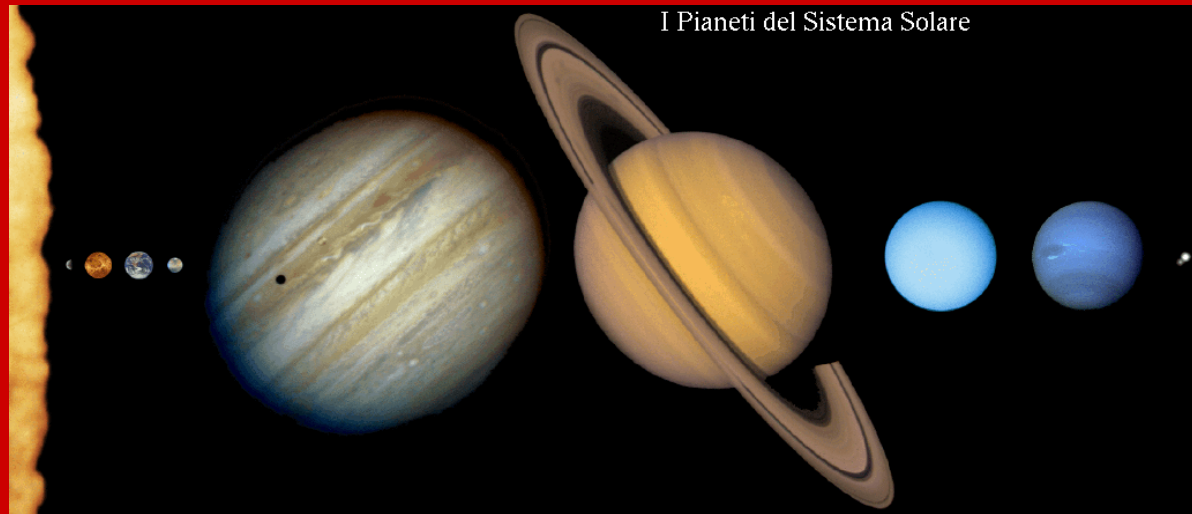


Origine e evoluzione del Sistema solare

Le conferenze della Specola
7-Novembre 2002

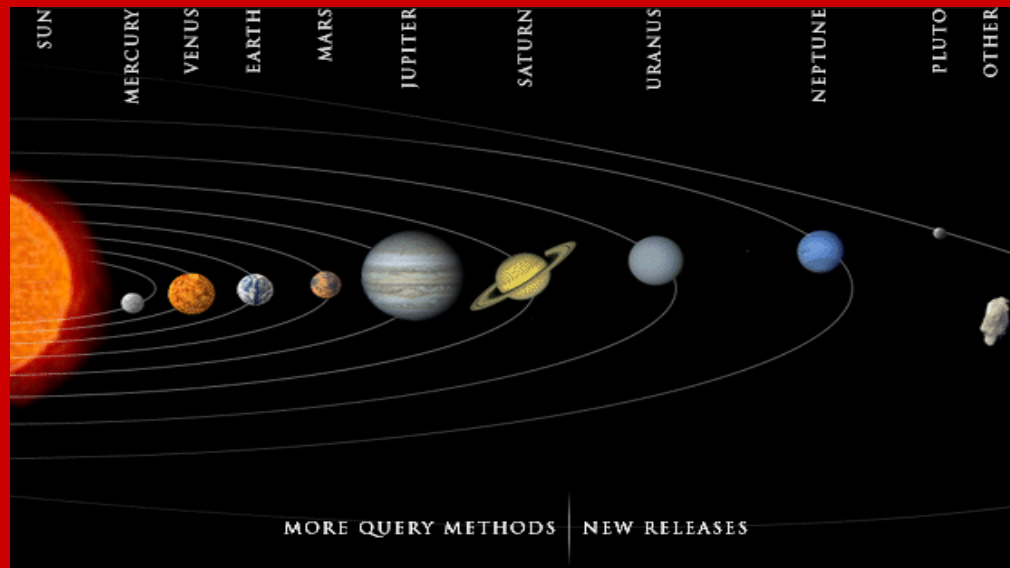


Roberto Bedogni

Osservatorio Astronomico di Bologna via Ranzani, 1 40127 - Bologna - Italia

Tel. 051-2095721 Fax. 051-2095701

Introduzione



Dividiremo l'argomento trattato in questa lezione selezionando alcuni punti fondamentali:

1)

La storia delle teorie di formazione del Sistema Solare

2)

La teoria nebulare

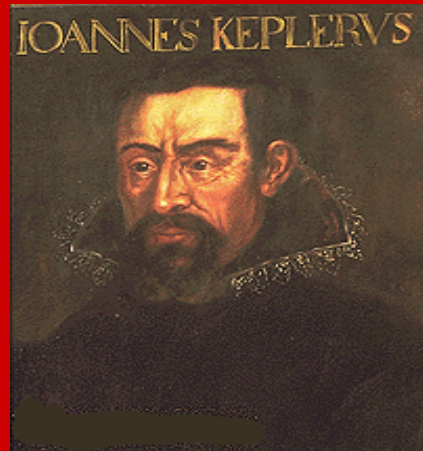
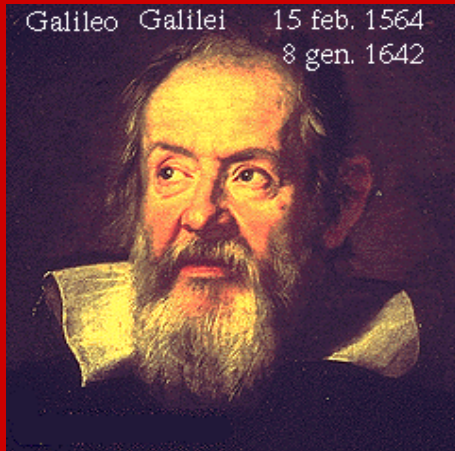
3)

Le orbite dei pianeti

4)

Introduzione al problema del momento angolare

Le teorie di formazione planetaria



I contributi fondamentali alla meccanica celeste di Keplero, Galileo e Newton permisero di definire una nuova visione del “mondo”, un sistema completo ed esauriente fondato su leggi fisiche e non solo su presupposti filosofici.

Si definirono quindi le prime idee relative alla genesi del Sistema Solare che trovarono la loro espressione nei **modelli**:

- **Di turbolenza**
- **Mareali**
- **Di accrescimento**
- **E nella teoria nebulare**

La teoria mareale



Renè Decartes fu il primo che cercò di fornire una spiegazione scientifica dell'origine del Sistema Solare e che per primo introdusse l'idea di evoluzione.

Nella sua opera *Teoria dei Vortici* del 1664 avanzò l'ipotesi che il Sistema Solare, costituito da materia ed etere fosse pieno di vortici di diverse dimensioni.

In questo modello, ripreso nel XX secolo da Von Weiszacker, ter Haar, Kuiper, Whipple e Mc Crea, non è chiaro il meccanismo tramite il quali i vortici avrebbero prodotto i pianeti disposti sul piano dell'eclittica

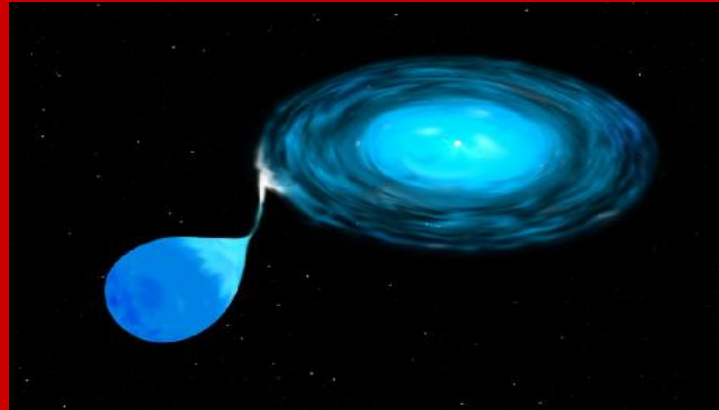
I limiti della teoria mareale-Modello Catastrofico

Binckerton nel 1880 e Chamberlain nel 1901 sostituirono la cometa con una stella rendendo più accettabile il “meccanismo di estrazione” del materiale dal Sole.

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.

Risulta difficile spiegare con questo meccanismo la formazione dei pianeti esterni, con struttura e composizione diversa dai pianeti interni. Inoltre la possibilità di un incontro con un'altra stella, date le enormi distanze, è talmente improbabile da rendere poco plausibile il modello catastrofico.

Le teorie di accrescimento



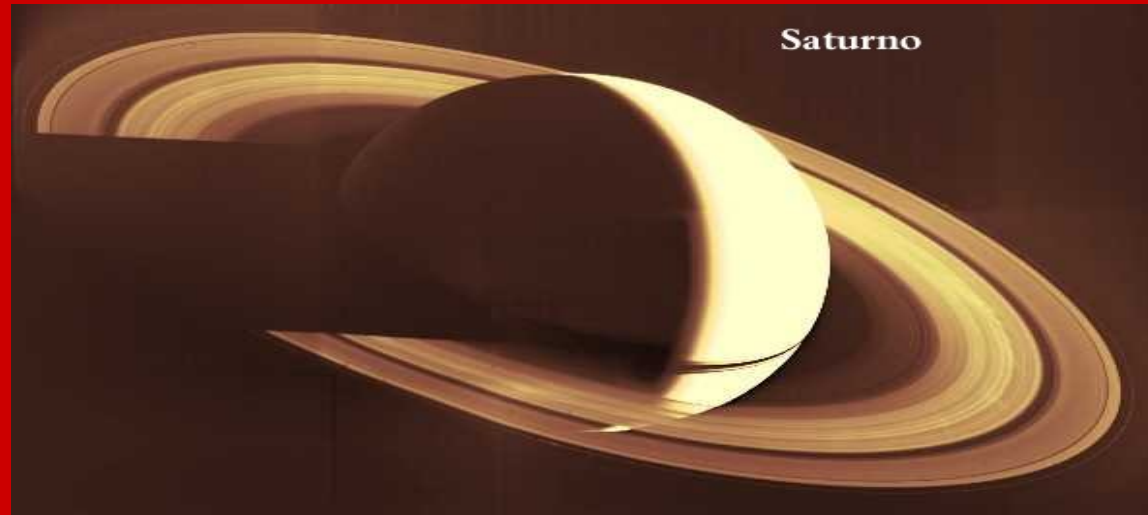
Questi modelli assumono la possibilità, da parte del Sole, di “catturare” del materiale interstellare.

Un primo modello richiede la presenza di una stella vicina, secondo **Schmidt**, potrebbe aver permesso la coalescenza del gas e delle polveri in modo da formare i pianeti.

Una variante di questa teoria invece suppone che il Sole abbia incontrato, nel suo moto lungo il piano della Galassia, due distinte nebulose:

- Una consistente di polveri da cui si sono originati i **pianeti interni**
- Un'altra di gas, principalmente idrogeno, che ha prodotto i **pianeti esterni**.

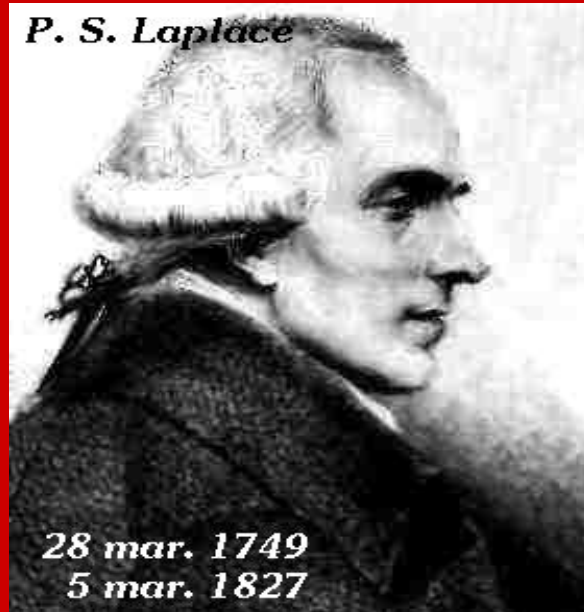
I limiti delle teorie di accrescimento



La maggiore obiezione è legata al fatto che **le collisioni avrebbero potuto essere efficaci solo nel caso in cui le particelle di gas e polveri fossero state confinate in strutture ad anello** simili a quelle degli anelli di Saturno.

Inoltre la selezione del materiale tra polveri e gas, in modo da portare alla formazione differenziata dei pianeti interni ed esterni, risulta alquanto delicata e difficile da spiegarsi.

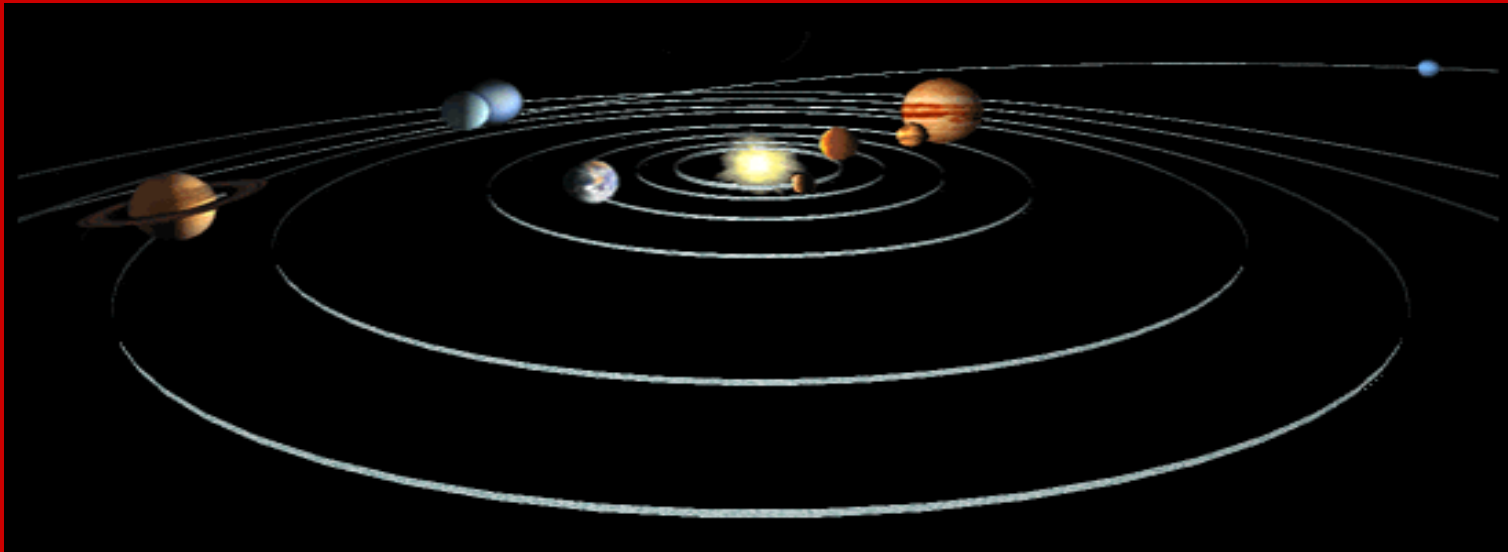
La teoria nebulare di Kant e Laplace



L'idea che il Sistema Solare si sia formato da una nebulosa di gas e polveri fu proposta da Kant (1724-1804) e Laplace (1749-1827).

Questo modello ebbe il merito di rendere conto di buona parte delle conoscenze astronomiche relative al Sistema Solare, note nel 18^{esimo} secolo.

Principali problemi connessi con la teoria nebulare



Tre sono i problemi connessi con il modello della nebulosa primordiale:

1.

Le orbite dei pianeti

2.

Il problema del momento angolare

3.

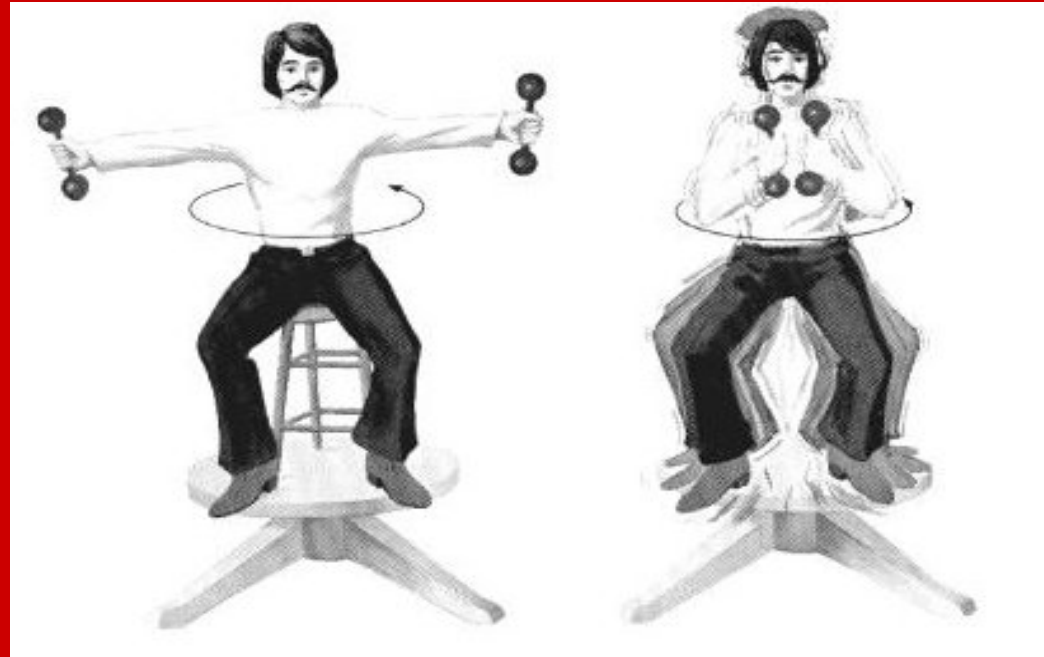
Le orbite dei pianeti



Dalle osservazioni sono stati ricavati alcuni fatti relativi alle **orbite planetarie** che sono fondamentali per un **modello di formazione del Sistema Solare**:

- Le orbite dei pianeti sono prossime al piano dell'eclittica, cioè al piano orbitale terrestre
- Sono praticamente circolari
- I pianeti ruotano tutti nello stesso senso attorno al Sole che è pure quello della sua rotazione, escluso Urano che ha rotazione retrograda
- Le distanze eliocentriche obbediscono alla legge di Titius-Bode

Il problema del momento angolare



Alla fine del 19^{esimo}, 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.

Il problema del momento angolare

Per **momento angolare** si intende una quantità che misura l'intensità della rotazione di un corpo attorno al proprio asse.

Supponiamo di avere un corpo rigido di massa **M** e raggio **R**, che ruota su se stesso con una velocità angolare ω

Se il corpo solido è “isolato” vale la legge di conservazione del **momento angolare**:

$$dN/dt=0$$

Con il **momento angolare definito** come:

$$N= M R^2 \omega$$

Che risulta costante!

Il problema del momento angolare

Supponiamo che il corpo rigido sia la “sfera” protoplanetaria.

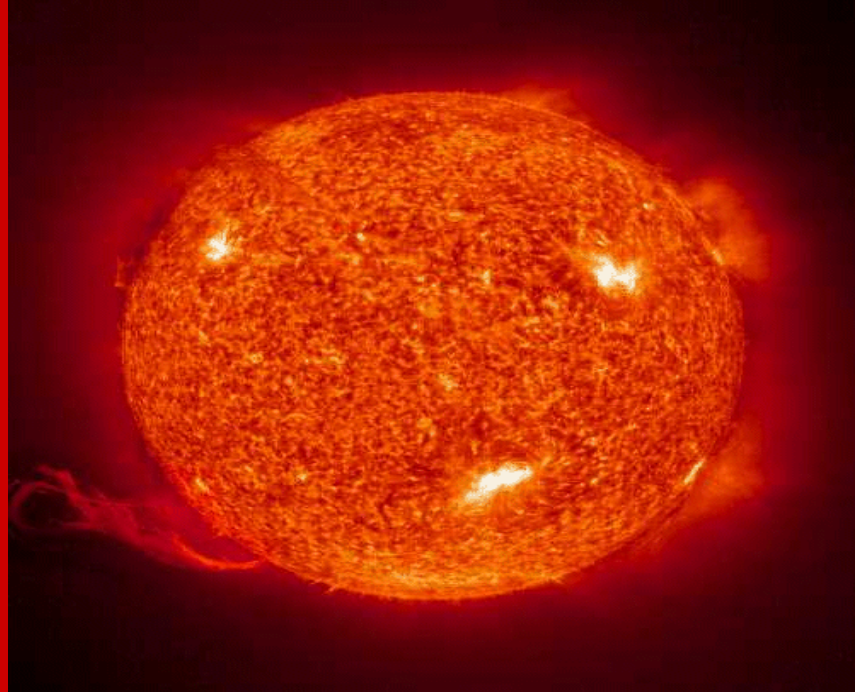
Dal momento che su essa agisce solo la forza di gravitazione e le stelle vicine non influenzano il suo moto rotatorio possiamo considerare il sistema come isolato ed applicare **la legge di conservazione del momento angolare!**

Il momento angolare deve allora ripartirsi, procedendo la contrazione gravitazionale, nel:

- **Momento di rotazione dei pianeti**
- **Momento di rivoluzione dei pianeti**
- **Momento di rotazione del protosole**

Data la grande massa attuale del Sole (99% di quella del Sistema Solare) la massima parte del momento angolare originario dovrebbe ancora oggi risiedere in esso. In questo caso il Sole ruoterebbe molto più velocemente di quanto non faccia oggi, compiendo una rotazione su se stesso in 0.5 giorni invece di 26 giorni.

Il problema del momento angolare



Dal momento che ciò non capita, il periodo di rotazione del Sole è molto lento, 26.5 giorni, bisogna

- ipotizzare un meccanismo di sottrazione del momento angolare del Sole
- oppure supporre che sin dall'inizio della loro nascita i pianeti abbiano avuto un'evoluzione separata da quella del Sole!

Il problema delle età



E' essenziale riuscire a stabilire

- quando si è formato il Sistema Solare e
- quanto è durato il processo di formazione.

Per dare una risposta a queste due domande è necessario introdurre il **metodo di determinazione dell'età** delle rocce terrestri, lunari e, soprattutto, dei meteoriti.

Il metodo di datazione

Il principio che sta alla base della datazione si fonda sul decadimento degli elementi radioattivi contenuti nelle rocce.

Un elemento radioattivo “primario” dissociandosi, dà luogo ad un elemento “secondario” in un intervallo ben preciso secondo la seguente legge:

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

dove :

- d_0 è l'abbondanza iniziale dell'elemento primario d
- p è l'abbondanza iniziale dell'elemento secondario
- t l'intervallo di tempo
- λ 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

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

Reazione di decadimento	Semidurata
$^{87}\text{Rb} \rightarrow ^{87}\text{Sr} + 8 \text{ beta}$	61 miliardi di anni
$^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb} + 8 \text{ He}^4$	4.49 miliardi di anni
$^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb} + 6 \text{ He}^4$	13.9 miliardi di anni
$^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb} + 7 \text{ He}^4$	713 milioni di anni

L'età del Sistema Solare



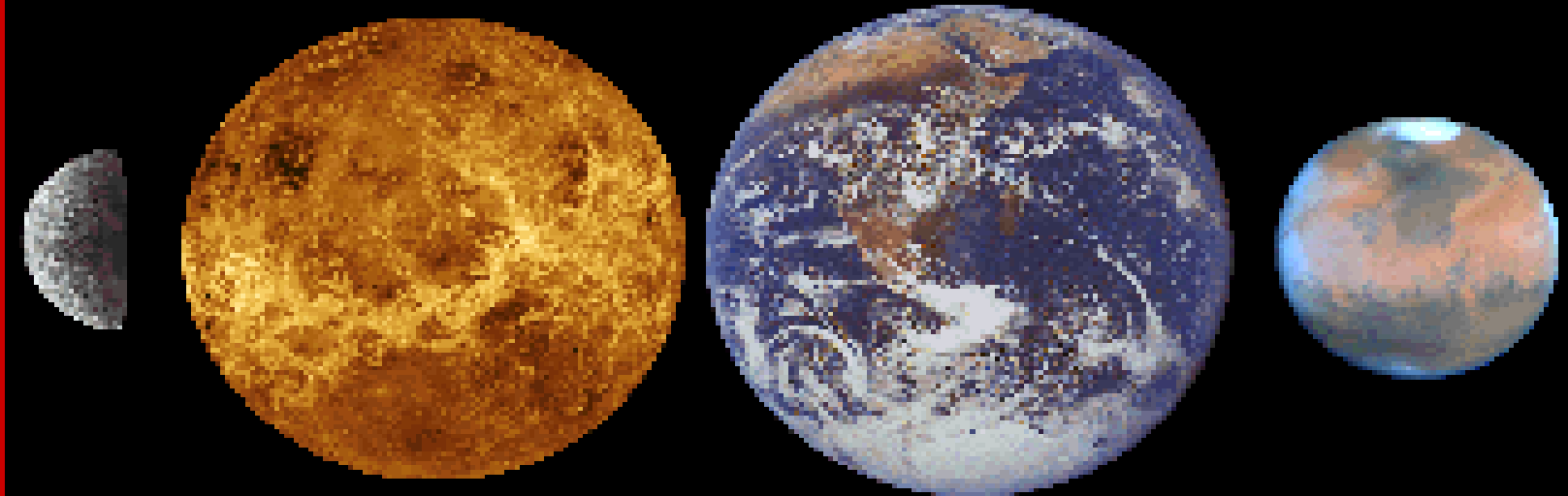
Le misure fatte con questi elementi radioattivi su campioni di meteoriti mostrano che l'età del Sistema Solare è approssimativamente **4.55 miliardi di anni**.

La durata del processo di formazione

Inoltre le misure delle abbondanze del Pu^{244} (Plutonio) e dello I^{129} (Iodio), che hanno dei tempi di decadimento più corti, danno una indicazione relativa al tempo necessario per la condensazione del materiale planetario. Essi mostrano che non sono stati necessari più di 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 più densa e piena di polveri.

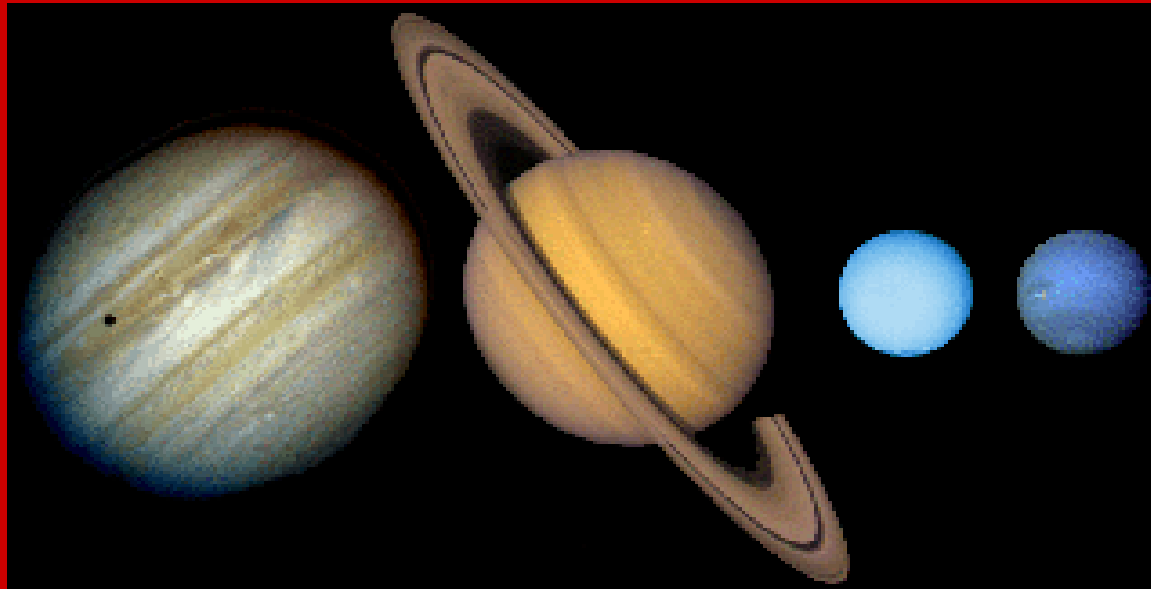
I pianeti interni



I *pianeti interni* più vicini al Sole (quelli "Terrestri") presentano una struttura "rocciosa" **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. Oggi solo la Terra è tettonicamente attiva anche se i gas prodotti dai vulcani formarono le atmosfere di Venere e di Marte.

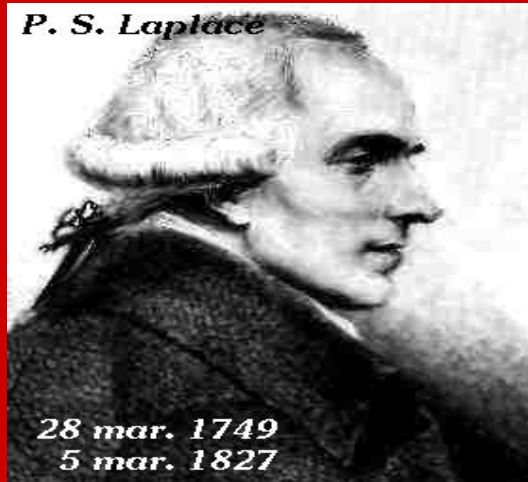
I pianeti esterni



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 calore.

Sviluppi moderni della teoria di Kant Laplace



Pur con i suoi limiti **il modello nebulare è ancor oggi quello più probabile per spiegare la genesi e formazione del Sistema Solare.**

Due sono gli elementi caratteristici di questo processo di formazione:

1.

La formazione del Sole → nascita del “protosole”

2.

La formazione dei pianeti → nascita dei “planetesimi”

Vincoli alla costruzione di un modello di formazione

Nell'ambito della teoria nebulari si ammette che il Sole ed i pianeti si sono formati a partire dallo stesso materiale. Abbiamo già visto che :

1.

La nascita del Sistema Solare risale a 4.55 miliardi di anni fa

2.

Il processo di formazione è stato “breve” ed è durato circa 100 milioni di anni

Dalla nebulosa primordiale è ovvio che si sono formati il Sole ed i pianeti. Non è però di poco conto chiedersi se:

1.

i pianeti si siano formati da materiale interstellare freddo

2.

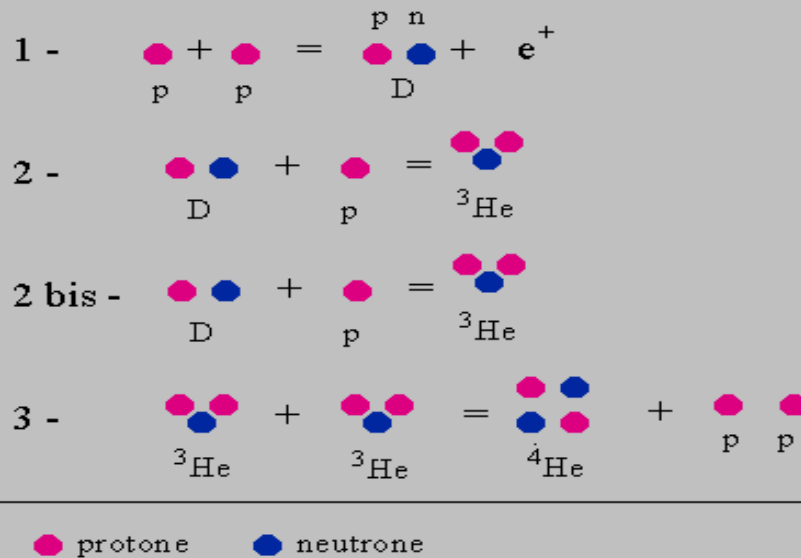
o da materiale solare riprocessato dalle reazioni avvenute nel protosole ?

In altri termini : la formazione del protosole ha preceduto quella dei pianeti ?

Il ciclo Protone-protone

Per capire se Sole e pianeti si sono formati o no dallo stesso materiale consideriamo la formazione del protosole già avvenuta e supponiamo “accese” nel suo interno le reazioni termonucleari, in particolare il ciclo protone protone

Il ciclo protone-protone nell'interno solare



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 (^3He)

2 bis - La reazione (2) deve avvenire due volte perché possa aver luogo la reazione (3)

3 - Nella terza reazione due nuclei di ^3He danno luogo ad un nucleo dell'isotopo 4 dell'elio (^4He) più due protoni, che sono disponibili di nuovo per la reazione (1), donde il nome di *ciclo* al complesso delle reazioni p-p

La misura del rapporto deuterio/idrogeno nei pianeti esterni

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 esso può essere associato all'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 è stato distrutto dentro il Sole appena sono iniziate le reazioni nucleari.

Materiale da cui si sono formati i pianeti

L'abbondanza del deuterio nei pianeti giganti è 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.

La formazione del Sistema Solare



Per costruire una **modello** di formazione del **Sistema Solare** bisogna far riferimento ai processi di formazione stellare a partire dalla materia interstellare.

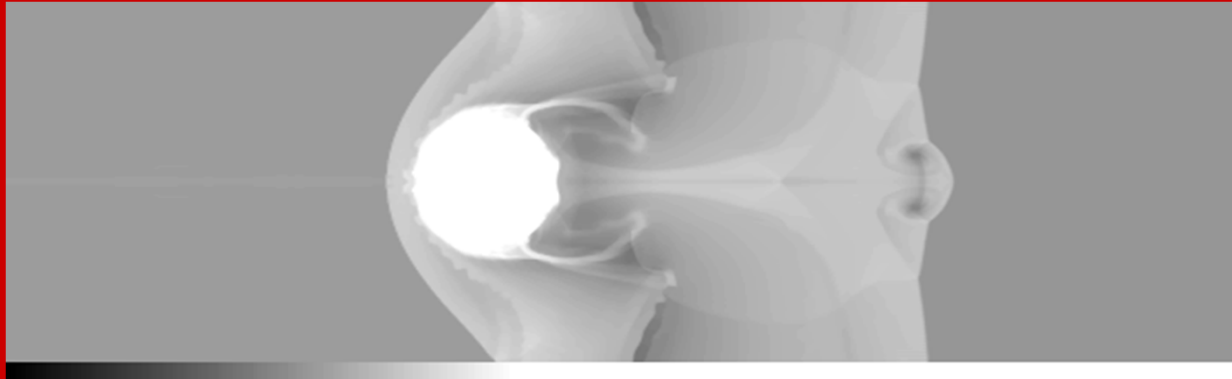
Il contributo dell'evoluzione stellare

Il modello delle nebulosa primitiva va integrato con le informazioni ricavate sui processi di **formazione stellare**.

L'analisi degli elementi e dei rapporti isotopici nei meteoriti è utilizzabile non solo come metodo per determinare le età ma per avere informazioni sul mezzo interstellare prima della formazione.

Infatti 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.

La supernova “vicina”

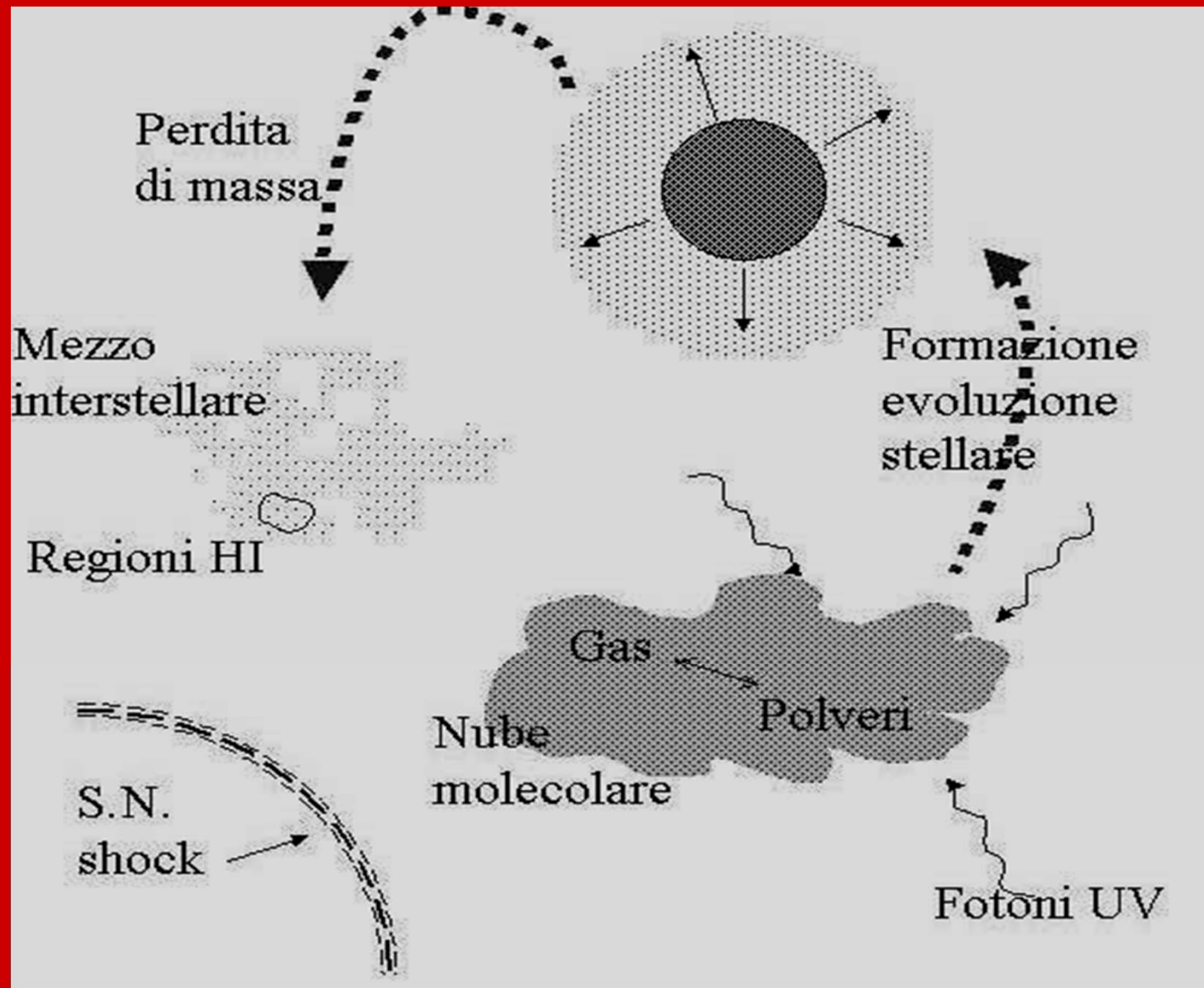


Una onda d'urto, prodotta dall'esplosione di una supernova, può facilitare l'innesco del processo di coalescenza gravitazionale comprimendo le nubi molecolari preesistenti. L'instabilità gravitazionale può avere luogo anche a partire da piccoli frammenti (di circa un centesimo di massa solare) formati da stelle di poche masse solari !

L'origine degli elementi a breve vita radioattiva come ^{26}Al nella nebulosa protosolare appare collegata alla presenza di tali elementi nelle atmosfere delle giganti rosse di circa 1 Ms (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'evoluzione del mezzo interstellare



La nebula in contrazione



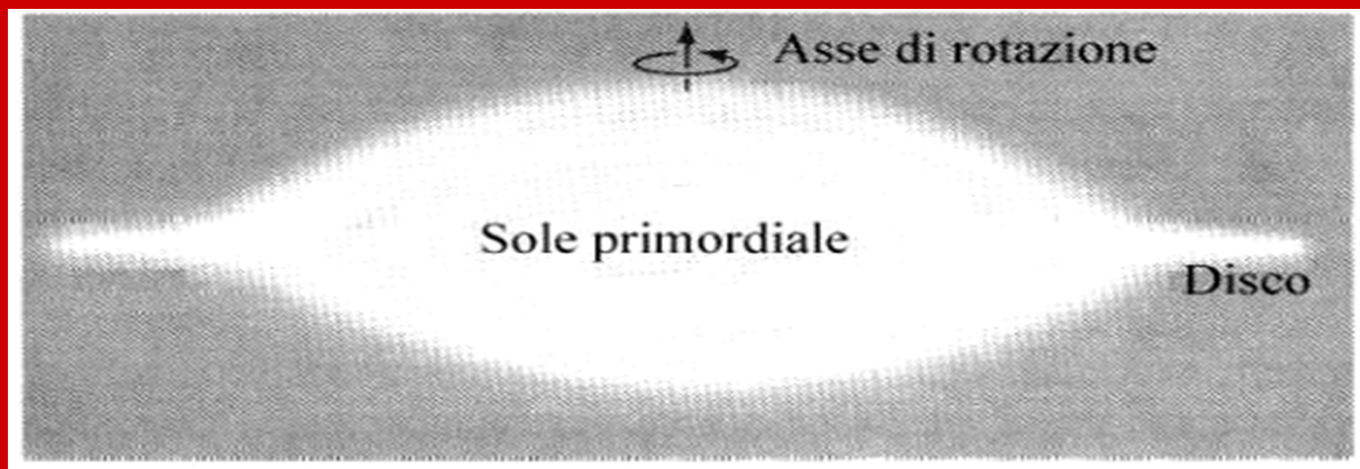
All'interno della **nube molecolare** si forma una nebula in contrazione.

La contrazione gravitazionale provoca un aumento della velocità di rotazione con la formazione di un disco attorno ad una condensazione stellare.

Questo meccanismo è alla base

- Della formazione stellare e conduce alla formazione del protosole
- Della formazione planetaria

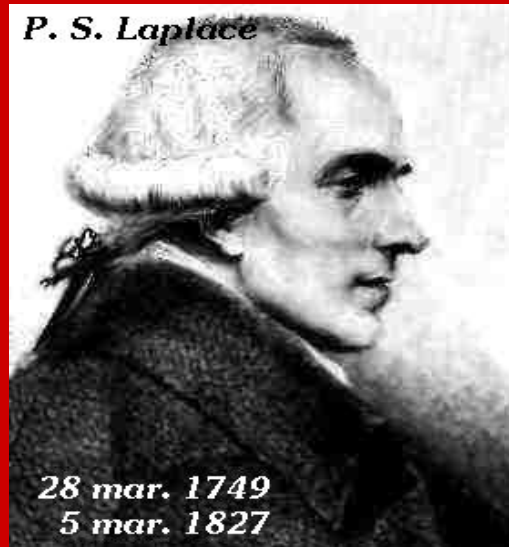
La formazione del protosole



Una volta formatasi, la nebula si contrare nella parte centrale e per effetto dell'aumento della velocità di rotazione, nella zona centrale, e si forma il protosole.

Quando la temperatura, nella zona centrale, raggiunge valori di alcuni milioni di gradi, si innescano le reazioni termonucleari ed il protosole si “accende”.

Sviluppi moderni della teoria di Kant Laplace



La teoria attuale di formazione dei pianeti del Sistema Solare si è sviluppata dalla teoria nebulare di **Kant** e **Laplace** ed è riassunta nel modello della “**nebulosa molecolare primitiva**”.

Sono stati sviluppati un gran numero di modelli, che si richiamano a quelli di **Kant** e **Laplace**, ma tutti si possono raggruppare in due categorie :

- I modelli della nebulosa massiva di **Cameron**
- I modelli della nebulosa a piccola massa di **Safronov** ed **Hayashi**.

Il disco protoplanetario

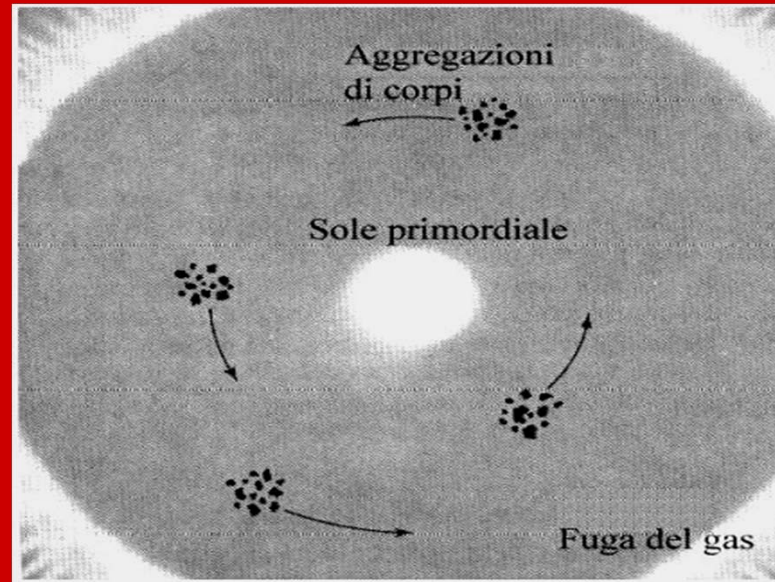


Il problema è capire come si sono formati i pianeti.

Diamo quindi per formato il protosole dalla nebulosa e chiediamoci: come era distribuito il materiale restante attorno al protosole ?

Quella che si ipotizza è una struttura a disco!

Il Modello di Cameron



Questo modello presuppone la presenza disco “viscoso” di circa 1 Ms (massa solare) oltre ad un'altra massa solare per il protosole.

L'85 % della massa iniziale è stata spazzata via dal vento protosolare in un tempo piuttosto breve di circa 100.000 anni.

Ciò malgrado rimane a disposizione un 15% di materiale che andò ad accrescere sul disco verso il protosole.

Il processo di accrescimento produsse instabilità gravitazionali che innescarono direttamente la formazione dei planetesimi.

Il Modello di Safronov ed Hayashi

In base a quest'altro modello si presuppone la presenza di un **disco originario di massa molto più piccola pari a 0.01 Ms**, (fatta salva la massa $\sim 1Ms$ che è andata a formare il protosole!)

Il disco era costituito da gas e polvere.

La polvere, in seguito ad un processo di raffreddamento, andò accumulandosi nel piano centrale formando planetesimi di massa pari a 10^{18} gr.

Dai planetesimi, in seguito alla loro aggregazione, si formarono i pianeti

In questo modello non si ha formazione diretta dei planetesimi ma questa avviene per gradi ed il processo di aggregazione dipende in modo determinante non solo dalla gravità ma anche dai **processi dissipativi (viscosi)** che si sviluppano nel mezzo interplanetario!

Riassunto delle caratteristiche dei due modelli

Con una nebulosa a piccola massa (modello di Safronov-Hayashi)

$$\sim 0.01 M_{\odot}$$

NON si formano i pianeti direttamente da una instabilità gravitazionale ma la loro formazione viene “mediata” dai processi dissipativi che sono legati alla condensazione dei grani dalle polveri della nebula primordiale.

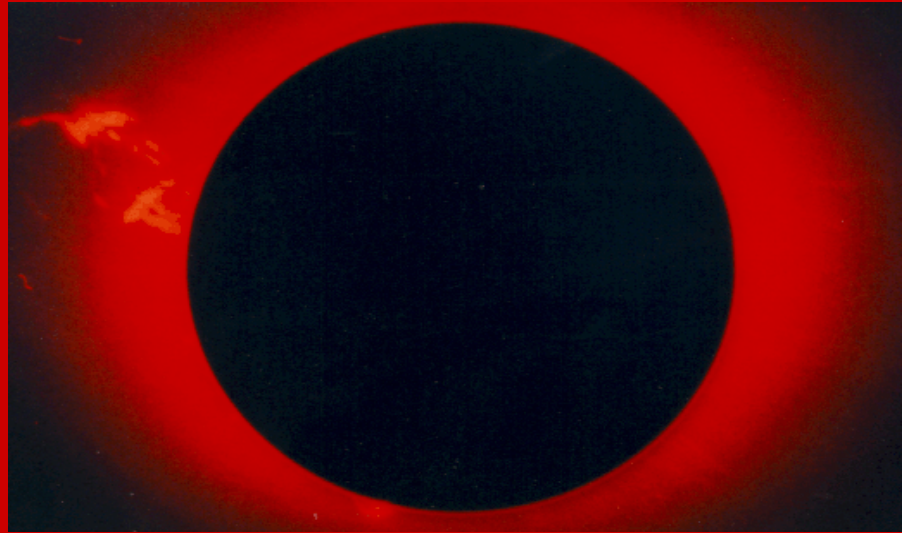
mentre con una nebulosa ad alta massa (modello di Cameron)

$$\sim 1 M_{\odot}$$

è possibile innescare direttamente la formazione dei pianeti. Più alta è la massa a disposizione più facile il collasso gravitazionale.

Se però fino ad $1 M_{\odot}$ il vento protosolare riesce a rimuovere la massa eccessiva per masse più grandi, fino a $100 M_{\odot}$, diventa quasi impossibile farlo.

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** a cui è collegata l'emissione di un forte **flusso di particelle** così come risulta, ora, nel vento solare.

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 del vento solare

L'effetto della **pressione del vento sulle particelle** è quello di agire in modo antagonista all'azione attrattiva della **gravità solare** in modo:

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

E' possibile determinare un valore di distanza r_0 a 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

Parametri e tempi caratteristici

Nebulosa primitiva	La quantità del materiale a disposizione per la formazione planetaria è il 10% di quella totale
Struttura del disco	Il disco è spesso almeno 1/10 delle sue dimensioni lineari che sono almeno di 30 U.A.
Limite di Roche	Per piccola massa non si ha formazione diretta che può avvenire invece per il modello a grande massa è preferito il modello a piccola massa $0.01 M_{\odot}$
Formazione dei grani	In circa un'ora si formano grani grandi 1 micron
Collasso dei grani sul piano equatoriale	I grani si dispongono sul piano equatoriale in circa 100 anni
Formazione dei planetoidi (o planetesimi)	I grani possono formare corpi solidi di alcune centinaia di km in 100 milioni di anni
Il vento solare primordiale	Rimuove particelle e quindi massa dal disco protoplanetario

La risoluzione (?) del 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 $(a/R)^2$.

La risoluzione (?) del problema del momento angolare

Anche se la perdita di massa fosse stata 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 !

Uno schema delle principali fasi di formazione planetaria



La nebula primordiale inizia a risentire del collasso gravitazionale



L'azione della gravità porta alla formazione di un disco protosolare



Le disomogeneità nel disco iniziano a collassare formando strutture più sempre più dense

Uno schema delle principali fasi di formazione planetaria



Si sta formando il protosole

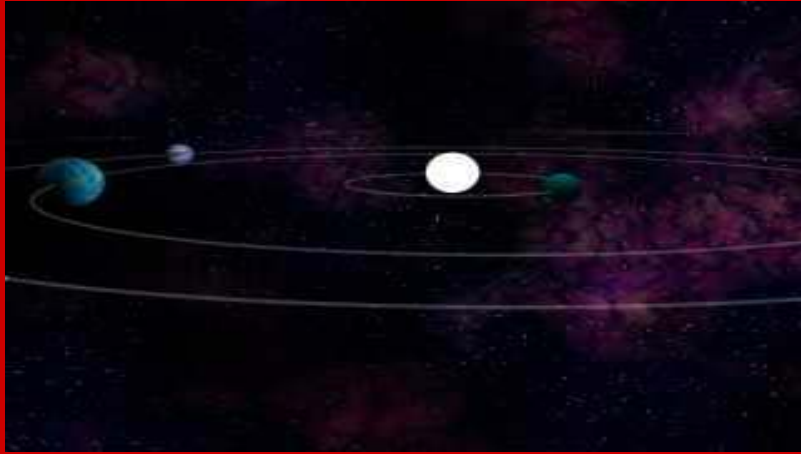


Inizia l'azione di vento stellare da parte del protosole



Il vento protosolare ha ripulito le zone più interne (pianeti terrestri) del disco protoplanetario e confinato il gas nelle regioni più esterne (pianeti giganti)

Uno schema delle principali fasi di formazione planetaria



Si formano i planetesimi che si strutturano nei pianeti esterni ed interni



I pianeti si collocano nelle loro orbite attuali

Bibliografia

- *N. Booth, Il Sistema Solare*, Ed. Zanichelli, (1996).
- *A. Braccesi, G. Caprara, M. Hack, Alla scoperta del Sistema Solare, Ed. Illustrati Mondadori*, (1993).
- *G. Briggs e F. Taylor, Atlante Cambridge dei pianeti*, Ed. Zanichelli, (1997).
- *T. Encrenaz, J.-P. Birbing e M. Blanc, The Solar System*, Ed. Springer, (1995).
- *D.L. Goodstein e J.R. Goodstein, Il moto dei pianeti intorno al Sole: una lezione inedita di R. Feynmann Collana le Ellissi*, Ed. Zanichelli, (1997).
- *K.R. Lang e C.A. Whitney, Vagabondi nello spazio: ricerche e scoperte nel Sistema Solare*, Ed. Zanichelli, (1987).
- *D.H. Menzel e J.M. Pasachoff, Stelle e pianeti*, Ed. Zanichelli, (1990).
- *R. Smoluchowski, Il Sistema Solare*, Ed. Zanichelli, (1989)
- *V. Castellani, Astrofisica stellare*, Ed. Zanichelli, (1985).
- *T. Encrenaz, J.-P. Birbing e M. Blanc, The Solar System*, Ed. Springer, (1995).
- *L. Gratton, Introduzione all'Astrofisica, Volumi I e II*, Ed. Zanichelli, (1982).
- *A. Unsold, Il Nuovo Cosmo*, Ed. Piccin, (1969).

Origine e evoluzione del Sistema solare

Le conferenze della Specola

7-Novembre 2002

La presentazione è terminata

Grazie

Roberto Bedogni

<http://naomi.bo.astro/bedogni>

Osservatorio Astronomico di Bologna

INAF