elemento primario  $d$
- $p$  è l'abbondanza iniziale dell'elemento secondario
- $t$  l'intervallo di tempo preso in considerazione
- $\lambda$  una costante di decadimento.

Nel caso in cui  $d'$  è un isotopo stabile dell'elemento  $d$  sempre nel tempo  $t$  abbiamo:

$$d/d' = (d/d')_0 + (p/d') ( e^{\lambda t} - 1 )$$






### **Tempi di decadimento radioattivo**

Al fine di misurare l'età del Sistema Solare si utilizzano degli "orologi" a lungo termine derivati dal decadimento di alcune specie fisiche. In particolare le coppie :

- $K^{40}$  (Kripton),  $Ar^{40}$  (Argon) con tempo di decadimento  $5.8 \cdot 10^{-11}$  per anno
- $Rb^{87}$  (Rubidio),  $Sr^{87}$  (Stronzio) con tempo di decadimento  $1.4 \cdot 10^{-11}$  per anno
- $U^{238}$  (Uranio),  $Pb^{238}$  (Piombo) con tempo di decadimento  $1.5 \cdot 10^{-11}$  per anno

Reazione di Decadimento	semidurata $T^{1/2}$
$U^{238} \rightarrow Pb^{206} + 8 He^4$	$4.49 \cdot 10^9$ anni
$U^{235} \rightarrow Pb^{207} + 7 He^4$	$0.713 \cdot 10^9$ anni
$Th^{232} \rightarrow Pb^{208} + 6 He^4$	$13.9 \cdot 10^9$ anni
$Rb^{87} \rightarrow Sr^{87} + 8 beta^-$	$61 \cdot 10^9$ anni
$K^{40} \rightarrow A^{40} + K(\text{gamma})$	$1.3 \cdot 10^9$ anni
$K^{40} \rightarrow Ca^{40} + beta^-$	$1.3 \cdot 10^9$ anni

## Principali Tipi di Meteoriti.

<p><b>Ferrosi</b></p>	<p>Sono composti principalmente di ferro e nichel e sono simili agli Asteroidi di Tipo M</p>	
<p><b>Ferrosi e Rocciosi</b></p>	<p>Presentano una mistura di ferro e materiali rocciosi simili agli Asteroidi di Tipo S</p>	
<p><b>Condriti</b></p>	<p>Il maggior numero di meteoriti ricade in questa classe e sono di composizione simile al mantello ed alla crosta dei pianeti terrestri.</p>	
<p><b>Condriti Carbonacee</b></p>	<p>Con una composizione chimica simile agli elementi meno volatili presenti nel Sole; assomigliano agli Asteroidi di Tipo C. Sono così chiamate perché contengono numerosi e minuscoli corpi (<i>condrule</i>) e per l'elevato contenuto di Carbonio. In alcune di esse, come in quella caduta a Murchison (Australia) nel 1969, sono stati identificati degli <i>amminoacidi</i>, le molecole che formano la base della materia vivente. .</p>	
<p><b>Acondriti</b></p>	<p>Sono simili alle rocce basaltiche terrestri. I meteoriti che si ritengono originati sulla Luna e su Marte sono di questo tipo.</p>	

## L'età del Sistema Solare

1. Le misure fatte con questi elementi su campioni di meteoriti mostrano che l'età del Sistema Solare è approssimativamente,  $4.55 \cdot 10^9$  anni cioè 4.55 miliardi di anni.
2. Inoltre le misure delle abbondanze del  $\text{Pu}^{244}$  (Plutonio), e dello  $\text{I}^{129}$  (Iodio) che hanno dei tempi di decadimento più corti, danno una indicazione relativa al tempo della condensazione del materiale planetario. Essi mostrano che non sono stati necessari più di

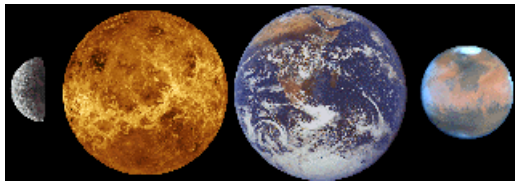
## ***Iperastro- Il Sistema Solare-La formazione del Sistema Solare-Approfondimento-Parte IVa***

100 milioni di anni per la formazione dei pianeti dopo che il materiale protosolare si è isolato da quello interstellare.

Quest'ultima stima delle età potrebbe corrispondere al momento in cui la nube protosolare è passata attraverso uno dei bracci a spirale della Galassia. Ciò implica che il Sole ed i pianeti si sono formati contemporaneamente, durante il passaggio in una parte della Galassia sicuramente più densa e piena di polveri.

### ***Il Sistema Solare.***

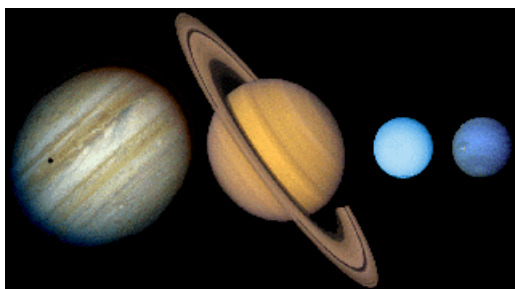
#### ***I pianeti interni***



I *pianeti interni* più vicini al Sole (quelli "Terrestri") si formarono con una struttura "rocciosa" mentre quelli più lontani, i *pianeti esterni*, dal Sole con una struttura maggiormente "gassosa". Mercurio, Venere, Terra e Marte sono costituiti infatti da un nucleo metallico circondato da uno strato di silicati. Nel passato tutti e quattro furono modificati dall'attività vulcanica e tettonica mentre gli altri pianeti risentirono principalmente dell'impatto delle meteoriti. Oggi solo la Terra è tettonicamente attiva anche se gas prodotti dai vulcani formarono le atmosfere di Venere e di Marte.

#### ***La fascia degli asteroidi***

I *pianeti esterni* sono separati, da quelli interni, dalla cintura degli Asteroidi. Questi frammenti di roccia hanno diametri che variano da alcune migliaia di km a pochi km.



#### ***I pianeti esterni***

I quattro *pianeti Giganti* ( Giove, Saturno, Urano e Nettuno ) contengono il 99 % del materiale del *Sistema Solare* escluso il Sole. Sono degli sferoidi di gas di idrogeno ed elio con miscugli di metano, ammoniaca, ed acqua. Il gas di idrogeno nell'interno di Giove e Saturno condensò in idrogeno liquido alle maggiori profondità. Tutti e quattro hanno, probabilmente, un nucleo costituito da metalli, silicati ed acqua. Tre dei *pianeti Giganti* irradiano più calore di quanto ne ricevano dal Sole. Curiosamente solo Urano non presenta questo eccesso di

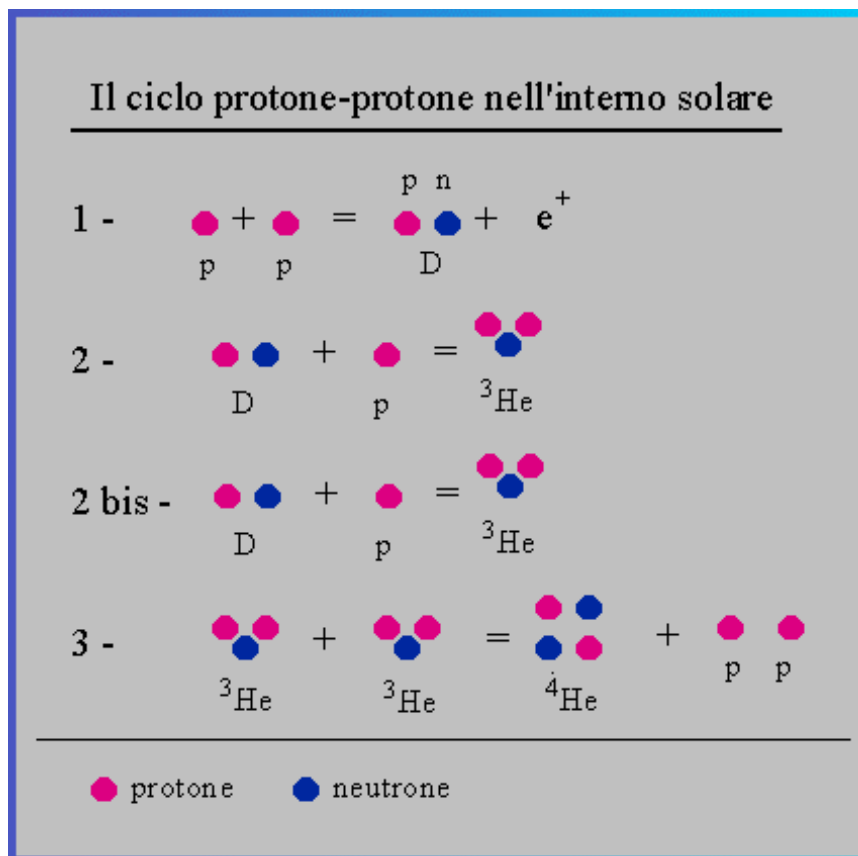
**Iperastro- Il Sistema Solare-La formazione del Sistema Solare-Approfondimento-Parte IVa**  
calore.

**La fascia esterna del Sistema Solare**

Nella parte più esterna del *Sistema Solare* si trova Plutone con il suo satellite Caronte grande la metà del pianeta principale. Plutone ha una sottile atmosfera di gas metano e, come il suo satellite, è probabilmente costituito di ghiaccio e metano. Le Comete, composte anch'esse principalmente di ghiaccio, orbitano, intrappolate dal campo gravitazionale del Sole, ai limiti del *Sistema Solare* . Esse percorrono delle orbite "aperte" oppure "chiuse" ritornando periodicamente, in quest'ultimo caso, a passare in prossimità anche dei *pianeti*.

**Le reazioni termonucleari nel protosole**

Il Deuterio è presente nel mezzo interstellare ma viene distrutto nelle stelle in seguito alle reazioni termonucleari.



Le reazioni del ciclo protone-protone	
1-	Nella prima reazione due protoni si uniscono per creare un nucleo di deuterio (D) ed un positrone ( $e^+$ )
2-	Nella seconda reazione un nucleo di deuterio ed un protone si uniscono per creare un nucleo dell'isotopo 3 dell'elio ( $^3\text{He}$ )
2 bis -	La reazione (2) deve avvenire due volte perché possa aver luogo la reazione (3)
3 -	Nella terza reazione due nuclei di $^3\text{He}$ danno luogo ad un nucleo dell'isotopo 4 dell'elio ( $^4\text{He}$ ) più due protoni, che sono disponibili di nuovo per la reazione (1), donde il nome di <i>ciclo</i> al complesso delle reazioni p-p

### ***La misura del rapporto Deuterio/Idrogeno nei pianeti giganti***

Il tempo in cui avviene la reazione che trasforma il deuterio è molto più breve (circa 1 minuto) delle altre reazioni (con tempi 1 milione di anni).

Dal momento che, nei pianeti giganti, il valore del rapporto D/H è maggiore di quello prevalente nel mezzo interstellare se ne ricava che questo dato può indicare l'abbondanza di tale rapporto 4.55 miliardi di anni fa.

Se il materiale planetario fosse un tributo del materiale solare l'abbondanza di deuterio sarebbe uguale a zero come nel Sole, dal momento che il Deuterio venne distrutto dentro il Sole appena iniziano le reazioni nucleari.

Questo fatto è molto importante, in quanto indica che i pianeti NON si sono formati da materiale trasformatosi nell'interno del Sole in seguito alle reazioni termonucleari. Ne consegue quindi che :

- le teorie mareali vanno scartate poiché ammettono che il materiale da cui si sono formati i pianeti è di origine solare
- potrà essere quindi attendibile solo una versione migliorata della teoria nebulare in accordo con questi dati osservativi.

### ***Lo sviluppo di un modello plausibile per la formazione del Sistema Solare***

Il modello delle nebulosa primitiva va quindi integrato tenendo conto di alcuni fatti sostanziali :

I dati da meteoriti

## ***Iperastro- Il Sistema Solare-La formazione del Sistema Solare-Approfondimento-Parte IVa***

- L'analisi degli elementi e dei rapporti isotopici nei meteoriti è utilizzabile come metodo per determinare le età
- in particolare un certo numero di elementi quali l'ossigeno, il magnesio, ed il neon presentano delle anomalie che suggeriscono la presenza, nella "nebulosa molecolare primitiva", di "grani presolari" dovuti a materiale espulso da supernovae, novae o stelle Wolf-Rayet.
- Il contributo delle osservazioni delle zone di formazione stellare
- Importanti sono le osservazioni delle regioni di formazione stellare nella Galassia. Nelle associazioni stellari O-B ci sono le condizioni per produrre le instabilità gravitazionali atte ad innescare il processo di formazione planetaria. Una onda d'urto, prodotta dall'esplosione di una supernova, può facilitare l'innescio del processo di coalescenza gravitazionale comprimendo le nubi molecolari preesistenti. Questo meccanismo però non è necessario in quanto l'instabilità gravitazionale può avere luogo anche a partire da piccoli frammenti (di circa un centesimo di massa solare) formati da stelle di poche masse solari !

Infatti

- l'origine degli elementi a breve vita radioattiva come Al <sup>26</sup> nella nebulosa protosolare appare prodotta nelle atmosfere delle giganti rosse di circa un massa solare

ne consegue che il modello che presuppone l'esplosione di una supernova nelle vicinanze del sito di formazione planetaria non è strettamente necessario !

### ***L'instabilità gravitazionale***

Ipotizziamo una sfera di gas con :

- Raggio  $R = 10000 R_s$  (Raggio solare) che corrisponde all'orbita di Plutone
- Densità media  $\rho \sim 10^{-12} \rho_s$  (Densità solare) analoga alla densità nella cromosfera solare

che consiste principalmente di idrogeno molecolare H<sub>2</sub> e polvere. Per un corpo in equilibrio si ha :

$$\Omega^2 R = g_{eq}$$

dove

- $\Omega$  = alla velocità di rotazione della nebulosa
- $R$  =raggio delle nebulosa
- $g_{eq}$  = accelerazione di gravità all'equatore

Mano a mano che la nebulosa si contrae la temperatura aumenta e questo determina la

## ***Iperastro- Il Sistema Solare-La formazione del Sistema Solare-Approfondimento-Parte IVa***

dissociazione dell'idrogeno molecolare  $H_2$ . Il coefficiente di compressione adiabatica :

$$\gamma = d \ln p / d \ln \rho$$

decrece.

Quando  $\gamma$  è minore di  $4/3$  si instaura una instabilità gravitazionale.

In particolare Schatzman ha dimostrato che ciò continua fino a che risulta  $\gamma = 4/3$  dopo di che il collasso si ferma che ad un raggio  $R = 100 R_s$  dopo un periodo di 100 anni circa !

### ***La massa coinvolta nella contrazione***

In base alla legge di conservazione del momento angolare

$$G M/R^2 = \Omega R$$

dove:

- $G$ =costante gravitazionale.
- $M$ =massa della nube
- $R$ =raggio della nube
- $\Omega$ = alla velocità di rotazione della nebulosa

Si può calcolare la massa persa nel piano equatoriale in seguito alla contrazione. Secondo le stime più attendibili la massa che non è coinvolta nella contrazione del Sole è pari al 10 % di quella totale.

### ***Massa dei pianeti interni***

La massa necessaria per formare i pianeti interni è doppia di quella della Terra cioè:

$$6 \times 10^{-6} M_s$$

Questi pianeti si compongono principalmente di materiale solido a cui dovremmo aggiungere i gas (Idrogeno, Elio ed altri componenti gassosi della nebulosa primitiva) che sono sfuggiti ad essi e che contribuiscono al 99 % della massa totale. In questo modo la massa necessaria sale ad un valore pari a :

$$6 \times 10^{-4} M_s$$

### ***Massa dei pianeti esterni***

Il contributo dei pianeti giganti esterni va ulteriormente aggiunto al valore precedente ed è pari a :

$$2 \times 10^{-3} M_s$$

### ***Massa totale***

## ***Iperastro- Il Sistema Solare-La formazione del Sistema Solare-Approfondimento-Parte IVa***

Il valore complessivo della massa, coinvolta nella formazione dei pianeti interni ed esterni, sale a :

$$3 \times 10^{-3} M_S$$

Dal momento che la quantità di materiale coinvolto nella contrazione è pari al 10 %  $M_S$  se ne ricava che questo è un valore sufficiente a determinare la formazione dei pianeti sia interni che esterni.

### ***Il disco protoplanetario***

Il disco protoplanetario ha:

- una massa iniziale  $M_{\text{disco}} = 10^{-2} M_S$
- è posto ad una distanza  $D_{\text{disco}} \sim 7 \text{ UA}$
- (tra l'orbita attuale di Giove e di Saturno)
- ha una densità superficiale pari a  $\sigma \sim 1000 \text{ gr/cm}^2$

Si può calcolare lo spessore del disco stesso assumendo che la sua componente principale (il che è verificabile *a posteriori*) è quella della componente verticale  $g_z$  del campo gravitazionale del Sole.

Utilizzando l'ipotesi di equilibrio idrostatico ne risulta un disco protoplanetario quasi piatto con uno spessore :

$$h_{\text{disco}} \sim (1/10) \cdot D_{\text{disco}} \sim C / \Omega$$

Dove :

- $C$  è la velocità del suono del gas  $\sim 100000 \text{ cm/s} = 1 \text{ km/s}$
- $\Omega$  è la velocità di rotazione pari a  $10^{-8} / \text{s}$

cioè :

$$h_{\text{disco}} \sim 0.7 \text{ UA}$$

### ***Il limite di Roche***

Nel 1847 il fisico Roche mostrò che un satellite in orbita circolare attorno ad un corpo centrale sarebbe distrutto dalle forze mareali se venisse a trovarsi più vicino al corpo centrale di un certo limite; il cosiddetto *limite di Roche*.

Per un corpo rigido di forma sferica, simile ad un pianeta orbitante attorno al Sole, questo limite,  $a_R$ , è dato da :

dove

$\rho_S$  = densità media del Sole



## ***Iperastro- Il Sistema Solare-La formazione del Sistema Solare-Approfondimento-Parte IVa***

$\rho_g$  = densità media del gas nel disco

$R_s$  = raggio del Sole

Da questa relazione è possibile ricavare una *densità critica* oltre la quale l'instabilità gravitazionale si sviluppa ad una data distanza eliocentrica.

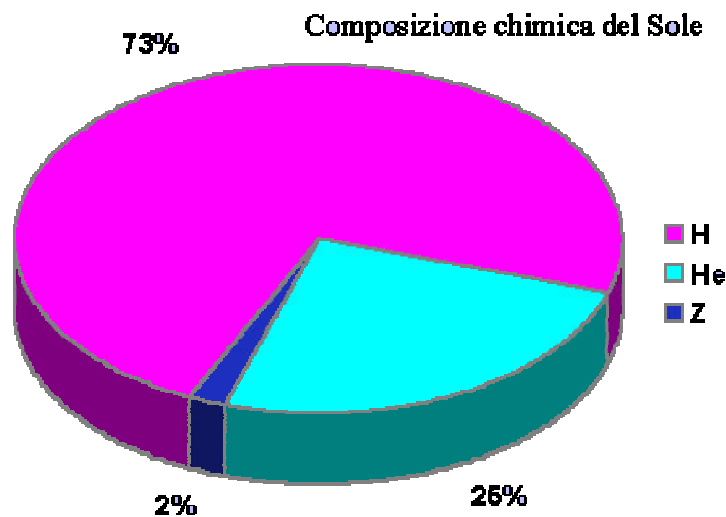
Si è trovato (Brahic 1982) che tale *densità critica* è  $\sim 10$  volte la densità superficiale  $\rho_g$ .

Questo ci permette di affermare che :

- con una nebulosa a piccola massa  $\sim 0.01 M_s$  NON si formano i pianeti direttamente da una instabilità gravitazionale
- mentre con una nebulosa ad alta massa  $\sim 100 M_s$  è possibile innescare la formazione dei pianeti. Rimane tuttavia, all'interno di questo modello, la necessità di eliminare tutta quella massa non direttamente utilizzata nella formazione dei pianeti.

### ***La formazione dei grani.***

A partire da una certa temperatura la nebulosa molecolare raffredda lentamente determinando una progressiva condensazione delle sue componenti iniziando da quelle più refrattarie. Partendo dalle abbondanze degli elementi misurate nel Sole :



è possibile ricostruire la sequenza di condensazione.

### ***La sequenza di condensazione.***

Dapprima avviene la condensazione dei seguenti elementi :

- da 1880 a 880 ° K (gradi Kelvin) - Al , Ti , Ca , Mg , Si , Fe , Na , S

**Iperastro- Il Sistema Solare-La formazione del Sistema Solare-Approfondimento-Parte IVa**

- se le temperature si abbassano sino a valori 200-300 ° K (gradi Kelvin) anche H,O, C ed N si condensano.

La fase è stabile a temperature attorno ai 1400 gradi Kelvin e le abbondanze così ottenute sono in eccellente accordo con quelle delle abbondanze misurate nelle meteoriti condriti.

Va tuttavia notato che la sequenza dipende strettamente da rapporto iniziale C/O per cui una diversa sequenza di condensazione è attesa se il valore di tale rapporto invece di 0.55 è, ad esempio, 1.2 !

**Tabella delle sequenze di condensazione.**

Sequenza di Condensazione					
Caso 1	C/O=0.55	P=10 <sup>-3</sup> atm	Caso 2	C/O=1.2	P=10 <sup>-3</sup> atm
Minerale	Temperatura di condensazione ° K	Temperatura di solidificazione ° K	Minerale	Temperatura di condensazione ° K	Temperatura di solidificazione ° K
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1743	----	Ti C	1893	1025
Ca Ti O <sub>3</sub>	1677	1409	Si C	1742	1154
Melilite	1625	1438	C	1732	871
Mg Al <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	1533	1391	Fe <sub>3</sub> C	1463	1326
Fe-Si	1438	---	A I N	1390	1234
CA Mg Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	1438	----	Ca S	1385	1040
Mg <sub>2</sub> Si O <sub>4</sub>	1433	----	Fe Si	1326	----
Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub>	1409	1274	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1235	1229
Ca Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	1392	1068	Mg Al <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	1229	1077
Mg Si O <sub>3</sub>	1351	----	Mg <sub>2</sub> Si O <sub>4</sub>	1154	----
Ti <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	1274	1120	Mg S	1131	1100

**Iperastro- Il Sistema Solare-La formazione del Sistema Solare-Approfondimento-Parte IVa**

Ti O <sub>2</sub>	1120	774	Ca Mg Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	1069	----
Al <sub>2</sub> Si O <sub>5</sub>	1068	----	Ca Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	1057	1044
Na Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	1028	780	Mg Si O <sub>3</sub>	1054	----
Na Al Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	780	----	Al <sub>2</sub> Si O <sub>3</sub>	1045	----
Ca Ti Si O <sub>5</sub>	774	----	Ti N	1025	910
---	---	----	Na Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	961	780
---	---	----	Ti <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	910	862
---	---	----	Ti O <sub>2</sub>	862	770
---	---	----	Na Al Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	780	---
---	---	----	Ca Ti Si O <sub>5</sub>	770	---

***Il collasso dei grani verso il piano equatoriale***

Le particelle solide, più massive del gas, hanno una tendenza a migrare verso il piano equatoriale del disco. Se, in prima approssimazione, assumiamo che vi sia equilibrio tra le forze gravitazionali e le forze viscosi otteniamo un tempo caratteristico perché esse raggiungano il piano equatoriale :

$$t \sim \rho_g C / \rho_p r \Omega^2$$

dove :

- $\rho_g$  = densità del gas =  $10^{-10}$  gr/cm<sup>3</sup>
- $\rho_p$  = densità dei grani = 1 gr/cm<sup>3</sup>
- C è la velocità del suono del gas ~ 1 km/s
- $\Omega$  è la velocità di rotazione pari a  $10^{-8}$  / s
- r= spessore dei grani = 1 -3 cm

Se ne ricava che t ha un valore pari a circa 100 anni ! I grani quindi si accumulano nel piano equatoriale in un tempo molto breve.

Quando i corpi solidi iniziano ad accumularsi nel piano equatoriale le collisioni inelastiche diventano sempre più importanti. Esse hanno come effetto di diminuire lo spessore del disco di polvere sino a che, lo spessore del disco, non raggiunga, in pochi intervalli di tempo, le

**Iperastro- Il Sistema Solare-La formazione del Sistema Solare-Approfondimento-Parte IVa**  
dimensioni dei corpi stessi.

### ***La formazione dei pianeti per accrescimento***

Le collisioni inelastiche nel piano equatoriale hanno come effetto di accelerare la crescita dei planetoidi.

A partire da dimensioni di 1 cm essi acquisiscono massa per accrescimento in seguito a collisioni nella loro orbita. Sia  $m$  la massa del corpo ed  $r$  il suo raggio, il ritmo di crescita può essere espresso dall'equazione :

$$dm/dt = \pi l^2 \rho_0 V$$

dove

- $\rho_0$  = densità delle particelle all'orbita del corpo nel piano equatoriale
- $\pi l^2$  = sezione d'urto effettiva del corpo
- $V$  = velocità relativa tra il corpo e le particelle

Per effetto della gravità la sezione d'urto è più grande della sezione geometrica. Tramite una serie di conti, che qui non esporremo, ad 1 UA il ritmo di crescita è costante ed il raggio cresce linearmente nel tempo secondo la legge :

$$r = \sigma_0 (1 + 2\theta) t / (P\Delta)$$

dove :

- $P$  = periodo orbitale della nube nell'orbita attorno al Sole
- $\Delta$  densità del corpo (che si assume costante)
- $\theta = Gm/r V^2 \sim$  con valori da 3 a 7
- $\sigma_0$  = densità superficiale della nube

Ne consegue che è possibile accrescere dei corpi fino a dimensioni di alcune centinaia di km in tempi di 100 milioni di anni.



### *L'effetto del vento solare*

Per analogia con quanto osservato nelle stelle giovani, assumiamo che il Sole, nella prima fase della sua esistenza manifesti una intensa attività magnetica.

In particolare, secondo quello che è il confronto con le stelle di tipo *T-Tauri*, è possibile stimare l'intensità del vento solare primordiale come  $10^8$  volte maggiore di quella attuale. La pressione esercitata sulle particelle dal vento solare primordiale era quindi circa 100.000 volte quella del vento solare odierno !

L'effetto di questa pressione sulle particelle, che agisce in modo antagonista all' azione attrattiva della gravità solare, è :

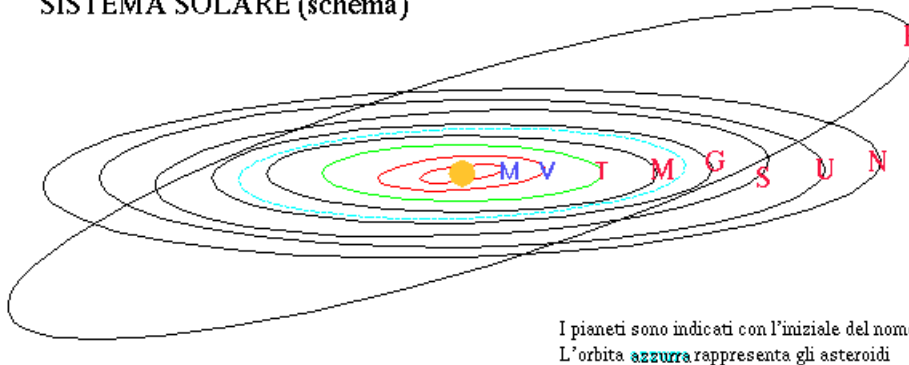
- proporzionale alla massa delle particelle e quindi dipendente da  $r^3$

In questo modo è possibile determinare un valore di distanza  $r_0$  in cui le due forze che si oppongono l'uno all'altra (quella determinata dal vento solare primordiale e la forza di gravità del Sole) si annullano.

Oggi il valore di  $r_0$  è pari ad 1 micron ma anche all'origine del Sistema Solare non era molto grande pari, al più 10 cm. Ne consegue che il *vento solare primordiale* era sufficientemente intenso per spazzare via le particelle di dimensioni minori del cm.

## La relazione di Titius-Bode

SISTEMA SOLARE (schema)



Il termine "*legge di Titius - Bode*" viene usato per indicare una relazione empirica che definisce in modo approssimato le distanze medie dei pianeti dal Sole espressa in Unità Astronomiche (U.A.).

La legge, benché fosse stata scoperta nel 1741 dall'astronomo tedesco Wolf e riscoperta dal compatriota Johann Titius nel 1772, è nota soprattutto per l'opera di divulgazione di Johann Bode, che, nel 1778, ne ha dato anche una formulazione matematica precisa.

Secondo questa legge, le distanze dei pianeti dal Sole, in U.A., si trovano dalla serie 0- 3- 6- 12- 24- 48- 96- ..., in cui ogni numero, a partire dal terzo, è il doppio del precedente; aggiungendo 4 ad ogni numero e dividendo il risultato per 10 si ottiene 0.4- 0.7- 1- 1.6- 2.8- 5.2- 10- 19.6- ...

Matematicamente, la serie precedente si esprime con la relazione:

$$d = 0.4 + 0.3 \cdot 2^n$$

dove  $n$  è un numero che vale *meno infinito* per Mercurio,  $0$  per Venere,  $1$  per la Terra,  $2$  per Marte e così via.

## La relazione di Titius-Bode, legge o coincidenza ?

Le distanze vere dei pianeti, sono ben approssimate fino ad Urano (la differenza tra la legge di Bode e la distanza reale non supera mai il 5 %). Nel caso di Nettuno la differenza supera il 22% e per Plutone è del 49%.

## Iperastro- Il Sistema Solare-La formazione del Sistema Solare-Approfondimento-Parte IVa

<b>TABELLA</b>			
Pianeta	Distanza dal Sole (x1000 km)	AU	Legge di Titius-Bode
Mercurio	57895	0.387	$(0+4)/10=0.4$
Venere	108160	0.723	$(3+4)/10=0.7$
Terra	149600	1	$(6+4)/10=1.0$
Marte	227990	1.524	$(12+4)/10=1.6$
Fascia Asteroidi	414392	2.77	$(24+4)/10=2.8$
Giove	778368	5.203	$(48+4)/10=5.2$
Saturno	1427034	9.539	$(96+4)/10=10.0$
Urano	2869328	19.18	$(192+4)/10=19.6$
Nettuno	4496976	30.06	$(398+4)/10=40.2$
Plutone	5900224	39.44	$(796+4)/10=80.0$

Malgrado questa sia una relazione empirica, e cioè senza alcuna base fisica, la legge ha avuto il pregio di far sospettare, già nel '700, l'esistenza di un pianeta con  $n=3$  che doveva essere posto tra Marte e Giove.

La scoperta di Cerere, un asteroide, da parte di Padre Piazzi, a Palermo, nel 1801, confermò la validità della legge, anche se negli anni successivi si verificò che gli asteroidi sono migliaia, la maggior parte dei quali ha orbite comprese tra quella di Marte e di Giove. Rimase per molto tempo diffusa tra gli astronomi la convinzione che gli asteroidi siano il risultato della distruzione di un pianeta posto originariamente tra Marte e Giove. In realtà si è ora convinti che i pianetini siano materiale originario di accrescimento, cioè proveniente direttamente dalla nebulosa dalla quale è nato il Sistema Solare, in via (teorica) di accorpamento, che non riuscì mai a dare origine ad un pianeta, a causa della piccola massa complessiva.

Molti autori hanno tentato di spiegare questa relazione tramite dei modelli cosmogonici sperando di utilizzarla come un test di verifica degli stessi modelli. La scoperta di numerosi nuovi satelliti di Giove e Saturno, ha permesso di comprendere come questa relazione non si applica a questi che si possono a tutti gli effetti intendere come dei Sistemi Solari su scala più piccola. Inoltre Henon nel 1969 e Lecar nel 1973 hanno mostrato che una distribuzione casuale di numeri potrebbe soddisfare una relazione come quella di Titius-Bode con il solo vincolo che siano abbastanza prossimi l'uno all'altro. Ne consegue che questa relazione è del tutto casuale e non ha quindi nessun "status" di legge.

## ***Il problema del momento angolare***

Nella risoluzione del problema del momento angolare sono state determinanti :

- le teorie di evoluzione stellare sulle fasi iniziali di vita delle stelle
- la teoria dinamica del campo magnetico (magneto-idrodinamica)

Un stella rotante dotata di vento stellare e di un forte campo magnetico iniziale tende a diminuire la sua rotazione per un effetto di "frenamento" dovuto al flusso delle particelle del vento lungo le linee di forza del campo magnetico. Questo può determinare un trasporto delle particelle ad una distanza a maggiore del raggio R della stella.

Anche una piccola perdita di massa può produrre una grande perdita di momento angolare in quanto proporzionale ad  $(a/R)^2$ .

In questo modo, se la perdita di massa è solo 0.003, Masse Solari per anno questo meccanismo è sufficiente per rallentare il periodo di rotazione del Sole.

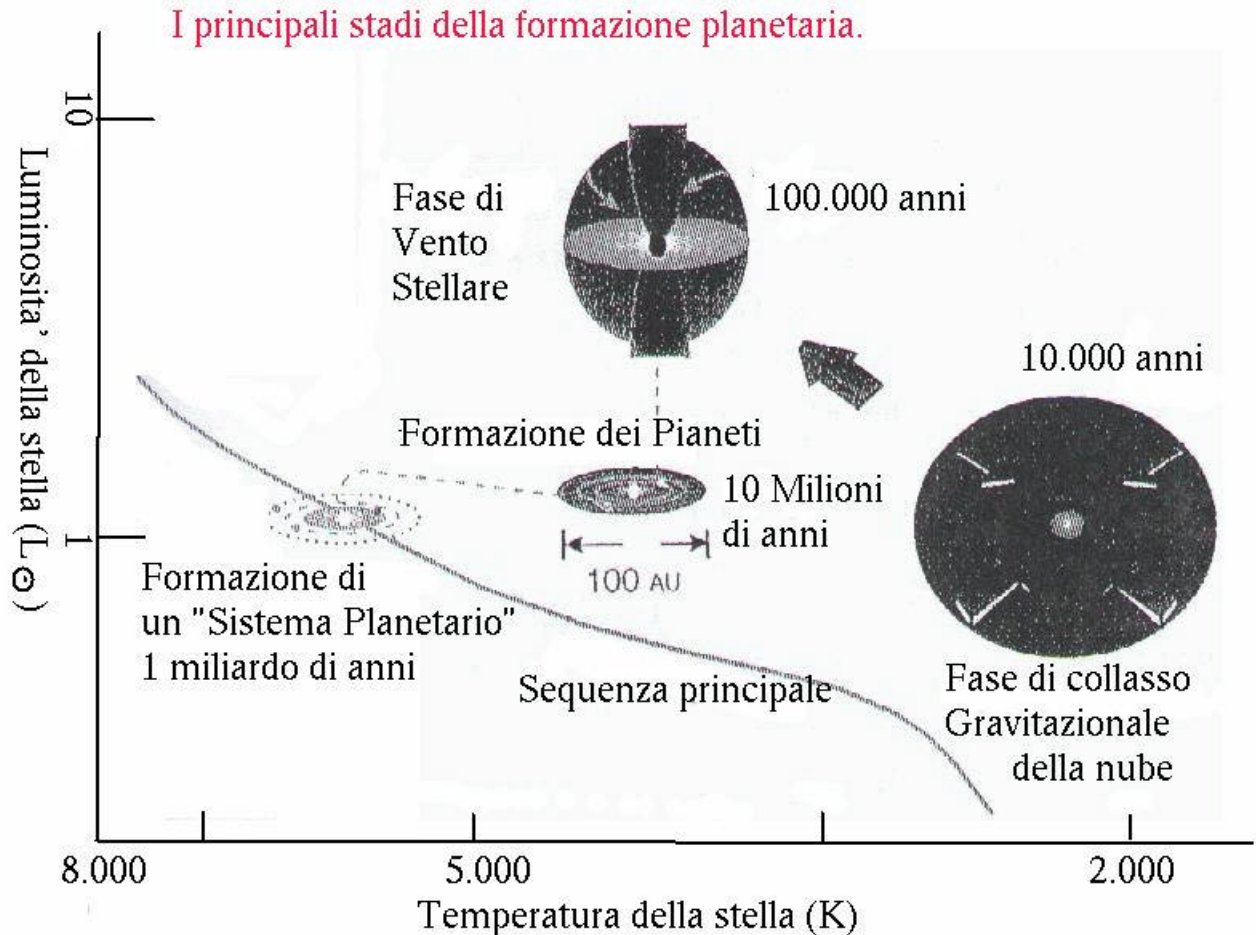
Per di più nelle stelle giovani, del tipo T-Tauri, si misura una forte perdita di massa associata ad una intensa attività magnetica e quindi un forte decremento del periodo di rotazione.

Il Sole altro non è che un esempio dell'evoluzione di questi tipi di stelle giovani !



## **Conclusioni.**

Nella immagine seguente vengono riassunte le principali fasi della formazione planetaria.



## **Lo stato corrente della nostra conoscenza del Sistema Solare**

Sebbene nessun scenario è oggi universalmente accettato ci sono numerosi punti di consenso ed accordo riguardanti la formazione del Sistema Solare.

1. I modelli più credibili sono quelli che derivano dal quello nebulare di Kant e Laplace.
2. La formazione del Sistema Solare ha avuto luogo quando la nube molecolare primordiale ha attraversato uno dei bracci a spirale delle Galassia. L'ultimo arricchimento della nube, attraverso la Galassia, potrebbe essere avvenuto utilizzando il materiale sintetizzato per nucleosintesi nelle stelle e restituito al mezzo interstellare. Il metodo dello Iodio-129 suggerisce che l'ultimo passaggio è avvenuto almeno 100 milioni di anni prima della formazione.
3. Il Sistema Solare può essersi formato sia dentro un'associazione stellare OB, con formazione di stelle molto massicce, sia in una più piccola nube molecolare, con formazione

### ***Iperastro- Il Sistema Solare-La formazione del Sistema Solare-Approfondimento-Parte IVa***

di stelle di piccola massa. I metodi di datazione con  $O^{16}$ ,  $Al^{26}$  e  $N^{20}$  suggeriscono che nella nube è stato introdotto ulteriore materiale in seguito all'esplosione di una supernova o di una nova oppure, più probabilmente, da altre stelle del tipo Wolf-Rayet.

4. L'attuale lenta rotazione del Sole, può essere spiegata tramite fenomeni magneto-idrodinamici che si osservano pure in stelle di tipo spettrale (F G e K) analoghe alla nostra stella.
5. Viene comunemente accettato il *modello di formazione planetaria a piccola massa* di 0.01 Masse Solari. In questo modello la nube collassa su di un disco, le particelle cadono nel piano equatoriale in poche centinaia d'anni ed accrescono per collisione ad un ritmo di 1 cm all'anno.
6. Durante le prime fasi di vita il Sole aveva un vento solare molto intenso che ha espulso le particelle, di dimensioni superiori al centimetro, che non si sono conglomerate nei planetoidi.