



# LA NASCITA DELLE STELLE di L. Malentacchi



Stellar Nursery in M17  
(NTT+SOFI)

ESO PR Photo 24a/00 (14 September 2000)

© European Southern Observatory





## INDICE

1	Premessa.....	3
2	Introduzione.....	3
3	Ecosistema .....	3
4	Definizione di stella.....	4
5	Attori che determinano la nascita di una stella .....	5
5.1	Forza gravitazionale.....	5
5.2	Forza Pressione Ec.....	6
5.2.1	Termodinamica.....	6
5.2.2	Turbolenza .....	7
5.2.3	Componente angolare .....	8
5.2.4	Componente magnetica.....	8
5.3	Forza di Hubble .....	8
5.4	Forza debole.....	9
6	Ecosistema primordiale.....	10
6.1	Instabilità primordiale .....	12
7	Le popolazioni stellari.....	13
8	Ecosistema attuale .....	14
9	Il Collasso della nube.....	15
9.1	Onde d'urto di materia .....	15
9.2	Onde di marea.....	16
10	Nasce una stella.....	16
10.1	Complessi Giganti di Nubi Molecolari.....	17
10.2	Nuclei densi.....	17
10.3	Frammentazione gerarchica .....	18
10.4	Protostella.....	18
10.5	Fusione del deuterio .....	20
10.5.1	La trasmissione del calore .....	21
10.6	Nascita della protostella.....	22
10.7	Preseguenza principale .....	22
10.8	Tracce di Hayashi.....	22
10.8.1	Curva della nascita.....	23
10.8.2	Flure-up .....	23
10.9	Nascita della stella .....	24
10.10	Vento solare .....	24
11	Formazione dei pianeti.....	25
12	Classificazione delle stelle in formazione.....	26
12.1	Classificazione per massa.....	27
12.1.1	T Tauri.....	27
12.1.2	Fu Orionis .....	27
12.1.3	Herbig Haro.....	28
12.2	Classificazione per Spettro.....	28
12.2.1	Classe 0.....	30
12.2.2	Classe I.....	30
12.2.3	Classe II.....	30
12.2.4	Classe III.....	31
13	Varie.....	31
13.1	Jet.....	31
13.2	Maser.....	32



## 1 Premessa

Presso il gruppo astrofili SAF sono stati costituiti dei gruppi di studio con lo scopo di approfondire varie tematiche scientifiche, in particolare dell'astronomia. Nel 2002, si è costituito un gruppo con lo pseudonimo di EVOS che ha il compito di analizzare il ciclo di vita delle stelle (nascita, vita, e morte), il nome appunto deriva dall'abbreviazione di EVoluzione delle Stelle. Attualmente EVOS sta analizzando solo la prima parte della vita di una stella: la nascita. Da questa analisi è scaturita una conferenza di cui questa relazione è il riassunto. Ringrazio pertanto il gruppo di studio per aver partecipato alla ricerca delle informazioni necessarie alla realizzazione di detta conferenza. Per preparare il documento si è preso spunto da internet e riviste scientifiche. Per chi rilevasse degli errori, o volesse aggiungere delle informazioni, o volesse scambiare qualche opinione, può scrivere al coordinatore del gruppo [Leonardo377@supereva.it](mailto:Leonardo377@supereva.it).

## 2 Introduzione

Pur essendo la nascita delle stelle studiata da molti anni (secoli), gli sviluppi teorici più importanti si sono avuti solo recentemente. I modelli di stelle in formazione con miglior dettaglio sono stelle con massa simile al sole, mentre, altri tipi di stelle sono conosciuti in proporzione minore. Non solo le stelle in fase di nascita, ma tutta l'astronomia è una scienza d'osservazione, fondamentale è l'uso dei telescopi. Migliori sono le loro caratteristiche e maggiore è il dettaglio che si può osservare. Si conoscono meglio le stelle in formazione con valore di massa del sole, perché sono quelle più vicino al nostro sistema; per poter osservare stelle di altro valore di massa ci dobbiamo spingere ad osservare a distanze più elevate, dove i telescopi vedono sempre con minor dettaglio. L'analisi delle stelle in formazione dipende dunque dalla tecnologia dei telescopi, via via che ne vengono introdotti di nuovi, possiamo osservare dettagli sempre più piccoli. Recentemente hanno fatto l'ingresso nuovi telescopi, addirittura più potenti del telescopio spaziale di Hubble, ed il trend attualmente è in continua crescita, pertanto ci aspettiamo l'osservazione delle prime fasi di formazione di una stella con dettagli sempre più elevati, delle conferme o rielaborazioni delle teorie esistenti, l'individuazione di fenomeni nuovi. La nascita delle stelle si dimostra una scienza ancora giovane, e possiamo già immaginarci che fra qualche decennio ciò che sto per dirvi potrebbe essere sostituito da nuove migliori teorie.

## 3 Ecosistema

Le stelle nell'universo rivestono un'importanza non irrilevante, la maggior parte dei corpi celesti che possiamo osservare sono stelle, la nostra galassia "La Via Lattea", per esempio, ne può contenere all'incirca 200-300 miliardi, e di galassie se ne possono stimare all'incirca 100 miliardi. Sono due stime, due numeri, che possono non essere precisi, ma che rendono l'idea di quanto sia impressionante il numero di stelle nell'universo. Si raggiunge per l'universo causale (osservativo) un numero intorno alle  $10^{22}$  stelle. Qualcuno ha ipotizzato che questo numero sia appena superiore ai granelli di sabbia di tutte le spiagge presenti sulla terra. L'universo può essere considerato un enorme ecosistema, paragonabile a quello terrestre. Mentre l'ecosistema della terra determina l'evoluzione degli esseri viventi, l'ecosistema dell'universo determina l'evoluzione dei corpi celesti. Le stelle, come l'uomo, vengono ad essere gli attori principali, entrambi sono in grado di modificare l'ecosistema che li ospita. O almeno, questo è quello che pensiamo, dato che la materia di cui sono fatte le stelle, la materia barionica, si è riscontrata essere in minoranza rispetto alla materia oscura



esotica. Inoltre recentemente si è scoperto che nell'universo vi è una forma di materia, sotto forma di energia, energia oscura che la farebbe da padrone su tutte. Pertanto le stelle essendo la minoranza, in realtà non sono poi così l'attore principale dell'universo. E dato che ho giocato sulla similitudine con l'uomo, chissà se non vi siano degli essere oscuri che come per le stelle ci scalzano dal nostro piedistallo. In realtà questi oggi si sarebbero già osservati: i Batteri e i Virus. Per un uomo, le stelle possono essere considerate immutabili: confrontando il cielo da quando nasce a quando morirà, per un tempo medio di 74 anni, rileverebbe ben poche differenze. Le stelle le troverà nella stessa posizione, la luminosità non sarà variata, salvo qualche eccezione non sarà cambiato nulla. Per questo l'uomo potrebbe essere motivato a pensare che le stelle non abbiano una loro storia, ma che siano oggetti fissi posti sulla volta celeste. In realtà anche le stelle hanno un loro ciclo di vita, sono paragonabili ad un essere vivente, variano durante il corso della loro vita. A parte qualche raro fenomeno, i loro ritmi, le loro variazioni sono così lente, milioni miliardi di anni, che non sono confrontabili con quelli umani. La forza che le governa è quella gravitazionale, il processo di fotosintesi gli permette di essere sempre in forma e l'energia che le tiene in vita deriva dalla forza debole, quella nucleare della fusione. A dimostrazione che possono essere paragonate ad un essere vivente, come un essere umano, le stelle possono essere partorite da altre stelle. La gestazione può essere indotta dal materiale espulso da una supernova, che investendo una nube vicino può causare l'innescamento della nascita di una stella. Il materiale culla e nutre la nuova stella determinandone le caratteristiche future. Le stelle presentano una infanzia, un periodo di apprendimento, di crescita, che successivamente analizzeremo, che le porteranno verso una maturità una stabilità che durerà miliardi di anni. Presentano una loro socialità complessa, nascono in gruppo per poi disperdersi. Ma nel frattempo hanno potuto conoscersi e molte hanno deciso di unirsi in matrimonio, infatti ben il 50% delle stelle sono binarie, e alcune stelle socializzano così tanto da non disdegnare di farsi un harem, infatti si conoscono sistemi di stelle fino a 6 componenti. Possiedono un carattere, possono essere instabili, variano il loro umore manifestandolo con una variazione di luminosità. Ne possiamo trovare di tutte le razze: piccole medie grandi, di tipo spettrale e di vari nomi, nane brune, nane rosse, nane bianche, giganti rosse, stelle di neutroni, pulsar etc. In questa relazione comunque cercherò di approfondire alcuni aspetti di questo essere vivente: la sua nascita, la sua formazione, come l'ecosistema dell'universo ha permesso e permette la sua esistenza le sue caratteristiche. L'uomo come tutti gli animali del pianeta terra, deve molto alle stelle, per proseguire con i paragoni naturalistici; come un parassita si ciba della loro energia che esse generosamente hanno voluto dividere con tutti gli esseri dello spazio.

#### **4 Definizione di stella**

Per capire di cosa si sta parlando, occorre definire cosa sia una stella. In molti testi si definisce per stella un corpo celeste dotato di luce propria. Ma questa definizione da sola non è sufficiente, dato che anche il pianeta Giove oltre a riflettere la luce del sole ne emette una sua, e pertanto potremmo essere indotti a pensare che sia una stella a sua volta. Più esattamente si intende per stella una sfera di gas rotante in equilibrio tra la pressione gravitazionale che tende a comprimere il corpo celeste e la pressione della temperatura dovuta ai processi termonucleari che tendono ad espanderla. Ovvero abbiamo a che fare con una stella quando al suo interno sono avviati i processi di fusione nucleare. Ma per poter avviare tali reazioni, si devono realizzare delle condizioni di pressione e temperatura particolari che avvengono quando un corpo celeste ha accumulato una massa superiore a circa  $0.08 M_{\odot}$  (massa solare). Se non riuscirà a superare questo valore di massa sarà considerato una stella mancata, una nana bruna ( $0.01 < \text{nana bruna} < 0.08 M_{\odot}$ ). Le masse stellari variano in un intervallo





di massa compreso fra  $0,08$  e circa  $40M_{\odot}$ . La vita di una stella è legata al valore della sua massa, al limite dal considerarla una stella ( $0,08 M_{\odot}$ ), il rendimento della fusione nucleare è molto basso, brucerà il combustibile molto lentamente. Via via che la massa è più alta le condizioni interne di pressione e temperatura fanno sì che la fusione nucleare avvenga con velocità sempre più elevate. Il rendimento delle reazioni nucleari è così elevato per stelle con massa superiori a  $10 M_{\odot}$  che evolverà rapidamente terminando il suo ciclo di vita in poco meno di 1 milione di anni. Certo, rispetto al nostro tempo di vita è sempre un'enormità, ma rispetto all'età raggiunta per stelle al limite della loro formazione diviene una quantità ridicola. Le stelle di  $0,08 M_{\odot}$  dureranno circa 10.000 volte di più di quanto possa vivere il nostro sole, e cioè per ben 100 miliardi di anni, guadagnandosi il titolo di stelle più longeve dell'universo. Ma dato che l'universo ad oggi non ha più di 15 miliardi di anni, per queste stelle è passato solo poche frazioni della loro possibilità di vita e pertanto sono ancora relegate allo loro prima infanzia e cioè si possono considerare appena nate. Paragonandole con il tempo di vita umano oggi si troverebbero solo al 3° giorno di vita.

## **5 Attori che determinano la nascita di una stella**

Perché una stella si formi, un corpo celeste ha bisogno di raccogliere il materiale interstellare. Le forze della natura che permettono questa aggregazione, che guidano le caratteristiche della nascita di una stella sono le seguenti:

- a. Forza Gravitazionale
- b. Forza di pressione dovuta all'Ec (Energia Cinetica)
- c. Forza di Hubble
- d. Forza debole

### **5.1 Forza gravitazionale**

La forza gravitazionale è una delle 4 forze presenti in natura, ed è l'ultima per intensità. Ma pur essendo la più debole è quella che determina l'universo dal punto di vista cosmologico. Le altre 3 forze in un modo o nell'altro non agiscono o sono trascurabili per dimensioni superiori a quelle umane. La forza gravitazionale è l'unica a possedere 3 qualità:

- 1) E' universale. Tutte le particelle presenti nell'universo, ad oggi conosciute, sono soggette e pertanto interagiscono tramite la forza gravitazionale.
- 2) E' sempre attrattiva. Prese due particelle qualsiasi tenderanno ad avvicinarsi e pertanto ad attrarsi vicendevolmente.
- 3) A raggio d'azione infinito. Le due particelle poste all'infinito prima o poi risentiranno della reciproca attrazione e pertanto si avvicineranno.

Date queste caratteristiche, si evince che la forza gravitazionale è una forza che tende ad aggregare, ad avvicinare la materia. E' la responsabile principale del collasso di una zona dell'universo nella formazione delle stelle. La forza gravitazionale è l'attore principale che segue in tutte le fasi l'evoluzione di una stella dal collasso alla morte. Per determinare le caratteristiche di ogni stella dovremo sempre valutare la sua forza. Tutte le altre forze sono contrarie alla forza gravitazionale, ovvero tendono ad allontanare la materia, o in gergo termodinamico, tendono ad entropizzare, a uniformare l'universo. Potremo rappresentare l'universo come un'enorme arena dove avvengono continue battaglie tra la forza gravitazionale e le altre forze in gioco. Ma ad oggi, dopo 15 miliardi di anni, l'universo che osserviamo è strutturato e pertanto la forza gravitazionale al momento ha vinto. Il cosmo ci appare così organizzato che geometricamente viene paragonato ad un frattale.



Ovvero se osserviamo il cosmo a diversi valori scala dimensionali ci appare autosimile, cioè la materia si dispone si organizza pressa poco allo stesso modo.

## 5.2 Forza Pressione Ec

La forza di pressione è causata dall'Energia Cinetica posseduta dalle varie componenti del cosmo. Questa energia tende ad opporsi alla forza gravitazionale espandendo una qualsiasi zona dell'universo. Maggiore è l'Ec posseduta e maggiore è la forza di pressione di espansione che ne consegue. Vi sono varie componenti che contribuiscono ad aumentare l'energia cinetica dei corpi al fine di opporsi alla forza gravitazionale:

- I. Termodinamica
- II. Turbolenza
- III. Rotazione
- IV. Magnetica

### 5.2.1 Termodinamica

L'azione dell'energia cinetica è trattata dalla termodinamica. La temperatura di un corpo è rappresentabile con l'agitazione termica delle componenti della materia. Maggiore è la temperatura maggiore è l'agitazione degli atomi. Gli atomi, benché intrappolati in una struttura cristallina, conservano un'energia di movimento ( $E_c$ ) che li costringe a continui urti con gli atomi adiacenti. Maggiore è la temperatura e maggiore è l'energia posseduta dagli atomi. Sgomitando più forte, cercano in qualche modo di farsi spazio, ed è per tale motivo che un gas tende ad espandersi se riscaldato ed a comprimersi se raffreddato. Una zona dell'universo può collassare, aggregarsi solo se la sua autogravità è superiore a tale pressione termica. Questo aspetto è stato trattato da Jeans che, basandosi solo sul confronto tra forza gravitazionale e temperatura, ha determinato quale sia la massa, a parità di densità, necessaria alla forza gravitazionale per vincere contro l'Ec dovuta alla temperatura. Semplicemente eguagliando l'energia gravitazionale all'energia cinetica si è ricavato il valore di una massa critica, chiamata massa di Jeans. Se consideriamo una nube di gas perfettamente sferica ed uniforme di raggio R abbiamo che:

L'energia termica è data come  $K = 3/2 k T M / \mu m_p$

L'energia gravitazionale è data come  $\Omega = GM^2 / R$

Dove per

K	Costante di Boltzmann	$1,38 \cdot 10^{-16}$	erg/K
T	Temperatura della nube in Kelvin (K)		
M	Massa della nube		
$\mu$	peso molecolare (Rapporto tra il peso della molecola e 1/12 dell'isotopo 12 del Carbonio) (Tiene conto del numero dei componenti. L'idrogeno ionizzato presenta $\mu = 0.5$ )		
$m_p$	massa di un protone	$1,67 \cdot 10^{-27}$	Kg
G	Costante gravitazionale	$6,673 \cdot 10^{-11}$	$m^3 / (kg s^2)$
R	Raggio della nube.		
$\rho$	densità = $M / V$		

Perché si abbia un perfetto equilibrio tra forza gravitazionale e pressione termica K e  $\Omega$  devono essere uguali:

$$K = 3/2 k T M / \mu m_p = \Omega = GM^2 / R$$

Se ci ricaviamo la massa da tale equivalenza abbiamo la massa di Jeans



$$M_J = [3/2 kT / (Gm_p)]^{3/2} (4/3 \rho r)^{-1/2}$$

Perché inizi il collasso pertanto si deve poter avere a disposizione una massa superiore alla massa di Jeans:

$$M > M_J$$

Se aumentiamo la densità di 100 volte la massa critica cala di 10 volte.

Se aumentiamo la temperatura di 100 volte la massa critica sale di 1000 volte.

Nelle varie zone dell'universo si riscontrano diversi valori di massa al fine di innescare un collasso gravitazionale.

MASSA DI JEANS "M <sub>J</sub> "						
Regione	Temp (K)	n (cm <sup>-3</sup> )	μ	M <sub>J</sub> (M <sub>☉</sub> )	R <sub>J</sub> (al)	t <sub>din</sub> (yr)
Regione HII	10 <sup>4</sup>	10 <sup>-10</sup>	0.5	20.000.000	11.000	2.3 10 <sup>8</sup>
Regione HI	10 <sup>2</sup>	10	1	5000	55	1.6 10 <sup>7</sup>
Nube molecolare	10	10 <sup>3</sup>	2	4	0,87	1.2 10 <sup>6</sup>

Per :

Temp Temperatura

n la densità di particelle.

M<sub>J</sub> Massa di Jeans

M<sub>☉</sub> Massa del sole

R<sub>J</sub> Raggio di Jeans

al anni luce (9.46052584624 \* 10<sup>12</sup> Km)

T<sub>din</sub> Tempo dinamico di collasso

yr anni (year)

Come si può facilmente riscontrare le zone a maggior probabilità di formazione di stelle sono le nubi molecolari. L'analisi di Jeans ci suggerisce che in tali zone è sufficiente trovare 4 M<sub>☉</sub> per poter formare le stelle, ma in realtà per quanto riguarda la nostra galassia, la Via Lattea, si osserva che se tali nubi non concentrano almeno 1000 M<sub>☉</sub> non inizia il collasso. Pertanto l'analisi di Jeans apparentemente sembra non tornare. La soluzione è, e rappresentò la dimostrazione, che l'energia cinetica, non dipende solo dalla temperatura ma anche da altri componenti di cui dovremo tener conto. Tutte le cause insieme, introdotte nella formula di Jeans ci daranno la massa critica richiesta.

### 5.2.2 Turbolenza

Ritenuta la causa principale all'opposizione del collasso della nube. La turbolenza a grande scala è un moto caotico, ma a piccola scala è Ec organizzata. L'Ec della temperatura non produce movimento, un tavolo per esempio benché gli atomi si urtino continuamente, è fermo e non si muove, la situazione non cambia neanche se lo scaldiamo, invece nella turbolenza grandi masse si muovono insieme verso direzioni preferenziali. Questo movimento determina l'opposizione alla forza gravitazionale.



### 5.2.3 Componente angolare

Nell'universo tutto tende a ruotare, e una determinata zona dell'universo anche se apparentemente può sembrare ferma tiene un moto rotazionale residuo. Quando il volume di tale zona per qualche motivo inizia il collasso, dato che il momento angolare deve essere conservato tenderà a ruotare più velocemente. Di solito come esempio viene citata la ballerina che piroettando se ritrae le braccia ruota più velocemente. Ma se si vuole sperimentare personalmente tale fenomeno, si può far uso di una giostra nella pineta di Viareggio in provincia di Lucca. Approfittando dei mesi estivi per andare al mare, non si può mancare di sperimentare la conservazione del momento angolare. Dall'esterno si fa girare la giostra e quando si è raggiunto il proprio limite di velocità si balza sopra tenendosi per le apposite maniglie. Si potrà constatare come aumenti poderosamente la velocità quando ci avviciniamo al palo e viceversa rallentiamo quando ci allontaniamo. Questa velocità diviene forza centrifuga che si oppone alla forza gravitazionale. Ad una determinata velocità la forza gravitazionale non sarà in grado di far collassare ulteriormente la materia cosmica. Pertanto anche la componente angolare è una forza di cui dovremo tenere conto, e che tende ad espandere la materia.

### 5.2.4 Componente magnetica

Nell'universo è presente un fondo a raggi ultravioletti. Quando andiamo al mare e ci abbronziamo, la causa è che sono giunti a noi una quantità di raggi ultravioletti emanati dal nostro sole, ma sulla terra ne giunge solo una minima parte, la stragrande maggioranza viene dispersa nello spazio, e come il nostro sole, tutte le stelle dell'universo contribuiscono a tale fondo. I raggi ultravioletti contengono un'energia sufficiente a trasferire all'elettrone di un atomo di idrogeno, un'energia cinetica tale da vincere la forza elettromagnetica e pertanto esso non risentirà più del legame con il protone. In questo caso avremo che l'elettrone sfuggendo al protone avrà ionizzato l'atomo. Presa una qualsiasi zona dell'universo si formerà a secondo della densità dei raggi ultravioletti e dell'idrogeno un determinato numero di cariche libere dovute agli atomi ionizzati. Le cariche si possono dirigere lungo le linee di un campo magnetico autorganizzato dalle cariche stesse, oppure si possono allineare lungo le linee del campo magnetico galattico. Ma una qualsiasi carica sottoposta ad un campo magnetico tende a muoversi lungo le sue linee di forza, e questo movimento determina Energia Cinetica. Tramite urti casuali l'Ec può essere trasferita alla materia interstellare e determinare un flusso di materia globale che si oppone alla forza gravitazionale. La componente magnetica è l'esempio di come l'energia possa subire continue trasformazioni: essa parte come energia termica dovuta al calore presente sulla superficie delle stelle sotto forma di un'emissione di radiazione ultravioletta; dopo l'assorbimento da parte degli atomi di idrogeno si trasforma in una corrente magnetica, ovvero in energia magnetica, questa corrente a sua volta viene trasferita al materiale interstellare sotto forma di Ec.

### 5.3 Forza di Hubble

La forza di Hubble non è altro che l'espansione dell'universo. Questa forza è stata scoperta da Hubble nel 1929, attraverso l'osservazione che le galassie si allontanano le une dalle altre. Hubble si accorse che la velocità di allontanamento era quasi proporzionale alla distanza: più le galassie sono reciprocamente distanti e maggiore è la velocità di allontanamento. Questa legge viene rappresentata in quella che noi chiamiamo la costante di Hubble. Il valore di questa costante, oggi non è conosciuta con precisione ma in grandi linee è dell'ordine dei 75 Km/s per Mpc. Questo significa che se prendiamo due corpi celesti e li poniamo a distanza di 3000 Miliardi di Milioni di Km di distanza, circa 25 volte il diametro della Via Lattea, tenderanno ad espandersi alla velocità di





75 Km/s. Posti ad una distanza doppia si allontaneranno del doppio. L'espansione sarebbe conseguenza della nascita dell'universo dopo l'esplosione del Big Bang, e chissà che non ne sia essa stessa la causa. Pertanto la forza di Hubble è una forza che tende ad allontanare tutta la materia, e la forza gravitazionale per aggregare la materia ne deve tenere conto, deve cioè, poter vincere la sua espansione. Maggiore è l'estensione su cui deve lavorare la forza gravitazionale e maggiore è la forza di Hubble. Questa componente è stata molto elevata dopo il big bang, quando le caratteristiche dell'ecosistema dell'universo, temperatura, turbolenza, etc, richiedevano alla forza gravitazionale di raccogliere la materia per grandi estensioni. Ma dato che l'universo si è espanso, la temperatura è diminuita a tal punto che la massa di Jeans richiesta fosse raccolta per estensioni molto più ridotte. Oggi una nube può cominciare a contrarsi se la sua dimensione è superiore a 300 a.l.. Per tale estensione la forza di Hubble tenderà ad allontanare la materia alla velocità di  $\approx 7\text{m/s}$ , ovvero se può essere più leggibile  $\approx 25\text{Km/h}$ . E' sufficiente una bicicletta per sfuggire a tale forza. Ma per poter vincere questa componente la forza gravitazionale deve poter prendere spunto da una massa pari a  $\approx 0,4 M_{\odot}$ , una quantità di materia trascurabile in confronto alla quantità di materia presente nella nube. Dato che una nube per poter iniziare il collasso deve essere in gradi di raccogliere circa  $1000 M_{\odot}$  si può considerare ad oggi che la componente di Hubble sia trascurabile.

#### **5.4 Forza debole**

La forza debole è una delle 4 forze presenti in natura ed è la seconda per intensità, ma non interverrà a livello cosmologico dato che il suo raggio di azione è limitato a qualche diametro del nucleo degli atomi. Perciò non partecipa alla prima fase di nascita delle stelle, al collasso della materia, ma entrerà in gioco solo a collasso avvenuto. Ma dato che la forza debole è la responsabile delle reazioni nucleari, comunque entra in campo a determinare le prime fasi di vita della stella in formazione influenzandone le caratteristiche future. Il modello atomico può essere rappresentato a grandi linee, da un nucleo centrale, dove troviamo i protoni e neutroni e da una nuvola di elettroni che ci girano intorno. Se prendiamo 2 di questi atomi e cerchiamo di avvicinarli, la repulsione elettrostatica dovuta alla forza elettromagnetica tenderà ad allontanarli. Ma se teniamo conto delle condizioni in cui si trovano le stelle, la materia al centro si trova sotto pressione e pertanto obbliga gli atomi a stare vicini, a causa poi della temperatura gli atomi hanno un'energia cinetica che li agita in continuazione. Se l'energia posseduta è superiore alla forza elettromagnetica i nuclei degli atomi si possono avvicinare a tal punto che possono risentire della forza debole. A brevi distanze la forza debole è superiore alla forza elettromagnetica e possono così avvenire le reazioni nucleari, i due nuclei si possono unire o in termini fisici fondere. La reazione di fusione nucleare è una reazione esotermica, ovvero dopo la reazione abbiamo a disposizione più energia di quella che è stata richiesta per ottenerla. Se misuriamo la massa durante la reazione, ci accorgiamo che dopo la fusione la massa globale è inferiore a quella dei singoli nuclei. Lo scarto di massa è dell'ordine di un 7 ‰ (per mille). Può sembrare un valore trascurabile, ma dato che nella massa è racchiusa un'energia enorme e ce lo insegnò Einstein con la famosa formula  $E = m c^2$ , da una singola reazione viene liberata un'energia di  $\approx 1\text{pN}$ , quindi se viene trasformato 1 gr di idrogeno ogni secondo si libera un'energia superiore a 150 GW. Questa energia scalda la stella, aumentandone la temperatura, di conseguenza aumenta l'energia cinetica che tende a generare una pressione di espansione che si oppone alla forza gravitazionale. In un primo tempo la forza debole prevale sulla forza gravitazionale, ma espandendosi la stella diminuisce la sua temperatura, le reazioni nucleari di fusione avvengono con velocità sempre inferiore. Pertanto la forza gravitazionale ricomincia a farsi sentire e ricomincia il collasso, ma così facendo aumenta la temperatura facilitando le reazioni



nucleari. La stella assume una dimensione per cui l'energia liberata nella forza debole è equiparata a quella della forza di gravità. Abbiamo perciò ritrovato la definizione di partenza che avevamo dato alla stella, ovvero un corpo celeste in equilibrio tra le 2 forze. Ma prima o poi la forza debole è predestinata a perdere: quando il combustibile nucleare si esaurisce, la forza gravitazionale riprenderà il sopravvento ricominciando a far collassare la materia. La forza debole pertanto contribuisce a ritardare l'aggregazione della materia, e a posticipare la vittoria della forza gravitazionale. Ma comunque avrà l'opportunità di riscattarsi, se le reazioni nucleari avvengono con velocità troppo elevata, l'energia cinetica trasmessa può causare l'esplosione delle stelle in supernova. L'energia cinetica trasferita è tale che gli strati esterni della stella possono vincere la forza gravitazionale lasciando il sistema.

## 6 Ecosistema primordiale

Le 4 forze principali, gravità, pressione, Hubble, e la forza debole, combinate insieme determinano e plasmano le caratteristiche della formazione, dell'evoluzione della materia cosmica in stelle. Ma la base su cui queste forze devono lavorare è l'ecosistema dell'universo. Tutta la storia è partita 15 miliardi di anni fa, dal Big Bang (Fig. 1). L'universo primordiale si presentava estremamente omogeneo, ma se la massa fosse stata distribuita quasi uniformemente, la forza gravitazionale non sarebbe stata capace di aggregare la materia e di conseguenza oggi non avremmo nessuna stella. Infatti, se una massa è attirata in una direzione da un'altra massa e se nella direzione opposta è presente la stessa quantità di massa alla stessa distanza, le due forze saranno in equilibrio e non si genererà alcun movimento.

### (Very) Brief History

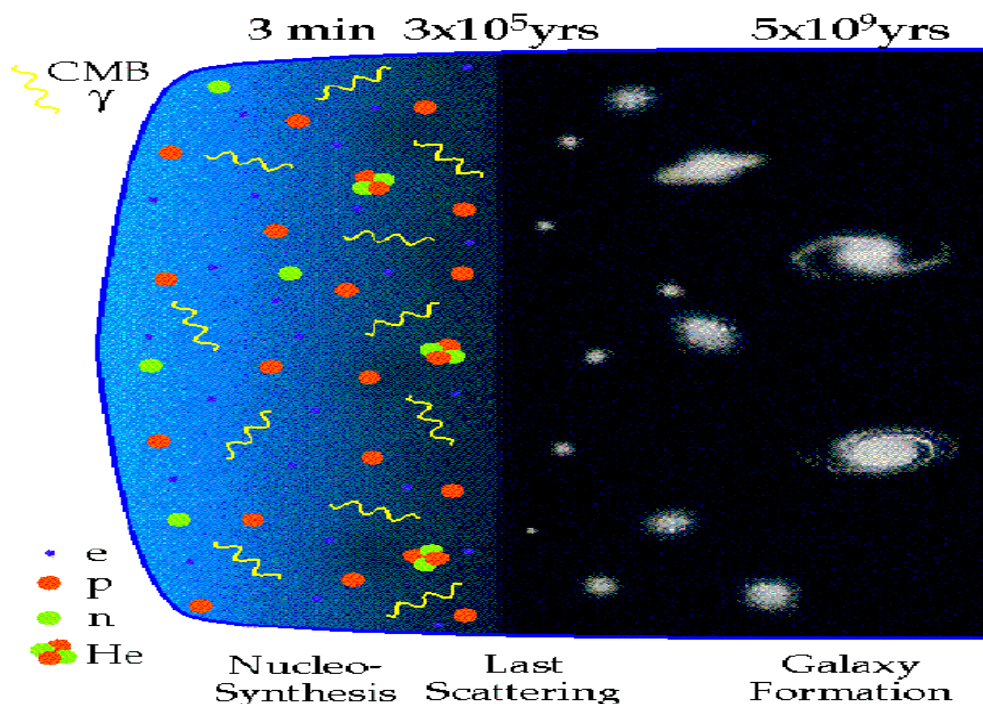


FIG. 1

Per poter determinare un movimento, una storia nell'universo, è importante non tanto accumulare un determinato valore di massa in una determinata zona del cosmo, ma realizzare un differenziale di massa. Deve essere individuato un meccanismo di instabilità gravitazionale che determini in un



punto dello spazio una densità della materia diversa. Una volta che si è creato un differenziale di massa, grazie alla forza gravitazionale la perturbazione iniziale si amplifica esponenzialmente nel tempo, determinando il collasso della materia circostante. Ma per determinare come si siano formate le prime stelle da queste instabilità, come facciamo a conoscere quanto fosse omogeneo l'ecosistema dell'universo primordiale? Nella teoria del Big Bang si ipotizza che uno dei fondi delle particelle presenti fosse costituito da fotoni ad alta energia, ovvero ad alta temperatura. La materia barionica, i protoni e i neutroni e leptonica, gli elettroni, erano fortemente accoppiati con questo fondo. I fotoni possedevano una elevata quantità di energia, che trasferivano agli elettroni sotto forma di energia cinetica. L'energia cinetica degli elettroni era tale che la forza elettromagnetica del protone non era sufficiente ad attrarre l'elettrone. Pertanto gli elettroni erano liberi di vagare nell'universo primordiale. Le cariche, gli elettroni e protoni, non erano legati e la materia era sotto forma di quello che viene chiamato stato di plasma. I fotoni in queste condizioni non erano liberi di potersi propagare nell'universo, ma erano continuamente assorbiti e diffusi dagli elettroni, tant'è che il loro cammino medio era estremamente ridotto. Condizioni simili sono presenti all'interno delle stelle, data l'elevata temperatura la materia non è organizzata in atomi ma è sotto forma di plasma. Nel nostro sole la radiazione, i fotoni, prodotta al centro della stella per fusione nucleare, raggiunge la superficie dopo non meno di 1 milione di anni. Dato l'elevato accoppiamento tra i fotoni e la materia barionica anche se fosse stata presente una disomogeneità di massa barionica, questa sarebbe stata ridistribuita nell'universo. Ma il cosmo nel frattempo si è espanso, fintantoché la temperatura e quindi l'energia dei fotoni si è abbassata a circa 3000°K, l'Ec trasferita agli elettroni diviene inferiore alla forza elettromagnetica. A 300.000 anni dal big bang gli elettroni si uniscono così con i protoni. Questa era è chiamata in onore a questo evento, periodo della ricombinazione. Di fatto è l'atto di nascita degli atomi, decade la materia sotto forma di plasma per lasciare il posto ad un nuovo stato organizzato, quello atomico. In queste condizioni gli elettroni non sono più accoppiati con i fotoni e pertanto questi ultimi possono propagarsi indisturbati nell'universo senza essere assorbiti. L'insieme di questi fotoni costituisce quello che oggi viene chiamato radiazione di fondo cosmologico. Da allora questi fotoni vagano nello spazio indisturbati conservando l'impronta delle ultime interazioni con la materia barionica. Data la bassa interazione con l'universo questa radiazione avrebbe subito ben poche modifiche da allora, mantenendo come un'immensa fotografia l'immagine delle disomogeneità della distribuzione della materia barionica all'epoca di 300.000 anni dal big bang. Se la materia avesse avuto delle disuniformità si potrebbero osservare come variazioni di temperatura su tale fondo. Nel 1992 il satellite COBE ha analizzato la temperatura della radiazione di fondo in diverse zone del cielo, evidenziando delle differenze di temperatura, ma confermando allo stesso momento che l'universo barionico fosse estremamente omogeneo. L'universo barionico era così uniforme che la massa differenziale tra una zona e l'altra non era maggiore di 1/100.000 della densità della materia. Successivamente nel 1998 un esperimento italiano, l'esperimento Boomerang tramite un telescopio sensibile alle microonde che fu trasportato da un pallone fino ad una quota di 37 km, compì osservazioni che hanno permesso di scoprire l'estensione delle disomogeneità pari a circa 1°, il doppio della luna (Fig. 2). L'ecosistema primordiale, a 300.000 anni non era ancora pronto per poter formare le stelle, le condizioni erano tali che l'Ec dovuta alle varie componenti era così elevata da richiedere un enorme differenziale di massa. Ma data l'estrema omogeneità dell'universo, l'estensione richiesta, per accumulare il differenziale di massa, doveva essere molto grande, facendo entrare in gioco anche la forza di Hubble, richiedendo così a sua volta un tributo ancora superiore di differenziale di massa. Ma se l'estensione richiesta raggruppa più zone di disomogeneità, in media, il differenziale di massa a disposizione si riduce quasi a zero. Se l'estensione è superiore a quelle osservate da Boomerang ( $\approx$



1°), non poteva innescarsi nessun start di un collasso e pertanto la forza gravitazionale in quel periodo perdeva le sue battaglie. In questo periodo regna sovrana solo la termodinamica che tende a entropizzare l'universo rendendolo sempre più omogeneo. Ma nel frattempo l'universo è ancora in espansione, la temperatura della materia barionica si abbassa a tal punto che la massa di Jeans è sempre più bassa. L'estensione dello spazio per cui troviamo la massa differenziale richiesta, diviene sempre meno estesa a tal punto che incontra le disomogeneità osservate da Boomerang, e la forza gravitazionale può cominciare ad aggregare la materia. Di questo periodo conosciamo ben poco, non abbiamo osservazioni che ci possano confutare le varie teorie, comunque fra le più accreditate è che l'universo ad un certo punto, a circa 1 miliardo di anni dal big bang, ha incontrato caratteristiche favorevoli per far vincere la forza gravitazionale, ed è iniziata l'aggregazione della materia. La materia si sarebbe aggregata ad un livello scala dimensionale pari a quelle necessarie per formare gli ammassi globulari. Da tale livello di aggregazione poi successivamente l'universo si sarebbe organizzato ai livelli scala inferiori frammentandosi, formando le stelle, a livelli scala superiori, organizzandosi in ammassi di ammassi globulari, formando le galassie, e poi ammassi di galassie, ammassi di ammassi e così via sino ad arrivare alle strutture osservate oggi.

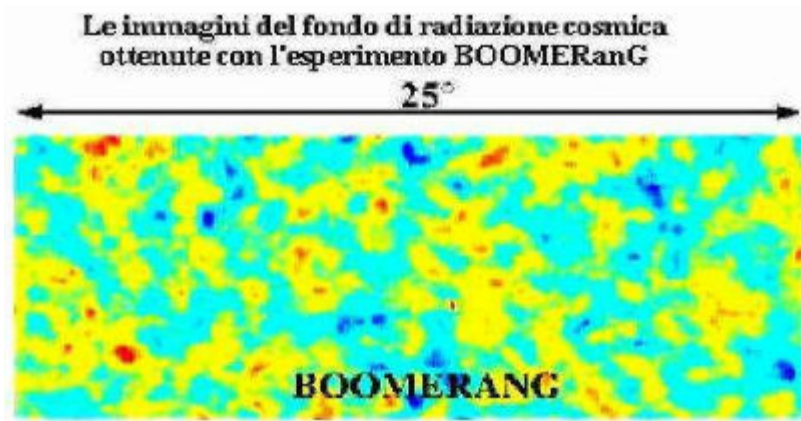


Fig. 2

### 6.1 *Instabilità primordiale*

In un modo o nell'altro, o piccola o grande, nell'universo deve essere stata presente della disomogeneità di distribuzione della sua massa, altrimenti nessun processo di aggregazione potrebbe essere partito. L'osservazione che l'universo oggi è strutturato sarebbe la prova evidente che l'universo non sarebbe stato mai completamente omogeneo. La prima instabilità deve essere nata con l'universo. Il tutto è partito 15 miliardi di anni fa con il Big Bang. La teoria più accreditata a giustificare la sua nascita si rifà alla meccanica quantistica: una fluttuazione del nulla con bassa probabilità tendente a zero ma con un'eternità di tempo a disposizione avrebbe creato il tutto. Già alla sua nascita, la fluttuazione avrebbe posseduto delle rugosità, delle microfluttuazioni che hanno determinato le varie disomogeneità. Successivamente la sola materia barionica, data l'estrema omogeneità, non sarebbe stata in grado di avviare l'aggregazione. Pur conservando geometricamente le disomogeneità quantistiche, queste sono state ridistribuite termodinamicamente quando erano fortemente accoppiate con la radiazione, i fotoni. Nel frattempo un altro tipo di materia, la materia oscura fredda esotica avrebbe avuto una evoluzione diversa. La materia esotica non interagendo con la forza elettromagnetica non risente dell'influenza dei fotoni e quindi non doveva essere accoppiata con la radiazione. La componente della materia esotica, per esempio quella predetta dalla teoria supersimmetrica SUSY, possiede particelle con enorme massa e quindi a





bassa velocità di propagazione nello spazio; da qui la denominazione di materia oscura fredda. Ma tale materia come quella barionica, possedendo una massa interagirebbe comunque tramite la forza gravitazionale. Allo stesso modo che per la materia barionica, applicando gli stessi criteri di analisi, se il differenziale di massa esotica è superiore alla massa di Jeans di materia esotica, può avere inizio un collasso. Mentre la materia barionica è occupata a ballare con i fotoni, se l'Ec della materia esotica è inferiore alla forza gravitazionale, inizia ad aggregarsi. Quando poi la materia barionica si è raffreddata a tal punto da liberarsi dei fotoni, si è potuta dirigere verso quelle aggregazioni di materia oscura, formando le strutture dell'universo. L'universo barionico, pertanto senza l'aiuto dell'universo esotico non sarebbe stato in grado di aggregarsi e formare le stelle. O almeno ci sarebbe arrivato molto più tardi. Difatti oggi si pensa che le galassie siano tutte circondate da un alone di materia oscura esotica. Nel mondo vi sono diversi esperimenti, alla ricerca di queste particelle, come per esempio quello italo-cinese, DAMA acronimo di DARK Matter. L'esperimento è diretto da Rita Bernabei dell'università di Roma, di Tor vergata, presso i laboratori del Gran Sasso, protetti da 1400 metri di roccia, e stanno cercando di rilevare una particella denominata neutralino. I neutralini fanno parte di un'insieme di particelle introdotte dalla teoria della supersimmetria. Essendo una particella debolmente interagente con la materia, ha tutte le carte in regola per poter far parte della famiglia delle WIMPs. E' un candidato privilegiato, perché, fra tutte le particelle della teoria supersimmetrica, è quella che pesa meno. Essendo una particella con una massa dell'ordine di  $\approx 60$  masse protoniche non dovrebbe avere velocità molto elevate e pertanto rientra, come del resto tutte le particelle della teoria supersimmetrica, nella categoria della M.O. fredda. Data la bassa velocità, il fondo cosmologico di neutralini, dovrebbe risentire delle attrazioni della forza gravitazionale dei vari corpi celesti, e addirittura, se fosse il maggior componente, determinare esso stesso la dinamica dell'universo. Se i neutralini esistono, dovrebbero orbitare intorno alla galassia come fanno le stelle. Mentre i neutralini ce li aspettiamo come un fondo omogeneo che orbita intorno alla galassia, le stelle hanno moti propri di mutua interazione con le stelle vicine. Pertanto il nostro sistema solare non si propaga insieme a tale fondo. La terra orbitando intorno al sole in alcuni periodi dell'anno si troverebbe controcorrente al fondo dei neutralini, mentre 6 mesi dopo li inseguirebbe. Tale stagionalità diviene quindi un banco di prova della loro osservazione. In 4 anni di osservazioni, sono stati individuati un migliaio di eventi significativi. imputabili alla particella neutralino. A conferma dell'effettiva osservazione è stata realmente osservata una stagionalità con un picco max a giugno ed uno minimo a Dicembre. Questi mesi, confermano la giusta direzione di rotazione intorno al centro galattico dell'ipotetico fondo. Tale ricerca è recente, e il primo annuncio dei risultati dell'esperimento DAMA è stato dato nel 2000, pertanto si prevede nei prossimi anni un incremento del campione statistico per ottenere qualche informazione più dettagliata di tale particella, e confermare la presenza della materia oscura nell'universo.

## 7 Le popolazioni stellari

In un modo o nell'altro le disomogeneità primordiali hanno permesso alla forza gravitazionale di avere la meglio su tutte le altre forze, e hanno determinato l'aggregazione della materia. Dalle prime aggregazioni sarebbero nate quelle che sono considerate le prime generazioni di stelle, chiamate stelle di '**Popolazione III**'. I componenti di base di queste prime stelle sono ben pochi e derivano dall'ecosistema dell'universo primordiale. Come era composto l'universo viene suggerito dalla teoria della nucleosintesi del big bang, le prime stelle si trovavano immerse in un immenso oceano composto al 76 % di idrogeno (H) 24% di elio (He) e da una minima parte trascurabile  $\approx 0\%$  di metalli. Gli astronomi, per metalli, non intendono il ferro come qualcuno potrebbe pensare, ma tutti gli elementi diversi dall'idrogeno e dall'elio. Pertanto ci dovremmo aspettare di dover osservare una





parte di stelle con una percentuale di metalli molto bassa. In realtà ad oggi nessuna stella di Popolazione III è stata mai osservata. Dato che la massa di una stella in formazione dipende dalla temperatura del gas da cui deriva, si suppone che la prima generazione di stelle sia stata composta da stelle massicce, almeno di 10 volte  $M_{\odot}$  o anche molto di più. A causa di quest'elevata massa, le prime stelle si devono essere evolute velocemente in meno di 1 milione di anni. Le prime stelle di Popolazione III pertanto sono sicuramente tutte esplose come supernovae, e si spera, un giorno, di poter osservare almeno le conseguenze di queste esplosioni in galassie molto distanti e quindi molto giovani. La generazione successiva di stelle, chiamate "**Popolazione II**" si è così formata sulle ceneri delle stelle precedenti. La nucleosintesi non solo è avvenuta durante il big bang, ma può avere luogo all'interno delle stelle. Le stelle produrrebbero, dalle reazioni nucleari, elementi di massa superiore a quelli di partenza, contribuendo ad aumentare la presenza di metalli nell'universo. A parità di temperatura, la densità della materia con i metalli è superiore e pertanto la seconda generazione di stelle ha potuto godere di una massa critica, massa di Jeans più bassa, incrementando il tasso di formazione di nuove stelle. Di generazione in generazione le stelle avrebbero incrementato la percentuale di metalli nell'universo a tal punto che oggi il materiale interstellare sarebbe cresciuto sino ad un valore del 3%. Siamo così arrivati alla generazioni di stelle attuali, chiamate "**Popolazione I**", che si troverebbero in condizioni sempre più favorevoli, con la temperatura in discesa, la presenza di metalli in aumento, e minore omogeneità. Più il tempo passa e migliori sono le condizioni di formazione delle stelle. Ma dopo 15 miliardi di anni dato che la percentuale dei metalli è solo del 3% e che la maggior parte della massa barionica è ancora dispersa nell'universo sotto forma di gas e polveri ( $\approx 90\%$ ), il rendimento di formazione delle stelle è stato molto basso. Per poter osservare una maggiore formazione di stelle dovremo aspettare che l'universo si raffreddi ulteriormente e/o si arricchisca ulteriormente di metalli. Pertanto chi avesse la pazienza di aspettare qualche decina di miliardi di anni potrà assistere ad una vera pioggia di formazione di stelle. Il picco di formazione delle stelle probabilmente deve essere ancora raggiunto, e benché le stelle si valutino essere oggi un numero di  $10^{22}$  in realtà rappresenterebbero solo una piccola percentuale.

## **8 Ecosistema attuale**

Dato che non tutta la materia interstellare si sarebbe trasformata in stelle, nello spazio si troverebbero delle nubi costituite da:

- I. Gas
- II. Polveri interstellari.

Il gas sarebbe composto press'a poco allo stesso modo dell'universo primordiale con un 3% di metalli. Le polveri interstellari si sarebbero formate grazie alle basse temperature. Una parte dei metalli e non, si sono aggregati a formare le molecole e queste a loro volta si sono aggregate in grani. Oggi la polvere interstellare costituirebbe 1/1000 di massa di una qualsiasi nube. La polvere interstellare è importante dato che successivamente vedremo che assumerà dei ruoli importanti durante le varie fasi di formazione delle stelle. Fluttuazioni casuali di queste nubi formerebbero concentrazioni di materia da 10, 100 e perfino 10.000 volte più dense. Comunque tali addensamenti si possono considerare vuoti, dato che sono milioni di volte più vuoti del più elevato vuoto assoluto che si riesca a realizzare in un laboratorio sulla terra. Queste nubi, a secondo della temperatura e della condizioni a cui si trova il componente principale, l'idrogeno, le possiamo catalogare nelle seguenti 3 categorie :

- 1) Ionizzato (Regione H II)
- 2) Atomico (Regione H I)



### 3) Molecolare

Se la temperatura della nube è molto elevata al punto che il moto termodinamico trasferisca agli elettroni un  $E_c$  maggiore dell'energia della forza elettromagnetica, l'idrogeno è ionizzato. Queste zone sono chiamate Regioni H II. Dato che l'idrogeno in tale condizione ha solo un elettrone, la materia si troverà organizzata sotto forma di plasma. Se la temperatura è più bassa e l'elettrone è accoppiato con il protone, l'idrogeno è organizzato sotto forma atomica. Queste zone sono chiamate Regioni H I. Se la temperatura è ancora più bassa, l' $E_c$  posseduta dagli atomi è inferiore all'energia chimica dei legami atomici, si possono formare aggregati di idrogeno, ovvero le molecole. La materia è organizzata sotto forma molecolare, e la nube sarà chiamata molecolare.

## 9 Il Collasso della nube

Date le basse temperature, la formazione delle stelle partirebbero con maggiore probabilità dalle regioni molecolari. Per la nostra galassia, la Via Lattea, si osserva che se in queste regioni non viene accumulato un valore di circa  $1000 M_{\odot}$  le stelle non possono nascere, il collasso non può partire. In realtà il collasso si può innescare anche in nubi più piccole o più calde. L'analisi fino ad ora si è concentrata sul confronto tra la forza gravitazionale e l'energia cinetica, ma in realtà vi possono essere altri meccanismi che possono favorire la formazione stellare. Meccanismi diversi possono indurre una regione a collassare e un modo per catalogarli può essere il seguente:

#### 1) Onde d'urto

- ◆ Pressione radiazione da regioni H II
- ◆ Moti di enormi quantità di gas (Molecular Outflows)
- ◆ Getti collimati di gas a elevate velocità (Jets)
- ◆ Urti fra nubi
- ◆ Eventi cataclismatici tipo supernovae.

#### 2) Onde Marea

- ◆ Incontri stellari
- ◆ Incontri galattici
- ◆ Onde di densità di Lin e Shu

### 9.1 Onde d'urto di materia

La realtà a volte non è come potrebbe apparire. Fino adesso non ho fatto altro che dire che l' $E_c$  disturba la forza di gravità, ma, se è ben organizzata, invece di contrastare la sua azione ne può favorire il lavoro. Se l'energia cinetica invece di venire trasmessa caoticamente, è organizzata geometricamente come un'onda d'urto, può indurre la formazione delle stelle semplicemente aumentando la densità localmente, comprimendo una regione. Se la densità aumenta, si possono realizzare condizioni per cui la massa di Jeans può essere soddisfatta localmente prima che per tutta la nube intera, e pertanto innescare un collasso. Lo start può essere indotto anche da una regione H II. La temperatura è così elevata che i fotoni possono portare un' $E_c$  cinetica a tal punto da impattare su una regione adiacente comprimendola con la loro pressione. L'onda d'urto da moti di enormi quantità di gas comporterà una compressione maggiore. Anche stelle giovani durante la loro formazione possono produrre fenomeni come i Molecular Outflows, ovvero onde d'urto di materia come emissioni di gas a livello equatoriale dalla superficie a causa dell'instabilità della stella ancora in cerca di un equilibrio interno. Fenomeni simili, in formato ridotto, sono le protuberanze del sole



che provocano le tempeste geomagnetiche sulla terra. Onde d'urto simili possono essere causati da quelli che vengono definiti i Jet. I Jet sarebbero presenti anche in stelle in fase di formazione che espellerebbero questa volta il materiale a livello polare in fasci stretti. Come nel caso precedenti ma per meccanismi diversi, l'onda d'urto di materia, comprimerebbe zone adiacenti inducendo la formazione di nuove stelle. In altri eventi più semplici, senza richiedere altri corpi celesti, l'onda d'urto può essere causata dal moto turbolento delle nubi stesse che casualmente possono scontrarsi comprimendosi. Ma le onde d'urto possono essere emesse da altri eventi più violenti, cataclismatici come quelle delle supernove. Come già anticipato nei primi paragrafi, vi sono stelle che hanno bruciato il proprio combustibile troppo in fretta e termineranno l'esistenza violentemente. Il materiale esterno della stella, arricchito di metalli, viene donato e in un certo senso è come se cercassero di ritardare la propria fine trasferendo la propria anima ad una nuova stella in formazione.

## **9.2 Onde di marea**

Altra categoria di fenomeni sono le onde di marea. L'attore principale, la causa di questa fenomenologia è la forza gravitazionale. Come paragone possiamo citare le maree presenti sulla terra causati dalla Luna. Allo stesso modo se una stella passa vicino ad una nube interstellare fa risentire del suo passaggio tramite un'onda di marea che attraversa tutta la nube. Al suo passaggio alcune zone si espandono ed altre si comprimono aumentando la probabilità di un inizio di collasso gravitazionale con conseguente formazione di stelle. A livello più in grande il fenomeno si ripete per incontri galattici. Quando due galassie si passano troppo vicino, le onde di marea reciproca provocherebbero la nascita di nuove stelle. E' come se le due galassie si stessero comunicando, si stessero salutando illuminandosi vicendevolmente con la luce delle nuove stelle. Altro fenomeno più complesso è quello provocato dalle onde di densità di Lin e Shu. In una galassia si propagherebbero delle onde di densità e sarebbero le responsabili della forma delle spirali. Queste spirali se dovessero autosostenersi, dopo alcune rotazioni, data la differente velocità angolare a diverse distanze, si dovrebbero arrotolare su se stesse. Ma dato che oggi noi osserviamo una bella percentuale di galassie a spirale, questo significa che il meccanismo sarebbe diverso. Le onde di densità al loro passaggio innescherebbero la formazione di nuove stelle aumentando la densità della materia. Le onde di densità sarebbero il risultato di onde di instabilità gravitazionale che si propagherebbero all'interno della galassia, come un'onda di marea, a velocità inferiore di quelle delle stelle. Le stelle e le nubi interstellari, che sopraggiungono alla onda di densità, rallentano a causa del più alto campo gravitazionale e si addensano temporaneamente, poi essendo più veloci passano oltre e procedono per la loro orbita fintanto che non incontrano un altro braccio. Il risultato di questi moti sarebbero dei bracci a spirale a maggior densità, che si spostano ruotando con una velocità diversa, più lenta di quella delle stelle e delle nubi di gas. Le stelle sarebbero ovunque presenti, ma nelle spirali essendovi indotte stelle in formazione, sarebbero più luminose e per contrasto le altre zone stellari apparirebbero più scure. Il sistema solare sarebbe nato circa 5 miliardi di anni fa nel braccio a spirale del Sagittario, attualmente si troverebbe in prossimità di uno dei bracci della galassia, quello detto di Orione, e raggiungerà il braccio di Perseo tra 3 Miliardi e 300 milioni di anni.

## **10 Nasce una stella**

Sino adesso abbiamo affrontato solo lo start del collasso, quali siano state le cause che hanno portato alla prima instabilità, quale sia stato, e quale è l'ecosistema che permette la formazione delle



stelle. Adesso andiamo ad affrontare cosa accade dopo che una determinata zona ha cominciato a contrarsi. Analizziamo la dinamica e l'evoluzione del collasso.

### **10.1** *Complessi Giganti di Nubi Molecolari*

La teoria di base di come si formi una stella, era già stata ipotizzata nel 1755 da Kant e poi nel 1796 da Laplace quando cercarono di definire come il nostro sistema solare si fosse formato. Avevano ipotizzato che una stella nasce da una contrazione di una nube, ma quello che non potevano prevedere che lo start avvenisse da una contrazione di complessi giganti di nubi molecolari. Questi sono stati osservati solo nel 1970 tramite osservazioni radio impossibili allora. Possono essere una delle maggiori cause di opacità nelle galassie. Per le nubi molecolari compatte la temperatura è solitamente inferiore ai 40 K. Queste nubi essendo formate prevalentemente da idrogeno molecolare  $H_2$ , sono quasi impossibili da osservare e da studiare spettroscopicamente. A causa della loro simmetria le molecole dell'idrogeno sono inerti e, alle basse temperature che attribuiamo agli ambienti in cui si trovano, esse non producono quasi alcuna emissione di righe spettrali. Le uniche righe di emissione sono prodotte nel lontano infrarosso, ad esempio a lunghezza d'onda di 12 e 28 micrometri, e per misurarle occorrerebbe uno spettrografo ad alta risoluzione che si trovasse su un satellite al di fuori dell'atmosfera. E' previsto uno strumento del genere nel programma ISO. Si conosce comunque che in media 1 molecola su 100.000 è di monossido di carbonio (CO), un composto raro ma relativamente facile da osservare poiché emette una riga spettrale caratteristica alla lunghezza d'onda di 2,6 mm. Osservazioni tramite il CO, hanno rilevato cospicua presenza di nubi. Le osservazioni sono ancora incerte, a causa della bassa sensibilità dei telescopi millimetrici. L'incertezza dell'interpretazione dei dati derivate dalle righe del CO non fa escludere che esistano nubi molecolari in numero sufficiente a rendere le galassie opache. I primi calcoli delle osservazioni tramite il CO composto delle nubi molecolari hanno rilevato che si tratta di masse cospicue, dello stesso ordine di grandezza della massa totale della componente stellare di una galassia, cioè circa  $10^{10}$  masse solari. In articoli più recenti la stima delle nubi basate sulla misura del CO vengono riportati valori sempre più alti, fino a  $2 \cdot 10^{10}$  Ms. Sono presenti nel disco a spirale delle galassie e presentano un diametro di circa 300 a.l. Queste nubi si trovano in equilibrio, l'autogravità è bilanciata dalla pressione del moto delle componenti. La nube sta aspettando una condizione favorevole per poter iniziare il collasso, un moto turbolento che ne aumenti la sua densità, o le onde di densità di Lin e Shu o altro. Se così non fosse o si sarebbero tramutate tutte in stelle, cosa che non si osserva, o si sarebbero disperse nell'universo, ma costituirebbero sempre un fondo di nubi molecolari.

### **10.2** *Nuclei densi*

Nel 1983 Philip C. Meyers osservò che all'interno delle nubi molecolari si potevano formare degli addensamenti isolati, che chiamò "Nuclei densi" (Cores). Fu il primo ad analizzarne le caratteristiche e a collegarli alla formazione delle stelle. Come il resto della nube a sua volta il nucleo denso si presenta stabile, ovvero la pressione del gas è eguale a quella della gravità e pertanto non abbiamo nessun collasso. E' in attesa di una instabilità gravitazionale che ne determini il collasso. Questo avverrà quando il criterio di Jeans sarà in qualche modo soddisfatto, ovvero quando la massa differenziale all'interno alla nube è superiore alla pressione del moto delle sue componenti ( $E_c$ ). Presentano un diametro di alcuni mesi luce, qualche Migliaio di Miliardi di Km, circa 200 volte l'orbita di Plutone, una densità di circa 30.000 molecole  $H_2$  per  $cm^3$ , una densità superiore di circa 30 volte del resto della nube.



### 10.3 Frammentazione gerarchica

Quando il criterio di Jeans è soddisfatto inizia il collasso, ma non parte dal nucleo denso, la massa non è sufficiente, ma da tutta la nube del complesso molecolare, che inizia la contrazione. Essendo le nubi interstellari molto grandi, il loro collasso non dà origine ad una stella sola, ma ad un insieme di stelle. Per spiegarne la dinamica di formazione, Hoyle, ha proposto una teoria chiamata "frammentazione gerarchica" (Fig. 3). Quando una qualsiasi nube ha cominciato a collassare, modifica i parametri necessari per il collasso, la densità aumenta, la temperatura pur aumentando, inizialmente può essere dissipata, e la massa di Jeans richiesta diminuisce provocando il collasso locale di parte delle nubi e favorendo la crescita delle disomogeneità. A sua volta per le zone collassate, poiché aumenta la densità, la massa critica di Jeans diminuisce, favorendo il collasso di disomogeneità inferiori. La nube pertanto si frammenta in zone sempre più piccole, fino a che possono cominciare processi di contrazioni indipendenti, arrivando ai nuclei densi o altre zone, e successivamente si formano le stelle. Questo spiegherebbe il perché le stelle giovani, si trovano spesso raggruppate in ammassi. Dopo la formazione, l'ammasso, per le mutue interazioni, tende ad evaporare formando stelle isolate.

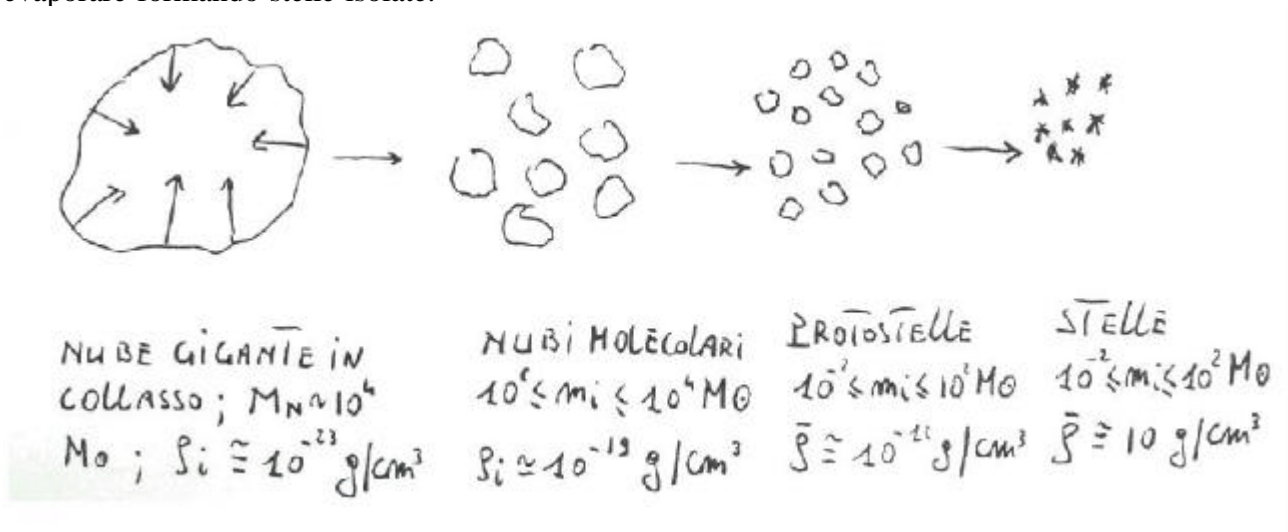


FIG. 3

### 10.4 Protostella

Il corpo celeste che si forma al centro dei nuclei densi si chiama protostella. La teorizzazione delle protostelle si ha molto prima della scoperta dei nuclei densi. Già nel 1948 Spitzer definisce per protostella: "nube di gas isolata soggetta a inesorabile collasso gravitazionale fino a formare una stella singola". Ma le teorie moderne delle protostelle nascono nel 1969, quando Richard Larson simulò al computer il collasso di nubi molecolari. Da tale analisi evidenziò, contrariamente a quello che si può pensare, come evidenziato dalla teoria della frammentazione, che il collasso non parte dall'esterno ma dall'interno verso l'esterno (Fig. 4). Mentre il gas all'interno procede in caduta libera verso il centro, il gas all'esterno rimane ancora fermo. Il confine della regione che partecipa al collasso si espande progressivamente verso l'esterno attraverso la nube. Nel cuore della regione che subisce il collasso, le collisioni tra masse di gas cominciano a formare la stella. Il diametro della zona interessata al collasso è di circa 1 secondo luce, pari a 1 decimilionesimo delle dimensioni del nucleo denso. Essendo il diametro della stella così piccolo, in questa situazione non è importante tanto la grandezza ma quanto, la velocità di accrescimento. L'oggetto che si forma al centro della





nube che subisce il collasso si chiama protostella. La parte centrale passa da una temperatura di qualche decina di gradi kelvin fino a qualche migliaio di gradi. Ma dato che all'inizio la densità della nube è ridotta ed è trasparente, l'addensamento riesce a irradiare facilmente raffreddandosi. Pertanto aumentando la densità e rimanendo la temperatura quasi la stessa, il collasso può procedere. Ma dato che tutta la nube si concentra verso la protostella, la densità del materiale in caduta diviene molto alta a tal punto che la polvere interstellare fa divenire la nube opaca alle radiazioni.

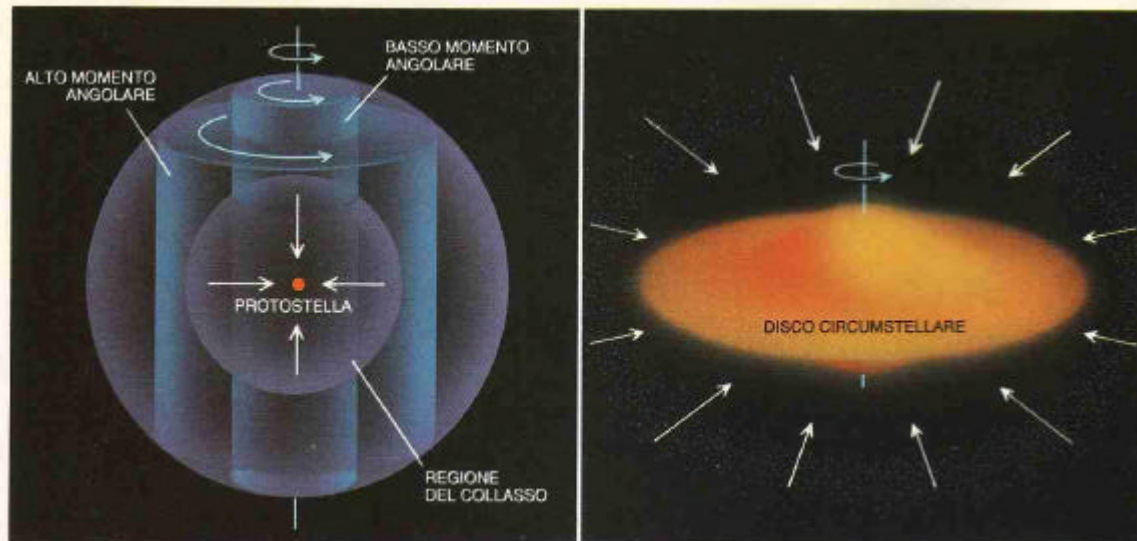


FIG. 4

La protostella non può più raffreddarsi facilmente, ma la quantità di massa è in grado di attrarre altra massa e l'energia  $E_c$  della nube in caduta è talmente alta che il collasso questa volta è inesorabile. L' $E_c$  del materiale in caduta libera, acquisita dall' $E_g$  (Energia Gravitazionale) è talmente alta che raggiunge la superficie della protostella a velocità elevate (Fig. 5). La superficie si presenta come un fronte d'urto (shock di accrescimento) che arresta il gas in caduta bruscamente, provocandone un riscaldamento fino a quasi 1.000.000 K, poi si raffredda rapidamente per irraggiamento fino a circa 10.000 K depositandosi strato dopo strato sulla protostella. La radiazione emessa nella zona del fronte d'urto finisce per incontrare i grani di polvere in caduta. Ma la polvere non riesce a raggiungere la superficie della protostella perché il calore intenso la vaporizza. Data l'elevata energia, i legami molecolari dei grani si spezzano, provocandone l'evaporazione. Vicino alla protostella il materiale in caduta si presenta sotto forma di gas. Dato che il gas non assorbe i fotoni, questa zona viene chiamata "intervallo di opacità". Ad una determinata distanza, i fotoni incontrano l'involucro di polvere. L'energia radiata si riduce a tal punto che i grani di polvere non evaporano più, e pertanto la radiazione viene assorbita. I fotoni si propagano tra la polvere interstellare verso l'esterno della protostella. Vengono assorbiti e riemessi in continuazione, ma tra un assorbimento e l'altro vengono riemessi a lunghezze d'onda sempre maggiori. Dato che la dimensione dei grani è di qualche micrometro, i fotoni non saranno più assorbiti quando la frequenza si sarà spostata dal visibile all'infrarosso. I fotoni possono scappare dalla nube e giungere senza ostacoli ai telescopi a terra. Il confine della zona di polvere che permette l'uscita dei fotoni viene chiamata "fotosfera di polvere". Tale termine fu coniato da Shu, Taam e Steven W. Stahler. La fotosfera di polvere si trova ad una distanza di alcune ore luce dalla protostella, a qualche miliardo di Km o alcune orbite di Saturno. A causa di questo spostamento spettrale noi non possiamo osservare la protostella; quello che vediamo è la fotosfera di polvere e neanche nel visibile. Il fronte



d'urto consente di spiegare la grande luminosità delle stelle giovani da 6 a 60 volte maggiore di quella della stessa stella quando entrerà nella fase di maturità di stabilità interna. L'energia non viene fornita dalla fusione nucleare ma dall'energia cinetica della polvere e gas in caduta acquisita dalla forza gravitazionale. Nelle prime fasi di formazione di una stella abbiamo pertanto una luminosità che potremo chiamare gravitazionale. Oltre la fotosfera di polvere abbiamo l'involucro esterno di polvere, il materiale che è ancora in caduta verso la protostella.

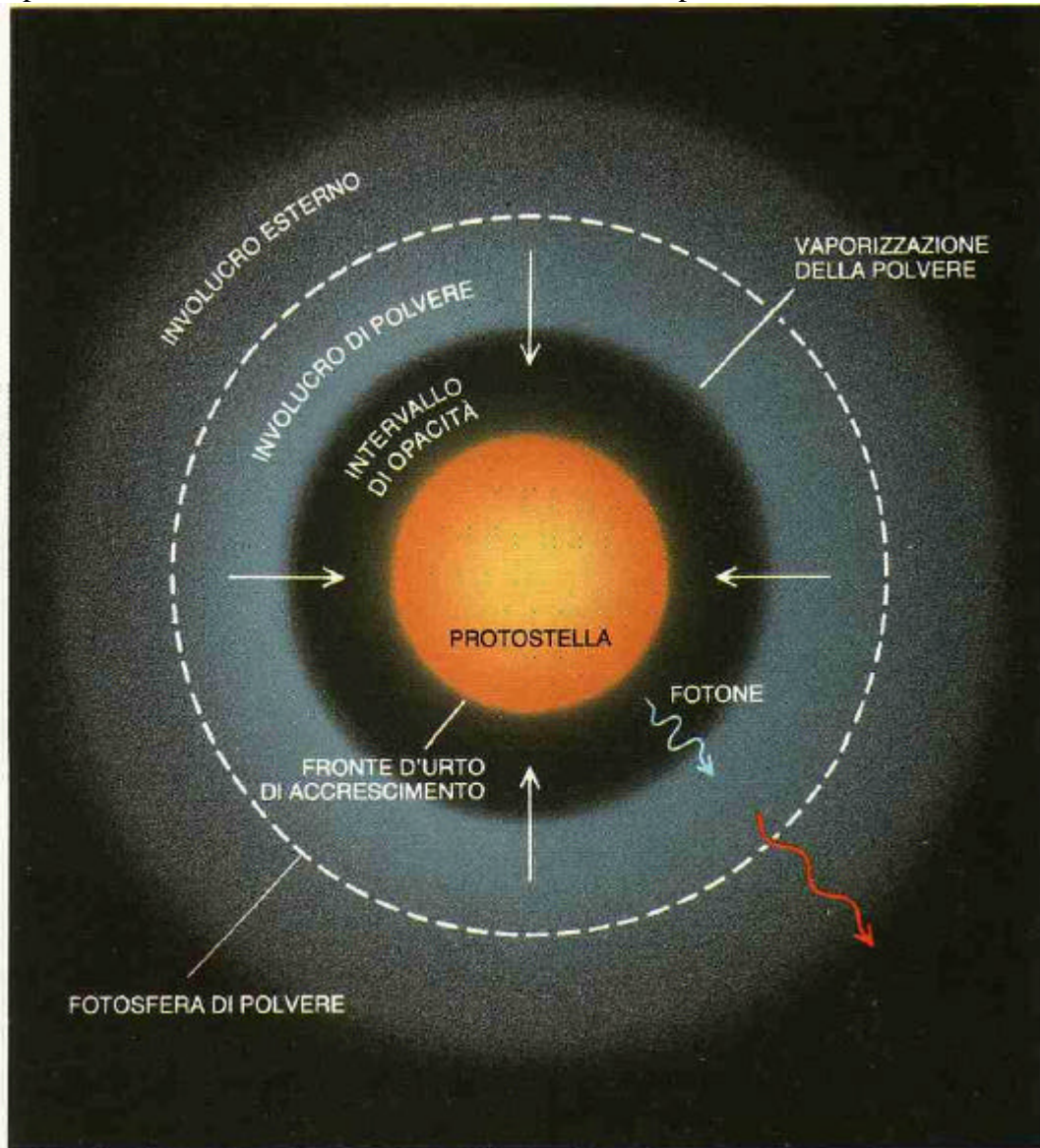


FIG. 5

### 10.5 *Fusione del deuterio*

Il materiale in caduta accresce continuamente la protostella fino a quando non capita qualcosa di nuovo. Al centro la temperatura sale sino a superare 1.000.000 di °K, innescando le reazioni nucleari. La fusione nucleare non interessa l'idrogeno, per poter avvenire necessita di circa 12.000.000 °K, ma occorre ad un suo isotopo: il deuterio. Benché presente in minima parte,





2/100.000 atomi di idrogeno, l'energia prodotta è comunque elevata, tale da scaldare la stella. Le sue componenti acquistano  $E_c$  che si oppone alla energia gravitazionale espandendo la stella, fino a che questa non trova un nuovo equilibrio. Una protostella che andrà a costituire un corpo celeste dell'ordine di  $1 M_{\odot}$  aumenta il suo raggio sino a circa  $5 R_{\odot}$ . Una stella di massa  $3 M_{\odot}$  si espanderà invece per circa  $10 R_{\odot}$ .

### 10.5.1 La trasmissione del calore

La materia presente all'interno della protostella si trova nello stato di plasma e pertanto è accoppiata con i fotoni. La trasmissione del calore per radiazione ha un rendimento molto basso. Si formano delle bolle di gas caldo, come può avvenire in una pentola d'acqua, che risalgono in superficie. Per compensazione se in una zona sale della materia, da un'altra deve scendere, generando dei vortici convettivi. (fig. 6).

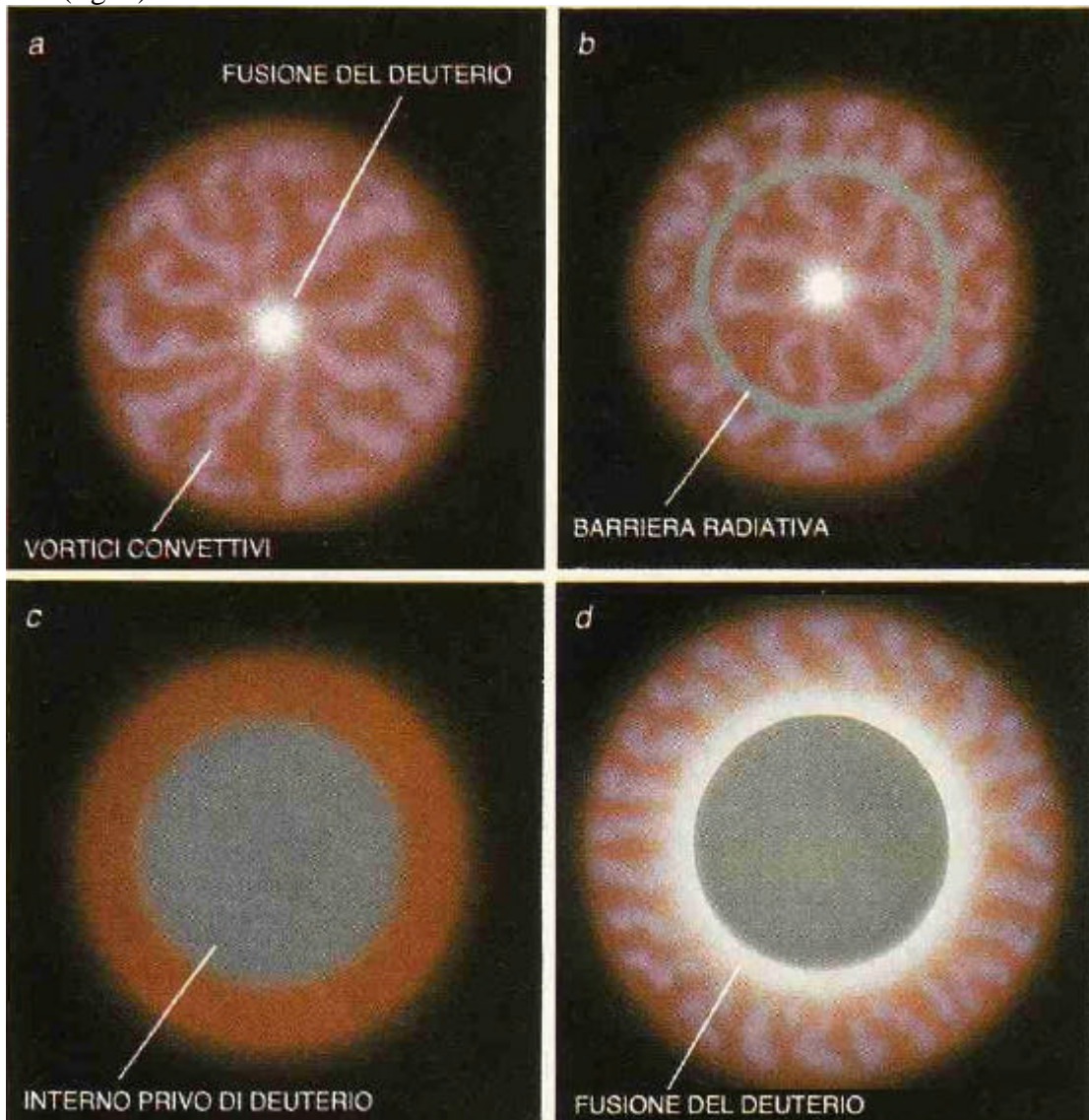


FIG. 6

In tal modo il calore riesce a raggiungere la superficie. Questo meccanismo permette oltre a scambiare calore, quello di rimescolare il materiale della stella: il materiale di accrescimento



depositato sulla superficie contiene anche deuterio, il quale viene portato al centro della stella alimentando le reazioni di fusione nucleare. Se la protostella accumula materia da raggiungere una massa, come stella,  $> 2M_{\odot}$ , si avviano meccanismi diversi. F.Palla e Steven W.Stahler hanno evidenziato che un guscio sottile di gas all'interno della protostella diventa abbastanza trasparente alla radiazione, denominata barriera radiativa, da trasportare il calore per irraggiamento anziché per convezione. La zona convettiva pertanto non raggiunge la superficie della protostella, si ferma in questa regione da cui la trasmissione di calore da convettiva si trasforma in radiativa. La fusione nucleare consuma rapidamente tutto il deuterio disponibile all'interno, il nuovo deuterio che cade sulla stella non circolando si accumula sulla superficie. Se non ci fossero altri fenomeni la contrazione porterebbe rapidamente a raggiungere temperature sufficienti per la fusione dell'idrogeno e la stella arriverebbe in sequenza principale mentre ancora accresce materia. Ma abbiamo che la temperatura della stella aumenta, non solo all'interno, ma in tutta la protostella, gli strati superiore a quelli centrali si riscaldano finché anche in essi si innescano reazioni di fusione nucleare del deuterio. Pertanto abbiamo che le reazioni nucleari non sono più presenti al centro della stella, privo di deuterio, ma via via si portano in un guscio (Shell) in espansione verso la superficie.

### **10.6** *Nascita della protostella*

Nel frattempo la nube in accrescimento sulla protostella comincia a esaurirsi, e di conseguenza lo stesso accade per la densità della polvere interstellare. La radiazione luminosa, della protostella, nel visibile può finalmente cominciare a filtrare attraverso la nube. Contemporaneamente se l'emissione cresce nel visibile, decresce nell'infrarosso. Quando l'intensità luminosa nel visibile diviene più alta che nell'infrarosso si rende visibile la protostella rispetto alla nube.

### **10.7** *Presequenza principale*

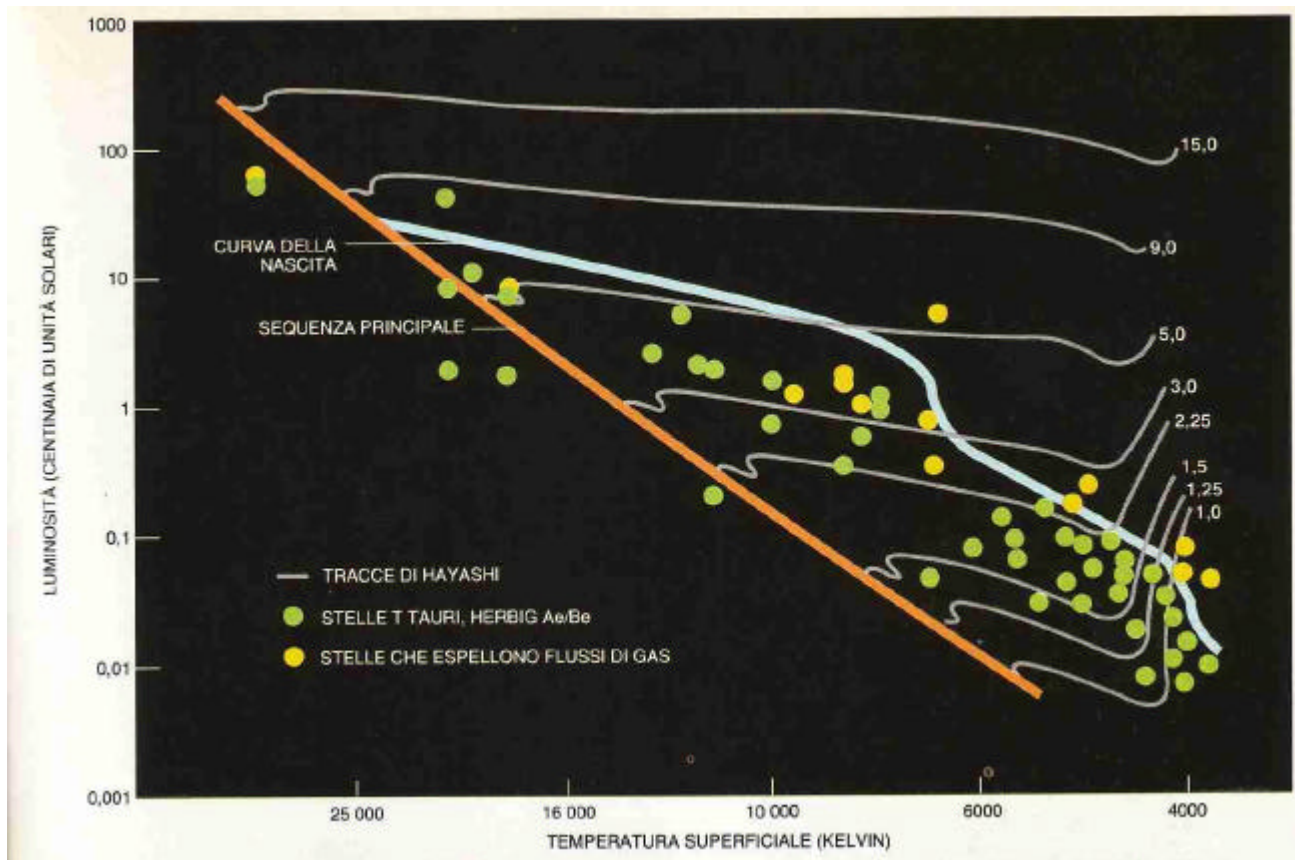
Da questo momento la protostella entra nella zona definita pre-sequenza principale e vi permane fino a quando la stella non sarà diventata matura ovvero si saranno avviati i processi di fusione nucleare dell'idrogeno, entrando così in sequenza principale. In questa fase le stelle neonate, sono molto luminose, il responsabile di tale radiazione è ancora in gran parte dovuta alla forza gravitazionale, e non alla fusione nucleare. Nella fase di pre-sequenza principale la neonata stella non presenta reazioni nucleari, il deuterio è stato esaurito. La temperatura interna della stella riscalda il gas tanto da generare una pressione che si oppone alla contrazione gravitazionale, impedendone il collasso. Il calore che genera questa pressione, però, viene irradiato dalla superficie della stella che brilla intensamente mentre si contrae a poco a poco.

### **10.8** *Tracce di Hayashi*

Studiando l'evoluzione della protostella su di un diagramma H-R (Fig. 7), si possono osservare delle tracce denominate di Hayashi, in onore a Chushiro Hayashi dell'università di Kyoto, che fu il primo a calcolare le caratteristiche delle stelle in tale fase negli anni 1970. Si accorse che per stelle di uguale massa si possono osservare dei percorsi simili ben definiti sul diagramma H-R. Da valori di masse diverse, di protostelle, si avrebbero curve di evoluzione diversa. Per protostelle di piccola massa l'intensità tende a essere superiore nelle prime fasi per poi calare. Per protostelle con massa più elevata l'intensità della luminosità rimane pressoché inalterata durante il suo ciclo di evoluzione verso la sequenza principale. Per entrambe la storia evolutiva porta ad un aumento della temperatura superficiale della protostella. A dispetto di quello che può risultare dalla lunghezza



delle tracce sul diagramma, benché il percorso sia apparentemente più lungo, per protostelle di maggior massa  $\approx 10 M_{\odot}$ , il tempo di evoluzione è di circa 100.000 anni, per protostelle di piccola massa e di circa 30 milioni di anni.



(Fig. 7)

### 10.8.1 Curva della nascita.

Steven W. Stahler nel 1983 tracciò una curva sul diagramma H-R di Hayashi, in funzione della massa della protostella, che rappresentava esattamente il momento in cui le stelle divengono visibili, pertanto quando nascono per la prima volta alla nostra vista. Da questa curva le protostelle scenderebbero poi verso la sequenza principale seguendo la traccia relativa di Hayashi. F. Pallà e Steven W. Stahler hanno dimostrato che la curva della nascita (birthline) deve intersecare in un punto preciso la sequenza principale, che si troverebbe esattamente corrispondente ad una stella di 8 masse solari. Per stelle di massa superiore abbiamo che la reazione di fusione dell'idrogeno inizia quando la stella è ancora avvolta da materia del nucleo denso in fase di collasso. Pertanto le stelle molto massicce saltano la fase di pre-sequenza principale.

### 10.8.2 Flure-up

Per una protostella opaca, quando la densità aumenta, la contrazione può essere considerata come una caduta libera adiabatica. La densità dei vari strati tendono a diminuire verso l'esterno, ma premono verso l'interno. Ciò comporta che sotto le condizioni di adiabaticità l'aumento della pressione al centro è molto rapido. Quando la contrazione procede fino ad un certo limite, il contributo gravitazionale nella regione centrale diventa confrontabile o minore del contributo





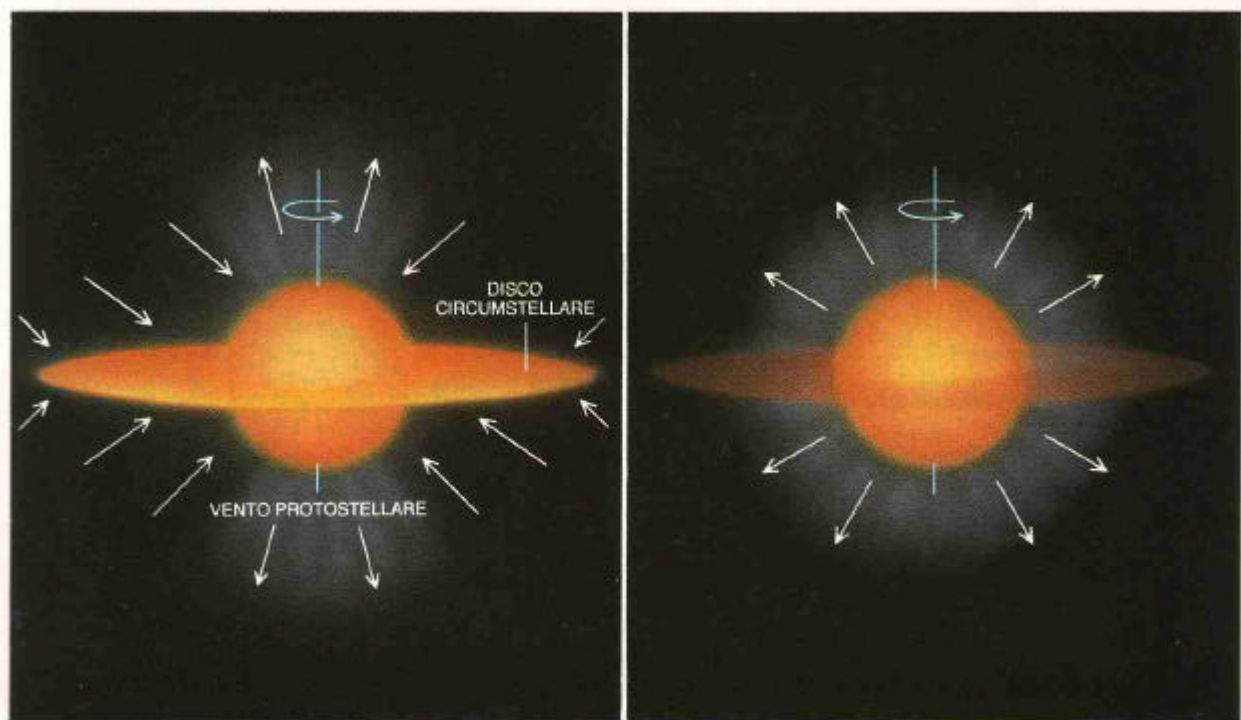
dovuto alla pressione di espansione, il risultato è un rimbalzo del core. Herbig, il 6 maggio del 1936, per circa 120 giorni, ha osservato che Fu Orionis nella regione HI ha avuto aumento improvviso di luminosità (un Flare-Up), questo fenomeno può essere interpretato come il rimbalzo del core e rappresenterebbe l'ultimo stadio dell'evoluzione dinamica del collasso della protostella. Sul diagramma HR si identifica come l'ultima parte delle tracce di Hayashi, il flesso prima di entrare nella sequenza principale.

### 10.9 *Nascita della stella*

La stella infine nascerà quando al centro della protostella la temperatura supererà i 12 milioni di gradi K. Oltre questa soglia si avviano i meccanismi di trasformazione nucleare (fusione) dall'idrogeno all'elio.

### 10.10 *Vento solare*

Il nucleo denso (della nebulosa molecolare) contiene più massa di quella che alla fine andrà a costituire la nuova stella. Pertanto vi deve essere un qualche meccanismo di espulsione della materia in eccesso. Molte osservazioni di sorgenti infrarosse presentano flussi di gas molecolare che si allontanano. Probabilmente dalla superficie della stella si forma un intenso vento che respinge tutto il gas in arrivo. Queste osservazioni probabilmente sono proprio flussi di vento protostellare.



(Fig. 8)

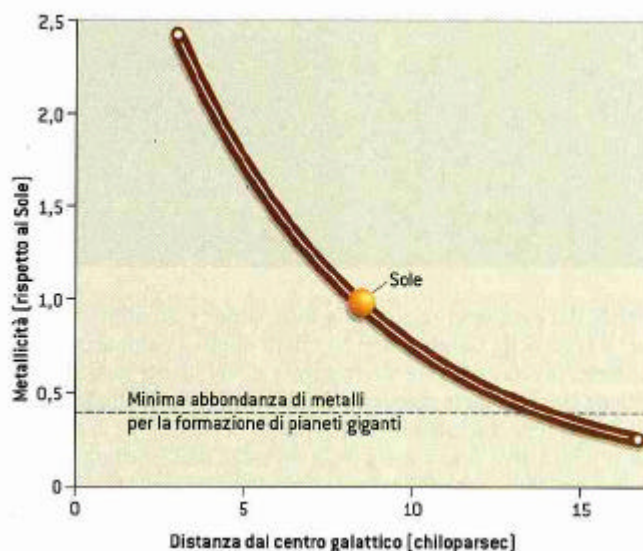
Questo vento, non ancora osservato direttamente, dovrebbe respingere verso l'esterno materia e radiazione a velocità molto maggiore del vento emesso dalle stelle della sequenza principale. La sua causa comunque resta ancora uno dei misteri che riguardano la nascita di una stella. I modelli di evoluzione stellare (Iben 1970) prevedono che le protostelle perdano massa a causa del vento solare emesso con simmetria sferica per interazione tra il flusso di radiazione della superficie e l'atmosfera stellare. Questo vento è costituito da protoni e da elettroni, e può modificare fisicamente una nube, determinando l'evoluzione e la formazione della stella. Il tasso di perdita della massa (Castor, Weaver, McGray 1975) è compreso nell'intervallo di  $10^{-5} \div 10^{-7} M_{\odot}/\text{anno}$ . Nelle vicinanze della



stella ( $\approx 100$  Milioni Km) la velocità del vento risulta essere intorno a 2000 Km/s. L'energia meccanica del vento  $E_v = 4 \cdot 10^{-1} M_{\odot}/\text{anno Km}^2/\text{s}^2$ . Momento =  $2 \cdot 10^{-4} M_{\odot}/\text{anno Km/s}$ . Il vento stellare interagisce urtando le molecole della polvere interstellare, trasferendo energia cinetica, provocando un'emissione di radiazione infrarossa. Analizzando questa radiazione si possono conoscere alcuni parametri importanti del vento stellare, come la massa e la velocità. (Fig. 8)

## 11 Formazione dei pianeti

Se il materiale in caduta ruota intorno alla protostella, si può formare un disco di accrescimento. Mentre il resto della nube collassa sfericamente sulla protostella, la velocità di accrescimento verso il piano di rotazione risulta inferiore. Pertanto il materiale in caduta ritarda il suo collasso formando un disco (Fig. 4). Per frizione sul disco i materiali più pesanti si tengono vicini alla protostella andando a formare i pianeti rocciosi, quelli più leggeri si terranno più lontani formando i pianeti gassosi. Analisi recenti hanno permesso di evidenziare che se nel disco non sono presenti i metalli non si possono formare pianeti. Osservazioni effettuate sul campo della ricerca di pianeti extrasolari hanno permesso di confermare che in un sistema stellare, se la presenza di metalli scende sotto la soglia del 40% rispetto a quella del nostro sistema solare, non si osservano pianeti giganti. Ad oggi possiamo confermare solo questa affermazione perché la tecnologia dei telescopi a disposizione non ha la risoluzione sufficiente per permettere di rilevare piccoli pianeti come quelli terrestri. Ma è evidente come il solo gas non potrebbe collassare a formare dei pianeti in quanto occorre soddisfare il criterio di Jeans. I metalli sotto forma di molecole invece possono aggregarsi a formare grani sempre più grossi, e per frizione sul disco in caduta possono unirsi a formare pianeti. Pertanto in un sistema solare in formazione se non vi è la presenza di una determinata percentuale di metalli il disco di accrescimento non formerà pianeti. Come già detto precedentemente l'apporto di metalli è dato grazie all'esplosione di supernove. Nelle galassie abbiamo che la presenza di metalli è superiore al centro per poi diminuire verso la periferia (Fig. 9).

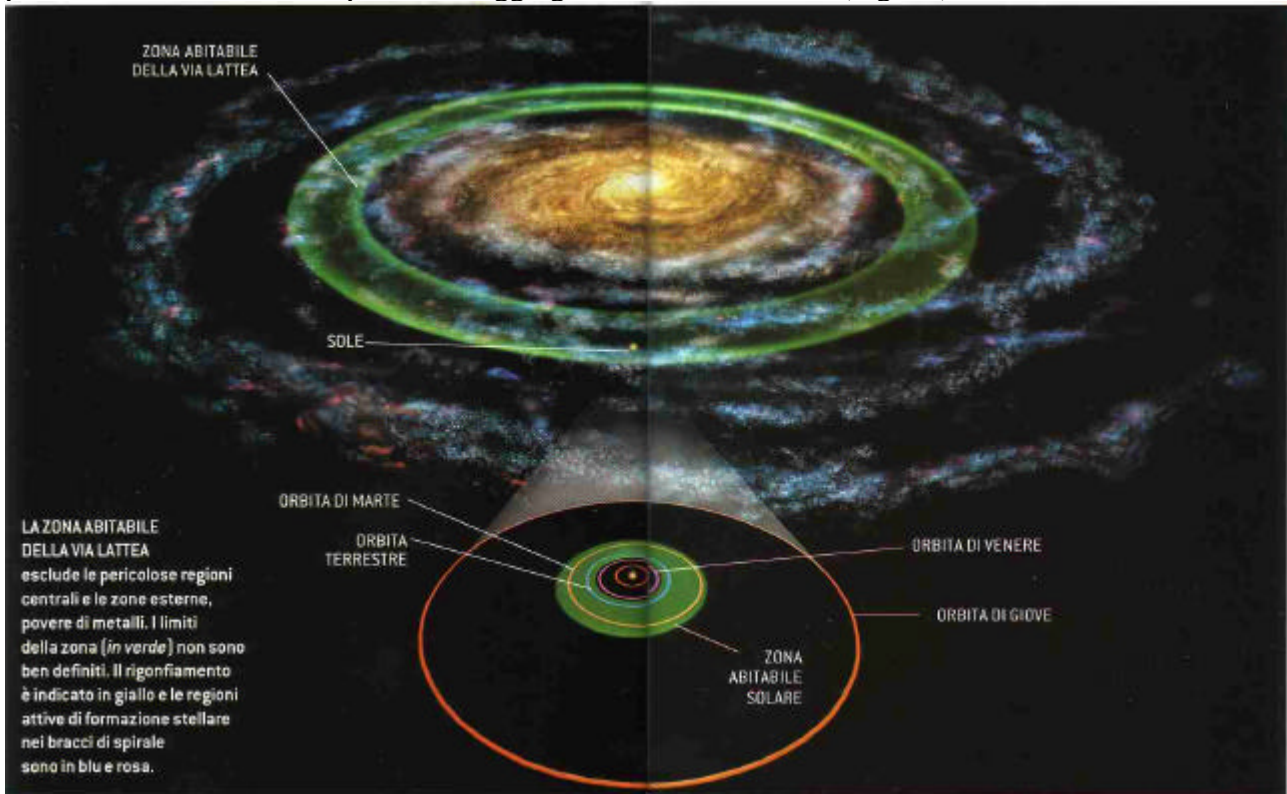


(Fig. 9)

La presenza di metalli nell'universo, lo dobbiamo ai processi di nucleosintesi che avvengono all'interno delle stelle. Questi metalli vengono resi a disposizione quando una stella di massa elevata si trova negli ultimi stadi evolutivi ed esplose come una supernovae. Le supernove si trovano con maggior frequenza all'interno delle galassie e pertanto andranno ad aumentare la percentuale di



metallicità in misura maggiore verso il centro. Verso il centro galattico però, la densità delle stelle è molto elevata; se si formassero dei pianeti intorno alle protostelle, dopo qualche rivoluzione le mutue interazione fra più stelle renderebbero tali orbite instabili. Possiamo perciò affermare che all'interno di una galassia esiste una fascia per cui i dischi di accrescimento porteranno alla formazione di pianeti sulle protostelle. Troppo vicino avremo orbite instabili, troppo lontano la percentuale di metalli non permette l'aggregazione della materia. (Fig. 10).



(Fig. 10)

Ma dato che più il tempo passa e maggiori sono le esplosioni delle supernove nelle galassie, la percentuali dei metalli si trova in accrescimento, e quindi la zona di presenza dei pianeti si dovrebbe propagare verso le regioni estreme della galassia. Inoltre visto che l'universo si sta raffreddando, in futuro è prevista la formazione in maggioranza di stelle di piccola massa, che non presentando un intenso vento solare permettono la presenza di un disco interstellare. Se abbiamo la pazienza di poter aspettare qualche decina di miliardi di anni potremo assistere ad una maggior presenza di formazione dei pianeti nell'universo. Più il tempo passa e maggiore si presenterà la percentuale di formazione di sistemi di tipo solare.

## 12 Classificazione delle stelle in formazione

Attualmente possiamo identificare 2 classificazioni principali per le stelle in formazione:

1. Classificazione per massa
2. Classificazione per emissione spettrale



## 12.1 **Classificazione per massa**

Le stelle in formazione sono suddivise per massa nel seguente modo:

- T Tauri Massa  $< \approx 1 M_{\odot}$ 
  - Fu Orionis
- Herbig Haro Massa  $> \approx 2 M_{\odot} - 20 M_{\odot}$ 
  - Ae
  - Be

### 12.1.1 **T Tauri**

Le stelle T Tauri sono state scoperte nel 1945 da Alfred Joy, e il loro nome deriva dal primo oggetto classificato come appartenente a questa categoria, la stella T della costellazione del Toro. Gruppo di stelle, fra quelle giovani, finora il più studiato, sono stelle variabili irregolari. Durante la maggior parte dell'evoluzione di pre-sequenza principale le protostelle sono circondate da dischi circumstellari. Nella fase di accrescimento, al centro della stella, la temperatura raggiunge valori di qualche milione di gradi, innescando le prime reazioni nucleari del deuterio. Ma, non avendo ancora raggiunto un completo equilibrio interno, l'emissione luminosa, può subire continui e talvolta improvvisi mutamenti. La stella in questo caso diventa una variabile, definita appunto di tipo T Tauri. Per cause ancora ignote si arresterebbe l'accrescimento di materia sulla protostella e si svilupperebbe un vento stellare, con velocità dell'ordine di alcune decine di Km/sec e di portata di miliardi di tonnellate/sec. Tale vento è in grado di spazzare le polveri residue della nebulosa iniziale. L'origine del vento stellare probabilmente è dovuto all'accensione delle reazioni del deuterio. Le variabili T Tauri presentano le seguenti differenze che le distinguono dalle stelle della stessa massa ma appartenenti alla sequenza principale:

1. Variabilità irregolare della luminosità su scale di tempi che vanno da qualche ora a qualche mese
2. Eccesso di emissione infrarossa o ultravioletta
3. Venti stellari intensi, o il residuo in forma di massa espulsa nella fase protostellare.

Nelle prime fasi possono essere confuse con le stelle giganti ma possono essere distinte per:

1. Sono immerse in nubi di gas e polvere.
2. Presentano spettri dominati da righe di emissione, indice di attività coronale intensa.
3. Presentano venti stellari anomali.
4. A causa di mancato equilibrio interno presentano variazioni di luminosità erratiche e veloci.
5. Si osserva abbondanza di litio, che normalmente viene consumato nelle stelle.

### 12.1.2 **Fu Orionis**

Gli oggetti FU Orionis, conosciuti anche come FUors, si presentano come stelle attive in formazione. Sono una sottoclasse delle stelle T Tauri il cui disco ha subito un rapido burst di accrescimento. Per cause ancora ignote si arresterebbe l'accrescimento di materia sulla protostella e si svilupperebbe un vento stellare, con velocità dell'ordine di alcune decine di Km/sec e di portata di miliardi di tonnellate/sec. Tale vento è in grado di spazzare le polveri residue della nebulosa iniziale, liberando la protostella dal disco di accrescimento residuo. L'origine del vento stellare probabilmente è dovuto all'accensione delle reazioni del deuterio. In queste stelle i fenomeni eruttivi si presentano in modo più accentuato e violento. Come le T Tauri sono stelle variabili irregolari: presentano un aumento della loro luminosità di diverse magnitudini su scale di tempo da





mesi ad anni. La loro luminosità aumenta da qualche decina a qualche centinaia di  $L_{\odot}$ . Per questi motivi tali oggetti presentano una perdita di massa con caratteristiche esplosive.

### 12.1.3 Herbig Haro

Oggetti di presequenza classici, visibili a radiazione ottica, con masse superiori a quella del sole, di massa intermedia da 2 Ms a 20 Ms. Il nome deriva dagli studiosi George Herbig dell'università dell'Hawaii, pioniere dello studio osservativo delle stelle giovani, e Haro. Questo tipo di oggetti si possono suddividere ulteriormente in base al tipo spettrale in:

- oggetti Herbig Ae ( $\approx 10.000$  °K)
- oggetti Herbig Be ( $\approx 20.000$  °K)

Contrariamente alle T-Tauri, in molte stelle HAe/Be non si osservano dei dischi circumstellari durante la fase di pre-sequenza principale. Per cause ancora ignote si arresterebbe l'accrescimento di materia sulla protostella e si svilupperebbe un vento stellare, con velocità dell'ordine di alcune decine di Km/sec e di portata di miliardi di tonnellate/sec. Tale vento è in grado di spazzare le polveri residue della nebulosa iniziale. L'origine del vento stellare probabilmente è dovuto all'accensione delle reazioni del deuterio. Il vento stellare è caratterizzato da emissioni di intensi getti di gas dalle regioni polari (Jet). Ad oggi non vi è evidenza che il materiale del disco evolva durante la fase di pre-sequenza principale tra  $10^5$  e  $10^7$  anni. Dopo questo periodo si possono osservare un gran numero di stelle HAe con dischi massicci anomali, come le stelle di tipo Vega, che dopo la dissipazione del disco iniziale di gas e polvere, conservano un disco secondario (debris disk). Le stelle di Herbig Ae/Be si trovano relativamente isolate ed estranee ai grandi complessi di formazione stellare. In alcuni oggetti HH troviamo associati fenomeni di emissione masers  $H_2O$ .

## 12.2 Classificazione per Spettro

Le stelle in formazione si possono suddividere a secondo dello spettro osservato. Lada, analizzando oggetti giovani nelle vicine regioni di formazione stellare di Taurus e Ophiuchus, cioè nubi molecolari oscure attorno a 140 pc di distanza, con stelle in formazione di circa 1 massa solare, nel 1987 propose che potevano essere separati in 3 classi distinte, basandosi sulla forma dello spettro tra  $2 \mu\text{m}$  (NIR) e  $12 \mu\text{m}$  (IRAS). Con esattezza si prende a riferimento la pendenza della emissione spettrale rappresentata con il parametro  $\alpha$  chiamato indice di colore:

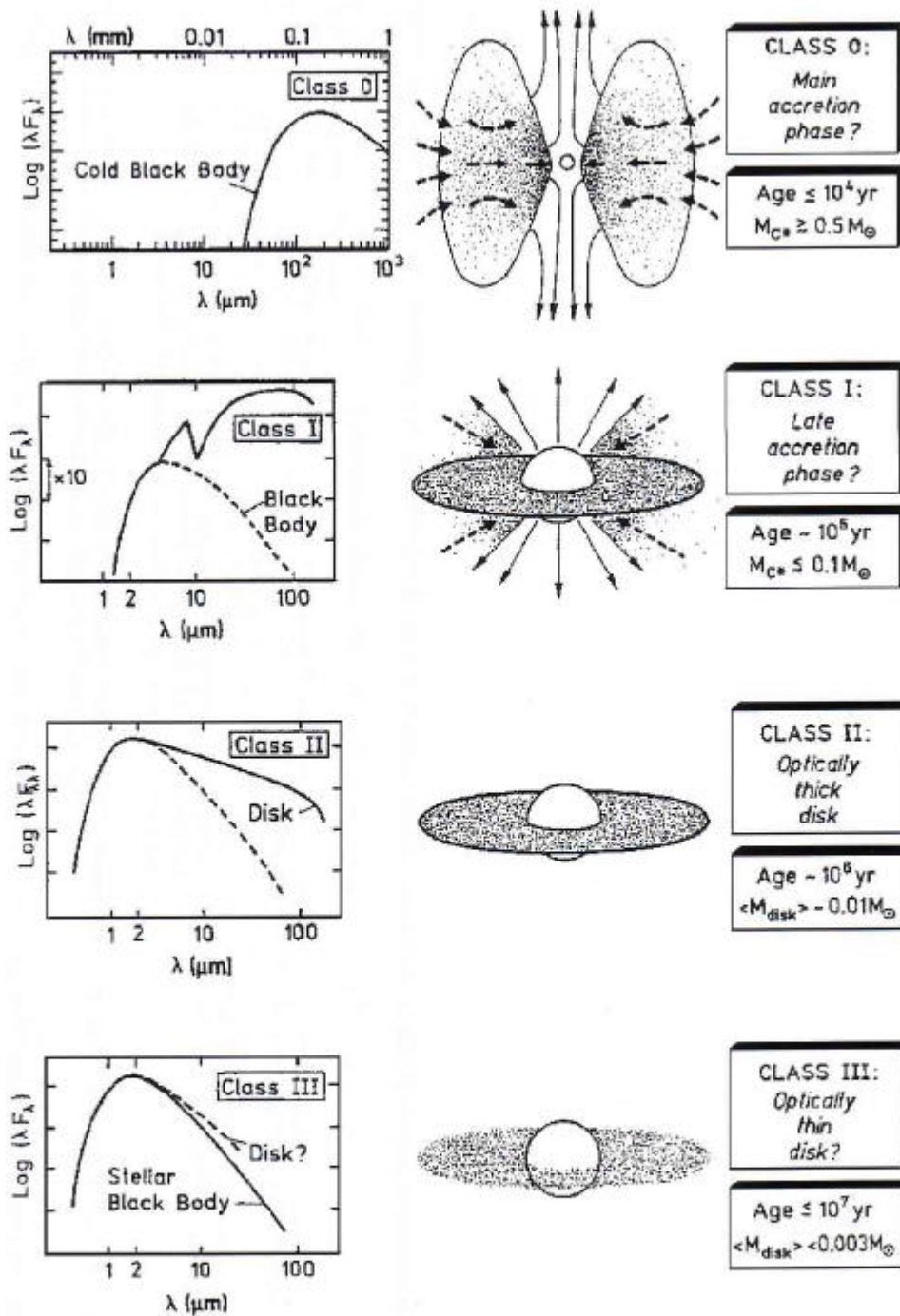
$$a = \frac{-d \log(I_{F1})}{d \log I}$$

In pratica la classificazione è riferita alla banda di frequenza su cui è distribuita l'energia (Fig. 11). Le stelle più giovani presentano un'emissione nell'infrarosso, mentre le più vecchie è nel visibile. Successivamente si è dovuto aggiungere una nuova classe, la classe 0, rilevabile a lunghezza d'onda inferiore ai  $20 \mu\text{m}$ , per stelle non visibili nel NIR. Pertanto abbiamo la seguente suddivisione:

- Classe 0
- Classe I
- Classe II
- Classe III

Da questo tipo di classificazione possiamo dedurre a quale fase di evoluzione la protostella si trova.





**Figura 1.1:** *Classificazione evolutiva degli oggetti stellari giovani (adattato da Palla 1996). Sulla base della distribuzione spettrale di energia (a sinistra) e della quantità di materiale circumstellare (a destra).*

(Fig. 11)



### 12.2.1 Classe 0

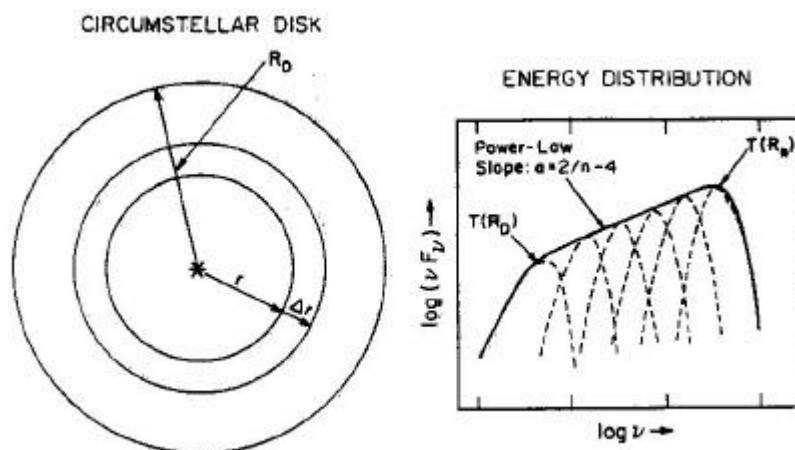
Sono state individuate stelle primitive e distinte da quelle di classe I, rendendo necessaria l'introduzione una nuova classe, la "0" (André et al. 1993), nella quale si evidenziano protostelle giovani ( $t < 10^{-5}$  anni), che presentano uno spettro di corpo grigio con  $T \sim 10-30$  K. La stella prototipo è la VLA1623 nella quale si ha un'emissione osservabile solo a lunghezze d'onda superiori a  $10\mu\text{m}$ . L'indice di colore è più alto degli oggetti di classe I. Le protostelle individuate in questa classe si presentano nei loro primissimi stadi di evoluzione circondate da concentrazioni di polvere interstellare, della nube del nucleo denso in collasso, che oscurano il corpo centrale.

### 12.2.2 Classe I

Presentano un indice di colore  $\alpha > 0$  con distribuzione spettrale che cresce fino a oltre i  $10-20\mu\text{m}$ . Protostelle giovani, in fase principale di accrescimento e formazione e pertanto avvolta da un denso involucro circumstellare. Visibili solo nell'infrarosso, la radiazione ottica è completamente assorbita dalla polvere e dal gas che circondano la protostella, ma comincia a farsi evidente una sua parte. Fino a poco tempo fa si riteneva che gli oggetti di classe I fossero in una fase estremamente primitiva di formazione, ovvero quando ancora la sua massa è ancora in maggioranza contenuta nelle regioni circostanti del disco di accrescimento. Recenti osservazioni hanno però osservato che la massa sia già concentrata sull'oggetto centrale. Misure effettuate nel millimetrico e submillimetrico, (André, Montmerle 1994) evidenziano che la massa negli involucri circumstellari è inferiore alla massa della stella centrale, e pertanto la stella è ormai vicina alle fasi finali di accrescimento. Le sorgenti di classe I sono abbastanza numerose nelle regioni di formazione stellare.

### 12.2.3 Classe II

Presentano un indice di colore compreso tra  $2 < \alpha < 0$  con distribuzione spettrale piatta e debolmente decrescente al crescere di  $\lambda$  (Fig 12). Le polveri della nube protostellare si sono assottigliate e si osserva principalmente l'emissione della protostella centrale circondata da un disco molto denso. Il disco di accrescimento assorbe buona parte della radiazione, la temperatura di ciascun anello è dipendente dalla distanza dalla protostella. Ciascuno emetterà una radiazione tipica di corpo nero dovuta alla temperatura caratteristica, lo spettro complessivo risulta la somma dell'emissione di ogni singolo corpo nero.



(Fig 12)



### 12.2.4 Classe III

Presentano un indice di colore  $\alpha < -2$  con distribuzione spettrale che cala al crescere di  $\lambda$ , quasi come quello di un corpo nero. Protostelle vicino alla sequenza principale, lo spettro è dovuto a fotosfere stellari arrossate. Sorgenti di classe II ove il disco di accrescimento si è disperso.

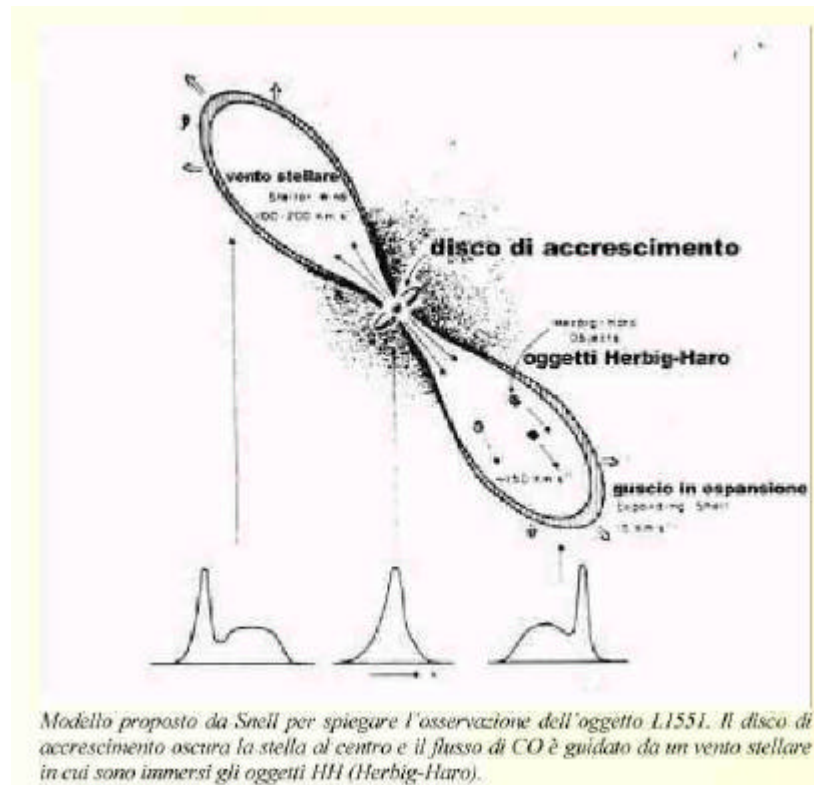
## 13 Varie

Vari fenomeni sono associati a stelle in formazione, come:

1. Jet
2. Maser
3. Molecular Outflow
4. ed altri

### 13.1 Jet

Si tratta di emissione di materia (getti stellari) a velocità elevata di forma geometrica bipolare, in regioni polari della protostella, con angolo di propagazione molto stretto (collimato) (Fig.13). Se la protostella in accrescimento conservasse il momento angolare iniziale del sistema, dovrebbe ruotare a velocità maggiore della velocità di rottura. Il momento angolare viene portato via da jet collimati di gas ad alta velocità in direzione perpendicolare a quella del disco dall'azione dei campi magnetici. Per spiegare la geometria dei getti sono stati proposti diversi modelli ma purtroppo le teorie non rispondono ancora pienamente alle osservazioni fatte. I modelli stimati più interessanti e completi sono stati sviluppati da Uccida, Shibata 1985, da Pudritz nel 1986, e da Colin, Pudritz e Normann 1986.



(Fig.13)



I getti di emissione bipolari sarebbero messi in relazione con il disco molecolare ruotante e la sua magnetizzazione. Questo modello giustifica la caratteristica della collimazione del getto e della dissipazione del momento angolare. Uccida e Low nel 1981 hanno teorizzato che quando una nube si contrae per formare una protostella, in presenza di un campo magnetico attorno alla nube stessa, le linee di forza che la attraversano si modificano: esse non sono più dritte, ma si piegano nella zona del collasso. Secondo Friend e MacGregor per una stella giovane, che ruota, avvolta in un campo magnetico, il vento protostellare è soggetto alla forza di Lorentz, la quale aumenta la sua velocità andando dall'equatore ai poli. La forza di Lorentz, che dipende dalla velocità delle particelle e dal campo magnetico, intrappola le particelle cariche facendole ruotare attorno alle linee del campo, accelerandole, con moto elicoidale. La conseguenza è che il flusso del vento è maggiore ai poli.

### **13.2 Maser**

In zone di formazione stellare si possono trovare fonti di Maser. I maser sono stati scoperti solo dopo che è stato conosciuto l'effetto laser. Nessuno pensava che nello spazio vi potessero essere le condizioni per poter produrre tale effetto. I maser galattici sono associati a fasi estremamente particolari, e tuttora non completamente comprese, dell'evoluzione stellare. I maser sarebbero la conseguenza di interazioni tra le stelle e l'ambiente circostante. Uno dei principali problemi sotto indagine è cercare di spiegare il rifornimento di energia che produce la luminosità osservata. Il problema è capire se la sorgente che provoca il maser è locale o prodotta da altre stelle tramite fenomeni di outflows o jets. Al fine della ricerca, sui maser, vengono eseguite osservazioni nello spettro dell'infrarosso, poiché si osservano stelle nelle prime fasi dell'evoluzione. Recentemente sono state effettuate osservazioni interferometriche di regioni maser, con elevata risoluzione spaziale, per maser H<sub>2</sub>O (22 Ghz) e per maser OH. La maggior parte dei maser H<sub>2</sub>O associati a regioni di formazione stellare si sviluppano vicino, circa 10<sup>14-16</sup> cm, da protostelle di grande massa. Intorno al 90% dei maser, sono stati individuati sorgenti infrarosse con un picco di emissione nel vicino infrarosso (2,2 μm), tipico di oggetti giovani.

**FINE DOCUMENTO**