

Il Sistema Solare – La genesi

R. Bedogni – Osservatorio Astronomico di Bologna



Figura1.jpg

Introduzione.

Il problema riguardante l'origine del Sistema Solare è stato affrontato in modo esauriente solo dopo la rivoluzione copernicana e la definizione del Sistema Eliocentrico.

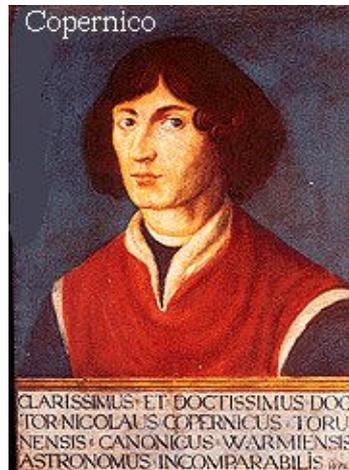


Figura2.jpg

Un riassunto storico delle principali teorie di formazione del Sistema Solare.

I contributi fondamentali di Keplero, Galileo e Newton, nella costruzione dapprima del Sistema Eliocentrico ed, in seguito, dell'interpretazione dei moti dei pianeti nel Sistema Solare alla luce della legge di gravitazione universale, permisero di definire una nuova visione del "mondo" come un sistema completo ed esauriente fondato su fatti fisici e non su presupposti filosofici.

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

- 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

Inoltre verso la fine del XIX^{esimo} 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 XX^{esimo} 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.

Questo insieme di conoscenze portarono a costruire diversi modelli:

- la teoria della formazione “turbolenta”
- la teoria “mareale”
- le teorie di “accrescimento”
- la teoria “nebulare”

I modelli basati sulla "turbolenza".

René Descartes (1596-1650) fu il primo che cercò di dare una spiegazione scientifica dell'esistenza del Sistema Solare e che 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^{esimo} secolo (Von Weizsäcker, ter Haar, Kuiper, Whipple e McCrea).

La teoria “mareale”.

Secondo un'altra interpretazione il materiale utilizzato nella formazione del Sistema Solare era invece stato espulso dal Sole. La teoria mareale venne sviluppata, come teoria catastrofica di formazione del Sistema Solare, dal naturalista Buffon (1707-

1788). In essa si ipotizza 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. La credibilità di questa teoria era legata al fatto che, a quei tempi, la natura delle comete era completamente sconosciuta e che non si avevano criteri attendibili per una stima delle età dei corpi celesti.

Bickerton 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
- e la diversa composizione chimica dei pianeti rispetto al Sole.

Le teorie di "accrescimento".

Queste teorie si basano invece sulla possibilità che il Sole sia riuscito a "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 interpretazione, più moderna del modello di "accrescimento", sostiene che il Sole abbia incontrato, nel suo moto lungo il piano della 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 questa teoria, 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 i pianeti veri e propri!

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 generano, 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^{esimo} secolo ed in particolare quelli riferiti ai moti dei pianeti.

Due importanti obiezioni al modello di Kant e Laplace apparvero all'inizio del XIX^{esimo} 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 !

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 d'evoluzione del disco protoplanetario si suddividono oggi in due categorie:

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

Questo modello presuppone che la formazione sia iniziata da un disco di circa 1 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. Ciò che rimase andò a formare il Sole, mentre i pianeti si sarebbero formati direttamente dalla nebulosa primava in seguito all'innescò 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.

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

Andiamo ad analizzare in dettaglio il meccanismo di formazione del sistema Solare alla luce dei principali dati osservativi. L'efficacia dei modelli di formazione del Sistema Solare risiede essenzialmente nella loro capacità di rispondere a tre domande.

1. Ammesso che il Sole ed i pianeti si siano formati assieme dove e quando ciò è avvenuto ?
2. È avvenuta una formazione differenziata tra pianeti interni e pianeti esterni ?

3. Il Sistema Solare si è formato da materiale interstellare freddo o da materiale solare riprocessato dalle reazioni termonucleari avvenute nel suo interno ?

A queste tre domande le evidenze osservative permettono di dare una risposta esauriente con un buon grado d'accuratezza. Per dare una "sostanza" quantitativa oltre che qualitativa alle premesse fisiche dei modelli di formazione, è necessario a questo punto affrontare:

- il problema dell'età delle rocce terrestri, lunari e dei meteoriti, che pongono dei vincoli oggettivi ai tempi in gioco nei modelli di formazione
- la misura del rapporto Deuterio/Idrogeno nei pianeti esterni (Giove, Saturno, etc.) che ci illumina sulla composizione della nebulosa primordiale
- ed indagare su come avviene la formazione stellare nella nostra galassia

La datazione delle rocce terrestri, lunari e dei meteoriti e l'età del Sistema Solare

Il principio 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 legge del tipo:

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

dove :

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

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

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

Al fine di determinare 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} (Kriptone), Ar^{40} (Argone) 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

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.

Inoltre le misure delle abbondanze del Pu^{244} (Plutonio), e dello I^{129} (Iodio) che hanno dei tempi di decadimento più corti, danno un'indicazione relativa al tempo della 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 d'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 siano formati contemporaneamente, durante il passaggio in una parte della Galassia particolarmente densa e ricca di polveri.

La misura del rapporto Deuterio/Idrogeno nei pianeti giganti

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

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. Un'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 strettamente 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 !

Inoltre l'origine degli elementi a breve vita radioattiva come Al^{26} 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 !

Andiamo ora a considerare in dettaglio, nell'ambito della teoria nebulare "moderna" di Kant e Laplace, le singole fasi del processo di formazione.

Le fasi della formazione del Sistema Solare-una possibile sequenza di eventi

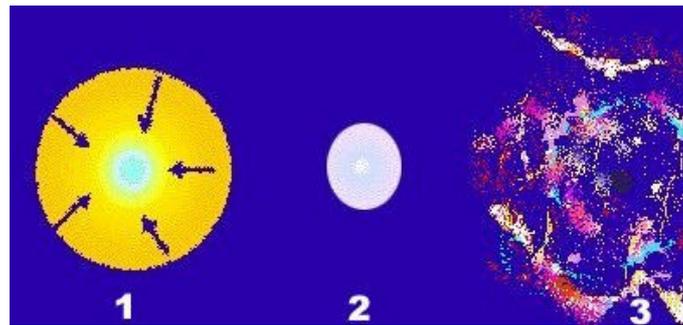


Figura3.jpg (Una schematizzazione della sequenza di condensazione)

1) L'instabilità gravitazionale

Ipotizziamo una sfera di gas con raggio $R = 10000 R_S$ (Raggio solare) che corrisponde all'orbita di Plutone e densità media $\rho \cong 10^{-12} \rho_S$ (Densità solare) (analoga alla densità nella cromosfera solare che consiste principalmente di idrogeno molecolare H_2 e polvere). Per un corpo in equilibrio si ha :

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

dove

- Ω = 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 dissociazione dell'idrogeno molecolare H_2 . Il coefficiente di compressione adiabatica:

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

decrece.

Quando γ 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 ad un raggio $R = 100 R_S$ dopo un periodo di 100 anni circa !

2) La massa coinvolta nella contrazione

In base alla legge di conservazione del momento angolare

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

dove:

- G = costante di gravitazione universale
- M = massa della nube
- R = raggio della nube
- Ω = 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, e che rimane a disposizione per la formazione dei pianeti, è pari al 10 % di quella totale.

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

$$6 \cdot 10^{-6} M_S$$

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 :

$$6 \cdot 10^{-4} M_S$$

Il contributo dei **pianeti esterni** va ulteriormente aggiunto al valore precedente ed è pari a : $2 \cdot 10^{-3} M_S$

Il valore complessivo della massa, coinvolta nella formazione dei pianeti sia interni che esterni, sale a: $3 \cdot 10^{-3} M_S$

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

3) Il disco protoplanetario

Il disco protoplanetario ha:

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

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

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

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

Dove :

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

cioè : $h_{\text{disco}} \cong 0.7 \text{ UA}$

4) 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 :

$$a_R/R_S = 2.5 (\rho_s/\rho_g)^{1/3}$$

dove ρ_s = densità media del Sole, ρ_g = densità media del gas nel disco ed 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 $\cong 10$ volte la densità superficiale ρ_g . Questo ci permette di affermare che :

- con una nebulosa a piccola massa $\cong 0.01 M_S$ *NON si formano i pianeti direttamente da un' instabilità gravitazionale*
- mentre con una nebulosa ad alta massa $\cong 100 M_S$ è *possibile innescare la formazione dei pianeti.*

Se vale il modello di un nebulosa primordiale ad alta massa, rimane tuttavia, la necessità di eliminare tutta la massa non direttamente utilizzata nella formazione del Sistema Solare (si veda, più avanti, come possa avvenire la rimozione di questa massa eccedente a causa del vento stellare del Proteosole).

5) 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

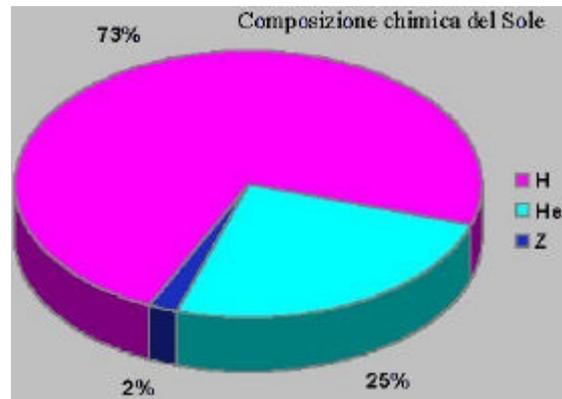


Figura4.jpg:

è possibile ricostruire la sequenza di condensazione.

6) 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**
- **in seguito, quando le temperature si abbassano sino a valori 200-300 ° K (gradi Kelvin), anche H,O, C ed N si condensano.**

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

Va tuttavia notato che la sequenza dipende strettamente dal 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 !

7) La crescita dei grani per condensazione

Per dare un'idea della velocità con cui accrescono i grani per condensazione assumiamo che:

- ogni collisione tra una molecola ed un grano produce un "incollamento" della molecola al grano stesso (Grossman (1970) e Larimer (1975)) !

Se la massa dei grani è definita come

$$m \cong \rho_p r^3$$

dove

- r è il raggio dei grani

- ρ_p la densità dei grani = 1 gr/cm^3

ecco che il ritmo ai cui i grani accrescono è dato dalla equazione :

$$dr/dt = \rho_g \alpha C / \rho_p A^{1/2}$$

• dove :

- ρ_g = densità del gas = 10^{-10} gr/cm^3
- C è la velocità del suono del gas $\cong 1 \text{ km/s}$
- $\alpha = 0.01$ è il rapporto tra materiale condensato e gas
- A la massa molecolare $\cong 20$

Ne risulta un valore $dr/dt = 10^{-8} \text{ cm/s}$ cioè, tradotto in termini più semplici, un accrescimento dei grani di 1 cm all'anno !

Questo meccanismo si dimostra molto efficace e rapido e permette ai grani di un micron di formarsi rapidamente e crescere ulteriormente.

8) 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 viscoso otteniamo un tempo caratteristico perché esse raggiungano il piano equatoriale dato da:

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

dove :

- ρ_g = densità del gas = 10^{-10} gr/cm^3
- ρ_p = densità dei grani = 1 gr/cm^3
- C è la velocità del suono del gas $\cong 1 \text{ km/s}$
- Ω è la velocità di rotazione pari a $10^{-8} / \text{s}$
- r = spessore dei grani = $1 - 3 \text{ cm}$

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 raggiunge, in pochi intervalli di tempo, le dimensioni dei corpi stessi.

9) La formazione dei pianeti per accrescimento

Le collisioni inelastiche nel piano equatoriale determinano poi un'accelerazione nella crescita dei **planetoidi**. A partire da dimensioni di 1 cm, essi acquisiscono massa per accrescimento in seguito a reciproche collisioni.

Sia m la massa del corpo ed r il suo raggio, il ritmo di crescita può essere espresso dall'equazione:

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

dove:

- ρ_0 = densità delle particelle all'orbita del corpo nel piano equatoriale
- πr^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, **alla distanza di 1 Unità Astronomica (U.A.) 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
- Δ = densità del corpo (che si assume costante)
- $\theta = G m / r V^2$ con valori da 3 a 7
- σ_0 = densità superficiale della nube

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

Riassumiamo a questo punto i processi essenziali :

1. **il processo di condensazione ha permesso ai grani di crescere sino alle dimensioni di qualche micron**
2. **il processo di "attrazione gravitazionale" ha portato alla formazione dei pianeti attuali a partire da "corpi solidi" di dimensioni di qualche centimetro passando attraverso la formazione dei "planetoidi".**
3. **la formazione dei "planetoidi" è stata spiegata da Safronov in seguito ai processi di collisione "inelastica" che hanno determinato, invece della loro distruzione, l'incollamento dei grani in strutture di dimensioni sempre più**

grandi.

10) L'effetto del vento solare

Per analogia con quanto osservato nelle stelle giovani, assumiamo che il Sole, nella prima fase della sua esistenza manifesti un'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 mentre all'origine del Sistema Solare era pari, al più, a 10 cm. Si può dedurre da quest'ultimo valore, il fatto che il *vento solare primordiale* era sufficientemente intenso per spazzare via le particelle di dimensioni minori del cm.

La legge (o relazione) di Titius-Bode

Conclusa la descrizione delle principali fasi della formazione del Sistema Solare, torniamo al contesto generale in particolare alla "*legge di Titius-Bode*". In questo modo viene, e veniva, indicata una relazione empirica riguardante che le distanze medie dei pianeti dal Sole espresse 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 essa, 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. 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%.

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%.

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 vi si applica, nonostante che si possano 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

Rimane da affrontare, e risolvere, il problema del momento angolare, accennato sin nelle prime pagine di quest'esposizione. Nella risoluzione del problema sembrano 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 M_S 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 un'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.

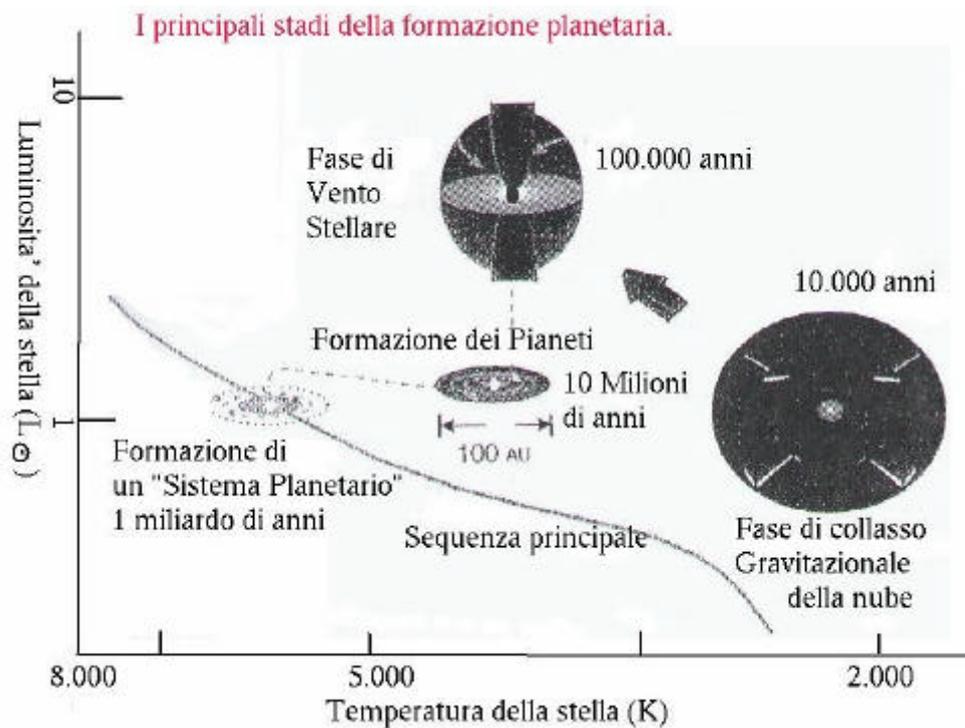


Figura5.jpg

Nell'immagine vengono riassunte le principali fasi della formazione planetaria.

Lo stato corrente della nostra conoscenza dell'origine del Sistema Solare

Sebbene nessun scenario sia oggi universalmente accettato ci sono numerosi punti di consenso ed accordo riguardanti l'origine e la formazione del Sistema Solare.

1. I modelli più credibili sono quelli che derivano da 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 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, e la conseguente "sottrazione" di momento angolare, 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 di 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.

Bibliografia

Bibliografia introduttiva e divulgativa

Il Sistema Solare

- **B. Bertotti**, *L'esplorazione del sistema di Saturno*, Le Scienze, nr. **334**, (giugno 1996).
- **N. Booth**, *Il Sistema Solare*, Ed. Zanichelli, (1996).
- **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).

Il Sole

- **P. Kennet**, *Guide to the Sun*, Ed. Cambridge University Press, (1992).

- **E. Nesme-Ribes, S.L. Baliunas e D. Sokoloff**, *La dinamo stellare*, Le Scienze, nr. **338**, (ottobre 1996).