

## **Capítulo 5**

# **FORMAÇÃO DE ESTRELAS**

José Williams Vilas Boas

---

Revisão de junho/2007

E-mail: [williams.boas@inpe.br](mailto:williams.boas@inpe.br)

---

# FORMAÇÃO DE ESTRELAS

---

## Sumário

<b>5.1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>4</b>
<b>5.2. ONDE NASCEM AS ESTRELAS?.....</b>	<b>5</b>
<b>5.3. ONDE ESTÃO AS NUVENS MOLECULARES. ....</b>	<b>8</b>
<b>5.4. COMO NASCEM AS ESTRELAS?.....</b>	<b>10</b>
5.4.1. EMISSÃO DE CORPOS DE BAIXAS TEMPERATURAS.....	12
5.4.2. O COLAPSO DOS GLÓBULOS.....	14
5.4.2.1. MASSA CRÍTICA E TEMPO DE COLAPSO.....	16
5.4.2.2. QUAL O PAPEL DO CAMPO MAGNÉTICO NO COLAPSO?.....	17
5.4.2.3. QUAL O PAPEL DAS SUBSTÂNCIAS QUÍMICAS?.....	19
<b>5.5. CONSEQUÊNCIAS DO NASCIMENTO DE UMA ESTRELA.....</b>	<b>20</b>
5.5.1. ESTRELAS MASSIVAS O E B (M DA ORDEM DE 10 MASSAS SOLARES)....	21
5.5.2. ESTRELAS DE PEQUENA MASSA (M DA ORDEM DE 1 MASSA SOLAR) ....	23
5.5.3. ROTAÇÃO DAS NUVENS.....	24
<b>5.6. BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>25</b>

## Lista de Figuras

**FIGURA 1** - REPRESENTAÇÃO ESPACIAL DA MOLÉCULA DE CO.

**FIGURA 2** -DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS NUVENS MOLECULARES GALÁXIA,  
DETERMINADA A PARTIR DE CONTAGEM DE ESTRELAS  
(CAMBRÉSY ET AL. 1999)

**FIGURA 3** – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO AQUECIMENTO DA REGIÃO  
CENTRAL DE UM GLÓBULO POR UMA ESTRELA EM SEUS  
ESTÁGIOS PRIMORDIAIS.

**FIGURA 4** – IMAGENS ÓPTICA, INFRAVERMELHO E RÁDIO DO GLÓBULO  
COMETÁRIO VG33.

**FIGURA 5** – REPRESENTAÇÕES FÍSICA (5A) E MATEMÁTICA (5B) DA  
COMPETIÇÃO ENTRE OS MECANISMOS QUE PODEM INIBIR  
OU DESENCADear O COLAPSO DE UM GLÓBULO.

**FIGURA 6** – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS ESTÁGIOS  
EVOLUTIVOS DO COLAPSO DE UM GLÓBULO.

**FIGURA 7** – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS ESTÁGIOS POSTERIORES AO  
NASCIMENTO DAS ESTRELAS.

## 5.1. INTRODUÇÃO

As tentativas mais antigas para explicar o que poderia ser uma estrela, datam de antes de Cristo. Como em outras áreas do conhecimento, a contribuição dos filósofos antigos para o entendimento do universo não poderia deixar de ser mencionada mesmo em relação a esse problema tão específico que é o nascimento de uma estrela. Abaixo seguem as idéias de alguns desses pensadores, as quais exibem uma profunda relação entre suas experiências com o mundo palpável e a suas capacidades de transcendência. Merece destaque o pensamento de Anaximandro (610 a.c.) segundo o qual “*O Sol e a Lua são anéis de fogo circundados pelo ar*” e de seu discípulo Anaximenes que propunha que “O ar é a substância básica da qual se originaram todas as coisas”. Proposições apoiadas em conceitos mais abstratos também foram apresentadas, dentre as quais se destaca a proposta de Heráclito de que o Universo se equilibrava entre duas forças e que o fogo tinha primazia como agente de mudanças. Ele afirmava que o “Os corpos celestes são taças contendo fogo”. Outras propostas, invocando a idéia de um criador, foi apresentada por Anáxagora (476 a.c.) e sugeria que “No princípio o Universo era uma mistura uniforme sem movimento. A “mente” entrou em ação e fez com que todo o sistema girasse; no vórtice resultante a matéria fria, densa e escura ficou no centro, dando origem à Terra, enquanto toda a matéria quente, seca e rarefeita era expulsa. O Sol, e a Lua foram arrancados da Terra e aquecidos por fricção enquanto giravam no redemoinho de matéria”. Ainda antes de Cristo, Empedocles tentou interpretar o Universo como sendo composto dos elementos básicos do mundo (terra, ar, água e fogo) mais uma força de atração (*amor*) e uma força de repulsão (*ódio*).

Antes de partir para as idéias que surgiram durante o Renascimento, após um longo período de estagnação do pensamento humano sobre o universo, vale a pena mencionar o pensamento do chinês Chi Meng (25 a 250 d.c.), segundo o qual “O céu era vazio e sem substância...não tendo fronteiras. O Sol e a Lua e as estrelas flutuavam no espaço”. Essa é uma concepção bastante avançada do Universo e uma das ultimas de que se tem conhecimento após a humanidade mergulhar na Idade Média. Mesmo assim ela, como algumas outras, não discute a natureza das estrelas.

Finalmente, **Laplace** (1749-1827) propôs que o Sistema Solar nasceu de uma nuvem de gás primitiva em rotação (Nebulosa Solar). Esse modelo estabeleceu a relação definitiva, comprovada posteriormente, entre o nascimento de uma estrela e uma nuvem de gás progenitora. Devido à similaridade entre as proposições, vale a pena mencionar o pensamento dos filósofos pré-socráticos Anaximandro e Anaximenes (~600 a.c.) segundo os quais “A Terra e todo corpo material se formaram da condensação de uma massa de ar giratória”.

Dessa forma, surge a seguinte questão:

*Se as estrelas se formaram de uma nuvem progenitora, onde está essa nuvem ou o que restou dela?*

*Todas as estrelas já estão formadas ou ainda existem estrelas se formando?*

## **5.2. ONDE NASCEM AS ESTRELAS?**

Parece simples a idéia de Laplace de que uma estrela tem como progenitora uma nuvem de gás. Hoje essa idéia é bem aceita, mas para que isso acontecesse houve uma discussão relacionada com a existência dessas nuvens, que se arrastou por centenas de anos. Embora fosse fácil ver as estrelas devido a seus brilhos intensos, não era fácil observar as nuvens de gás e provar que as estrelas nasciam dentro delas.

A primeira observação direta dessas nuvens foi feita por John Hartman em 1904. Ele observou linhas espectrais na direção de muitas estrelas as quais não pareciam se originarem nas estrelas. Apesar dessa descoberta, sugerir a existência de um gás no espaço interestelar, somente 18 anos mais tarde é que a comunidade científica aceitou a hipótese de que essas emissões poderiam ser geradas em uma nuvem de gás localizada na vizinhança das estrelas. Descartavam totalmente a hipótese de que essas linhas poderiam ter sido geradas em uma nuvem de gás localizada entre o sistema solar e as estrelas que estavam sendo observadas. Apenas no início da década de 60 é que essa questão foi definitivamente resolvida. Nessa época, vários átomos e moléculas simples

(H, H<sup>+</sup>, Na, Ca, CH, CH<sup>+</sup>, e CN) tinham sido observados no espaço entre as estrelas, consolidando definitivamente a hipótese de que as nuvens interestelares realmente existiam. Dentre essas substâncias, as observações de Hidrogênio mostraram que não só existiam nuvens interestelares, como também um gás tênue preenchendo quase toda a Galáxia.

Com esse resultado, a comunidade científica não tinha com duvidar da existência dessas nuvens. Mesmo assim, ainda argumentavam que elas não poderiam ser densas o suficiente para conter moléculas complexas, poli-atômicas. Essa hipótese também foi descartada ainda no final da década de 60, quando cientistas da universidade de Berkley, California, observaram emissões das moléculas de água (H<sub>2</sub>O) e amônia (NH<sub>3</sub>) em nuvens de gás localizadas na direção do centro de nossa Galáxia, provando assim que nessas nuvens existiam moléculas poliatômicas. Finalmente, foi estabelecido que as nuvens interestelares, realmente existiam.

Com o grande progresso tecnológico da microeletrônica a partir da década de 60, ocorreu uma evolução considerável no conhecimento das nuvens moleculares. Para se ter uma idéia desse progresso, da década de 70 até os dias de hoje, foram descobertas mais de 110 moléculas nessas nuvens interestelares, algumas muito simples contendo dois átomos, até aquelas mais complexas contendo mais de 15 átomos (Tabela I). Moléculas ainda maiores foram descobertas recentemente sob a forma de grãos sólidos contendo várias dezenas de átomos, denominadas Hidrocarbonetos Poli-Aromáticos (HPA).

Para que algumas dessas moléculas sejam formadas, são necessárias regiões com densidades muito altas ( $10^{6.7} \text{ cm}^{-3}$ ), indicando que essas nuvens não são objetos de densidade homogênea.

Agora, conhecendo com mais detalhe a constituição das nuvens interestelares, pode-se retornar às hipóteses de Laplace e dos pré-socráticos Anaximandro e Anaximenes, e procurar em nossa Galáxia as nuvens moleculares para verificar se as estrelas realmente nascem dentro delas e como se dá esse processo.

**TABELA I - MOLÉCULAS INTERESTELARES E  
CIRCUNSTELARES IDENTIFICADAS**

H <sub>2</sub> (IV)	<b>CO</b>	NH <sub>3</sub>	CS	NaCl*
HCl	SiO	SiH <sub>4</sub> * (IV)	SiS	AlCl*
<b>H<sub>2</sub>O</b>	SO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> (IV)	H <sub>2</sub> S	KCl
N <sub>2</sub> O	OCS	CH <sub>4</sub>	PN	AlF*
HF				

**Nitrilos e derivados de Acetileno.**

UV)	C <sub>3</sub> (IV),	HCN	CH <sub>3</sub> CN	HCN	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (IV)
	C <sub>5</sub> (IV)	HC <sub>3</sub> N	CH <sub>3</sub> C <sub>3</sub> N	<b>HNCO</b>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (IV)
	C <sub>3</sub> O	HC <sub>5</sub> N	CH <sub>3</sub> C <sub>5</sub> N	HNCS	
	C <sub>3</sub> S	HC <sub>7</sub> N	CH <sub>3</sub> C <sub>2</sub> H	HNCCC	
		HC <sub>11</sub> N	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> C	HCCNC	
			N		
		HC <sub>2</sub> CHO	CH <sub>3</sub> CHC		
			N		

**Aldeídos, Alcool, Esteres, Acetonas, Amidos e moléculas relacionadas.**

H <sub>2</sub> CO	<b>CH<sub>3</sub>OH</b>	<b>HCOOH</b>	CH <sub>2</sub> NH	CH <sub>2</sub> CC
H <sub>2</sub> CS	<b>CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>O</b>	HCOOCH	CH <sub>2</sub> NH <sub>2</sub>	CH <sub>2</sub> CCC
<b>CH<sub>3</sub>CHO</b>	H	<sub>3</sub>		
NH <sub>2</sub> CHO	CH <sub>3</sub> SH	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> O	NH <sub>2</sub> CN	
	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CO	H <sub>2</sub> CCO	CH <sub>3</sub> COO	
			H	

**Moléculas Cíclicas**

C <sub>3</sub> H <sub>2</sub>	SiC <sub>2</sub>	c-C <sub>3</sub> H	CH <sub>2</sub> OCH <sub>2</sub>	
-------------------------------	------------------	--------------------	----------------------------------	--

**Ions Moleculares**

CH <sup>+</sup> (VIS)	HCO <sup>+</sup>	HCNH <sup>+</sup>	H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>	HN <sub>2</sub> <sup>+</sup>
HCS <sup>+</sup>	HOCO <sup>+</sup>	HC <sub>3</sub> NH <sup>+</sup>	HOC <sup>+</sup>	H <sub>3</sub> <sup>+</sup> (IV)
CO <sup>+</sup>	H <sub>2</sub> COH <sup>+</sup>	SO <sup>+</sup>		

**Radicais**

OH	C <sub>2</sub> H	CN	C <sub>2</sub> O	C <sub>2</sub> S
CH	C <sub>3</sub> H	C <sub>3</sub> N	NO	NS
CH <sub>2</sub>	C <sub>4</sub> H	HCCN*	SO	SiC*
NH (UV)	C <sub>5</sub> H	CH <sub>2</sub> CN	HCO	SiN*
NH <sub>2</sub>	C <sub>6</sub> H	CH <sub>3</sub> N	MgNC	CP*
HNO	C <sub>7</sub> H	NaCN	MgCN	
C <sub>6</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>8</sub> H	C <sub>5</sub> N		

NOTAS. O (\*) SIGNIFICA QUE A SUBSTÂNCIA QUÍMICA FOI OBSERVADA NO ENVOLTÓRIO DE GÁS DE UMA ESTRELA. IV, UV E VIS SIGNIFICA QUE ESSAS SUBSTÂNCIAS FORAM OBSERVADAS ATRAVÉS DE SUAS EMISSÕES NO INFRAVERMELHO, ULTRAVIOLETA E VISÍVEL. TODAS AS OUTRAS FORAM OBSERVADAS ATRAVÉS DE SUAS EMISSÕES EM ONDAS DE RÁDIO. EM NEGRITO ESTÃO INDICADAS ALGUMAS MOLÉCULAS OBSERVADAS EM GELOS.

### 5.3. ONDE ESTÃO AS NUVENS MOLECULARES.

Dentre as várias moléculas listadas na tabela I, o monóxido de carbono (CO) foi uma das mais utilizadas para se estudar as nuvens moleculares distribuídas em nossa galáxia. Essa molécula é importante porque é muito abundante nas nuvens de gás e emite radiação em regiões de baixíssimas temperaturas ( $\sim 50$  K ou  $-223$  °C) com densidades típicas das nuvens interestelares ( $\sim 10^2$  cm<sup>-3</sup>). Embora a densidade dessas nuvens seja muito baixa, se comparada à densidade da atmosfera na superfície da Terra ( $>10^{18}$  cm<sup>-3</sup>), ela é alta se comparada com muitas regiões de nossa galáxia, onde a densidade é inferior a uma partícula por centímetro cúbico.

A Figura 1 mostra a representação espacial da molécula de CO. Da mesma forma que os elétrons, toda vez que uma molécula salta de um nível superior de energia para um nível inferior ela emite radiação. O pulo da molécula de CO do segundo para o primeiro nível de energia, gera radiação em comprimentos de onda de rádio, que tem a característica de se propagar nos meios mais variados sem sofrer muita interferência.

Na Figura 2 é mostrada a distribuição das nuvens moleculares na nossa galáxia como visto do Sistema Solar. Essas nuvens podem ser subdivididas em dois grandes grupos, que recebem o nome de **nuvens moleculares gigantes** e **nuvens escuras**. As nuvens moleculares gigantes têm massas maiores do que 10 milhões de massas solares e as nuvens escuras têm massas da ordem de até mil massas solares. Essas nuvens menores recebem essa denominação porque quando observadas em comprimentos de onda do visível, aparecem na Via Láctea como manchas escuras. Elas são escuras porque são nuvens próximas do Sistema Solar (distância típicas menores que 1200 anos-luz) e absorvem a radiação das estrelas que estão por trás delas. Os primeiros relatos científicos sobre a existência dessas nuvens foram escritos por William Herschel em 1780. No entanto, a sua hipótese para explicar as manchas escuras contra o fundo brilhante da Via Láctea, sugeria que se estava observando através de buracos na Galáxia. Um bom exemplo desse efeito é a nuvem escura conhecida como Saco de Carvão, que pode ser observada em uma noite de céu claro ao lado do Cruzeiro do Sul.



Diversas nuvens escuras podem ser vistas ao longo da Via Láctea em uma noite de céu limpo e sem Lua.

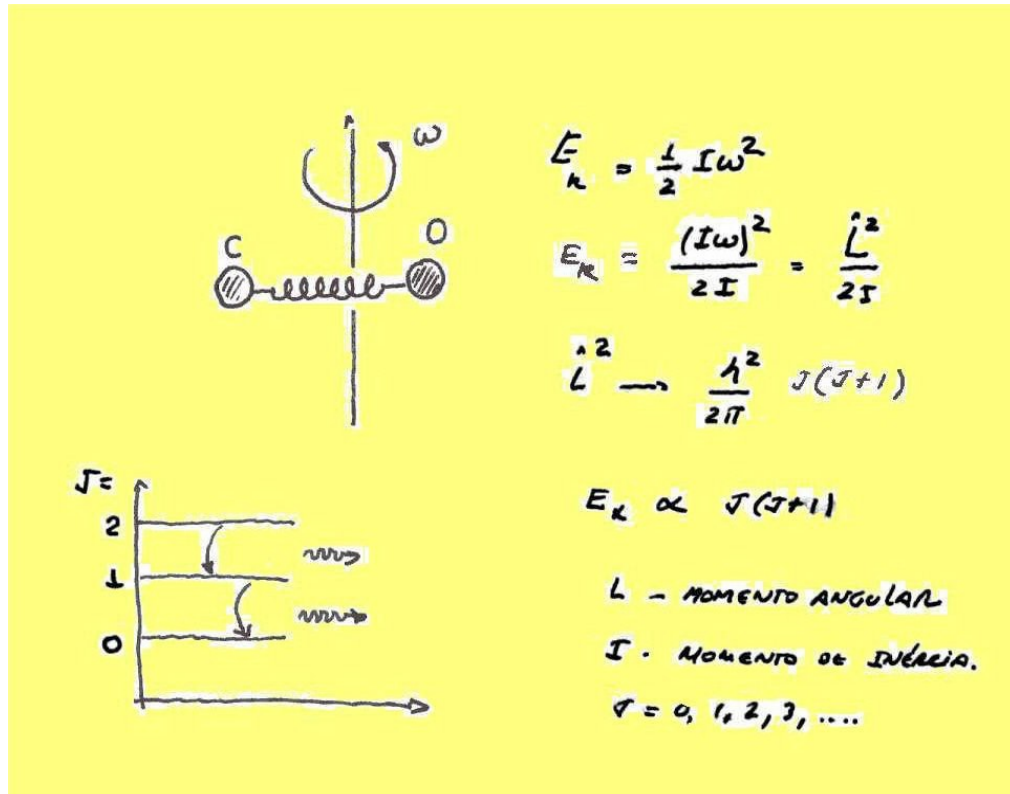
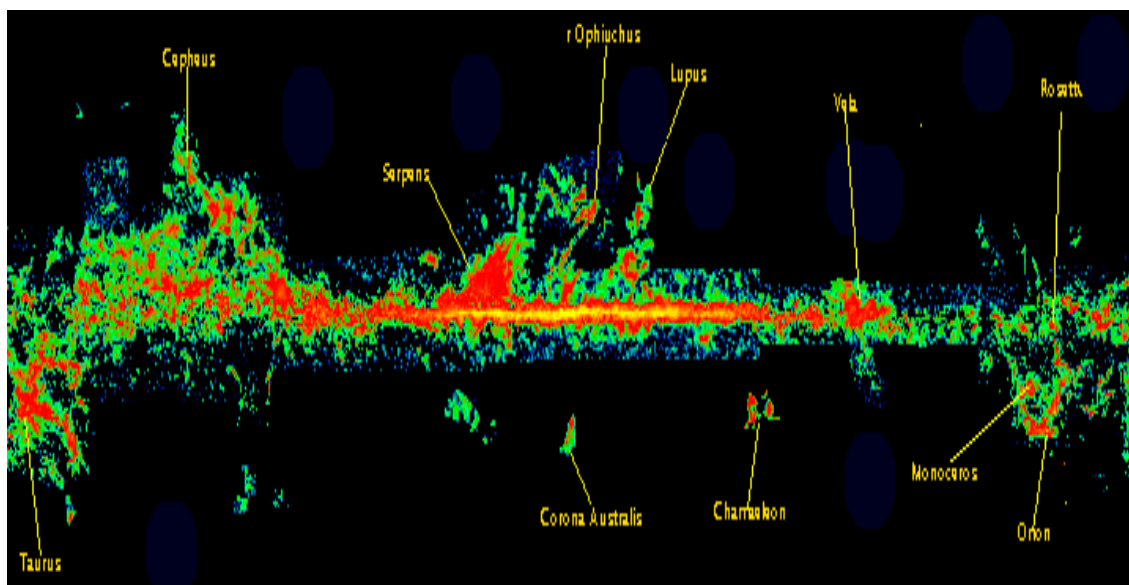


FIGURA 1 – REPRESENTAÇÃO ESPACIAL DA MOLÉCULA DE CO.

Um grande número de nuvens moleculares foi identificado em nossa galáxia. Devido à sua grande variedade de formas (circulares, irregulares, filamentosares etc), localização na Galáxia, temperaturas e densidades, elas têm sido classificadas em vários tipos diferentes que se distribuem entre as duas classes de nuvens definidas anteriormente.



**FIGURA 2 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS NUVENS MOLECULARES NA GALÁXIA, DETERMINADA A PARTIR DE CONTAGEM DE ESTRELAS (CAMBRÉSY ET AL. 1999)**

Um aspecto interessante é que apenas as nuvens moleculares gigantes formam estrelas de grande massa. As nuvens escuras, embora tenham massa até 100 vezes maiores do que as estrelas gigantes tipo O e B, não mostram qualquer evidência de que estrelas como essas estejam se formando em seu interior. Elas formam apenas estrelas de pequena massa.

Em nossa galáxia, as nuvens moleculares gigantes estão praticamente distribuídas em seus braços, razão pela qual, a maioria das estrelas de grandes massas também estão nos braços.

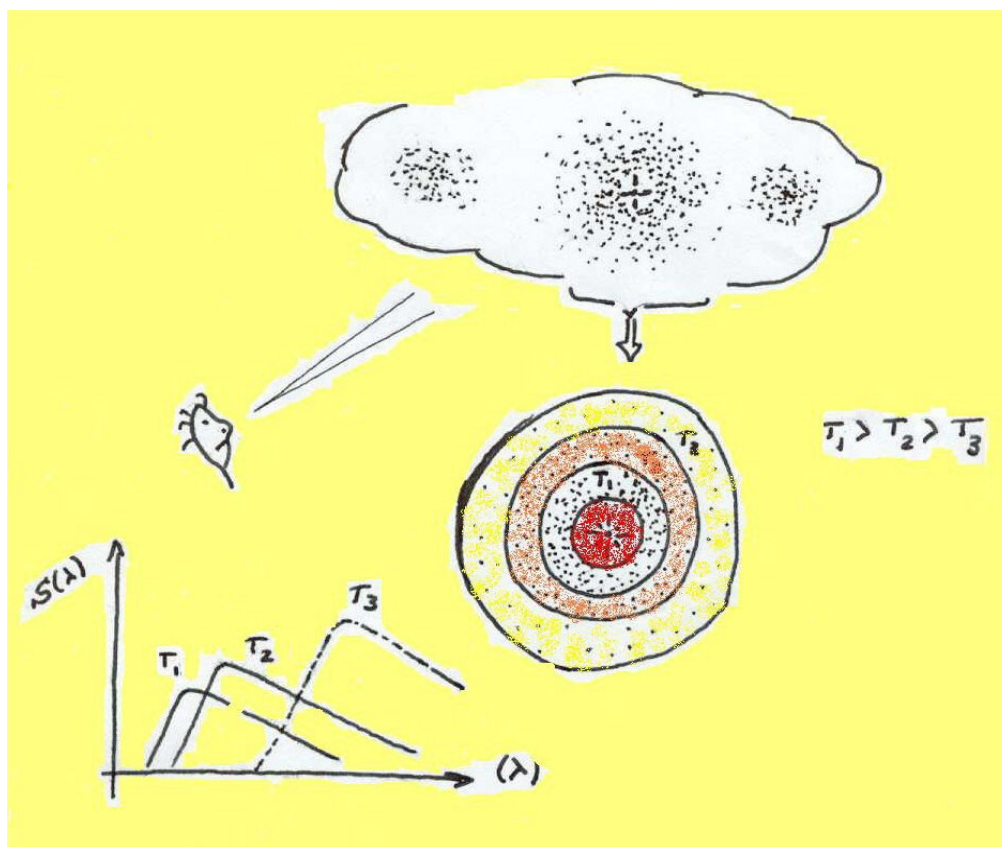
#### **5.4. COMO NASCEM AS ESTRELAS?**

Apesar de se ter disponível, já no início da década de 80, uma grande quantidade de informação sobre as nuvens interestelares, e também terem sido observadas centenas de estrelas O e B jovens embebidas em nuvens moleculares, pouco se sabia dos estágios primordiais da formação das estrelas. Aqueles estágios em que as regiões mais densas

de uma nuvem, por algum motivo, colapsam sobre si mesmas produzindo temperaturas tão altas em seus núcleos, capazes de desencadear as reações nucleares necessárias para o nascimento de uma estrela.

Somente em 1986 é que foi finalmente estabelecido, com base em resultados observacionais, que as estrelas nascem em condensações de altas densidades em nuvens moleculares. Devido à sua aparência, na maioria das vezes circular essas condensações foram denominadas de Glóbulos. A primeira hipótese de que as estrelas nasciam nos glóbulos foi proposta por Baad em 1944. Três anos depois, ela foi bastante discutida por Bock e Reily (1947) e finalmente por Debi (1953), que apresentaram argumentos convincentes de que essa hipótese era verdadeira. Em homenagem a Bock, essas regiões passaram a ser denominadas Glóbulos de Bock.

Como esses glóbulos são regiões de altas densidades, eles sempre aparecem como objetos escuros quando observados em comprimentos de onda do visível. Mesmo uma estrela, que é um corpo celeste de alta temperatura e que emite muita radiação no visível, em seus estágios primordiais de formação não pode ser observada nesses comprimentos de onda. Isso porque o glóbulo progenitor absorve toda a radiação gerada pela estrela. Como mostra a figura 3, a estrela aquece o gás em sua vizinhança que por sua vez começa a emitir radiação como um corpo de baixa temperatura.



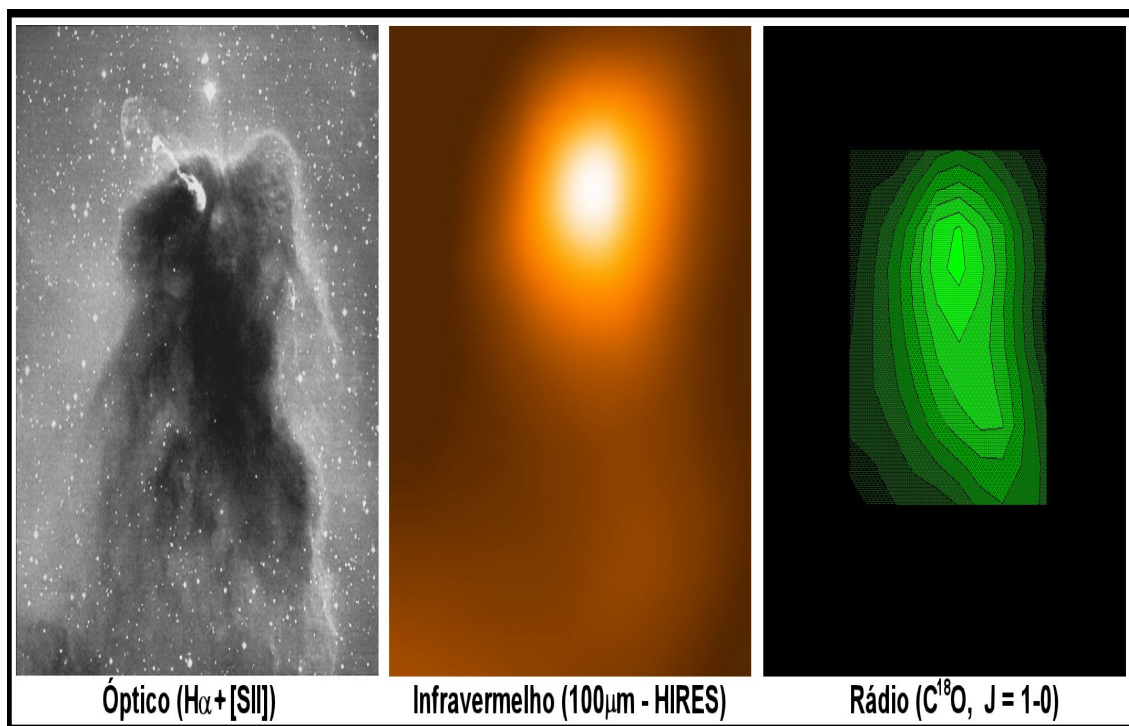
**FIGURA 3 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO AQUECIMENTO DA REGIÃO CENTRAL DE UM GLÓBULO POR UMA ESTRELA EM SEUS ESTÁGIOS PRIMORDIAIS.**

#### **5.4.1. EMISSÃO DE CORPOS DE BAIXAS TEMPERATURAS.**

Um das principais características dos corpos com baixas temperaturas é que eles emitem radiação em comprimentos de onda grandes, ou seja, baixas frequências. Essa propriedade dos corpos é muito bem descrita pela teoria de Planck. Os corpos com temperaturas superficiais muito altas emitem quase que toda sua radiação no intervalo de energia que vai do ultravioleta ao visível. Esse é o caso das estrelas gigantes azuis jovens, cujas temperaturas na superfície são superiores a  $3 \times 10^4$  K. Todavia, nos estágios primordiais de formação estelar a maior parte da emissão proveniente dos glóbulos é produzida pelo gás e a poeira aquecidos a temperaturas de 10 a 100 K. Conseqüentemente, grande parte da energia desses corpos frios é emitida em

comprimentos de onda no infravermelho. Como a radiação nessas frequências é absorvida pela atmosfera terrestre, exceto em algumas bandas muito estreitas (Ver Cap 2, Apostila), pode-se concluir que não seria fácil observar as estrelas recém-nascidas no interior dos glóbulos. É por esse motivo que as estrelas, em seus estágios primordiais de formação, só foram identificadas no interior dos glóbulos de Bock depois das observações do Satélite IRAS (InfraRed Astronomical Satellite) em comprimentos de onda do infravermelho (12  $\mu\text{m}$ , 25  $\mu\text{m}$ , 60  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$ ).

A figura 4 mostra a imagem de um glóbulo quando observado no visível, no infravermelho distante e através da emissão de uma variedade isotópica da molécula de monóxido de carbono. Observe que os máximos da emissão de  $^{12}\text{C}^{18}\text{O}$  (J=1-0) ocorre exatamente na região onde o glóbulo praticamente não emite radiação no visível. O mesmo parece ocorrer com a emissão no infravermelho distante (100  $\mu\text{m}$ ), embora ele esteja um pouco deslocado para a borda do glóbulo no visível.



**FIGURA 4 – IMAGENS ÓPTICA, INFRAVERMELHO E RÁDIO DO GLÓBULO COMETÁRIO VG33. A IMAGEM ÓPTICA É UMA COMPOSIÇÃO DE IMAGENS OBTIDAS EM  $\text{H}\alpha$  E  $[\text{SII}]$  (REIPUTH, 1997) E A IMAGEM DE RADIO É A EMISSÃO DE  $\text{C}^{18}\text{O}$  (HICKEL E VILAS-BOAS, 2001)**

#### 5.4.2. O COLAPSO DOS GLÓBULOS

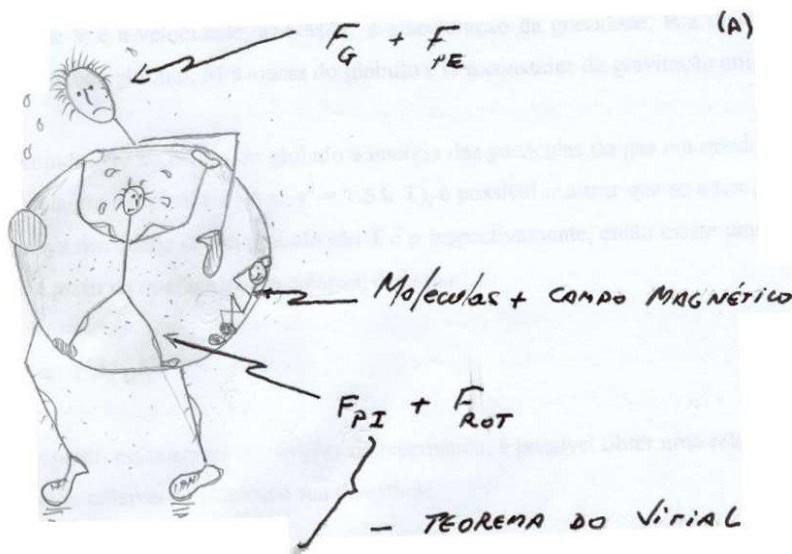
Com base nos argumentos apresentados, é possível elaborar um quadro simplificado para entender os mecanismos responsáveis pelo colapso dos glóbulos e finalmente discutir quais os fatores que influenciam esse processo. Na tentativa de elaborar esse quadro e dele obter informações relevantes sobre a história do colapso, é necessário utilizar hipóteses de trabalho que simplifiquem a abordagem do problema e forneçam informações básicas sobre os mecanismos responsáveis pelo colapso.

Vamos imaginar um glóbulo esférico, com distribuição de massa uniforme, temperatura constante e destituído de movimento de rotação. Sabemos da teoria da Gravitação Universal de Newton, que os corpos se atraem com uma força que depende de suas massas e da distância entre elas. Essa é a força que atrai os corpos para o centro da Terra e que é responsável pela queda de todos eles. Se a superfície da Terra não fosse sólida, os corpos em queda livre poderiam chegar muito mais próximos do seu centro. Logo, como base apenas nessa experiência é possível dizer, fazendo uma perfeita analogia com a Terra, que todas as partes do glóbulo estão sendo atraídas para o seu centro. Como se trata de um objeto gasoso, todo o gás deve caminhar na direção do centro, a menos que algum outro fator impeça esse movimento. E isso realmente acontece quando as partículas em queda livre aproximam-se umas das outras a ponto de colidirem. As colisões fazem com que parte da energia cinética das partículas em queda se converta em calor, aumentando apreciavelmente a temperatura no centro do glóbulo. A consequência natural desse processo é o surgimento de uma força de dentro para fora, de modo semelhante ao que acontece com uma panela de pressão, podendo impedir o colapso das regiões centrais. Quanto mais gás cai para o centro do glóbulo, maior a temperatura central e maior a reação ao colapso.

Usando-se um pouco mais da nossa capacidade de abstração, seria possível incluir alguns outros elementos de nossa vida cotidiana nesse modelo. Sabemos que o glóbulo encontra-se em uma nuvem de gás mais extensa e de densidade menor. E o simples fato dele estar imerso nessa nuvem sugere que sua superfície pode sofrer a ação de uma pressão externa. Outro aspecto interessante resulta das observações de que no Sistema Solar os planetas e o próprio Sol, que é uma estrela de massa pequena, apresentam

movimento de rotação. Finalmente, um aspecto mais sutil está relacionado com o fato de que a Terra, o Sol e vários outros corpos celestes, inclusive a própria galáxia, têm campos magnéticos associados.

Dessa forma, é possível ampliar o modelo anterior levando-se em consideração esses aspectos. Uma representação esquemática está mostrada na figura 5. Em (A) é mostrada a física do problema e em (B) a sua representação matemática.



(B)

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{f} - \nabla P$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0$$

$$\nabla^2 \Phi = -4\pi G \rho$$

$$\nabla \times (\vec{v} \times \vec{B}) = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} - \frac{1}{4\pi} \nabla^2 \vec{B}$$

$$\vec{f} = -\rho \nabla \Phi - \frac{1}{8\pi} \nabla B^2 + \frac{1}{4\pi} (\vec{B} \cdot \nabla) \vec{B}$$

FIGURA 5 – REPRESENTAÇÕES FÍSICA (5A) E MATEMÁTICA (5B) DA COMPETIÇÃO ENTRE OS MECANISMOS QUE PODEM INIBIR OU DESENCADear O COLAPSO DE UM GLÓBULO. EM (B) ESTÃO ESCRITAS AS EQUAÇÕES DA HIDRODINÂMICA QUE PODEM DESCREVER A EVOLUÇÃO DO COLAPSO DE UM GLÓBULO.

Como mostra a figura, o problema consiste de uma competição entre a atração gravitacional ( $F_G$ ), o aquecimento interno ( $F_{PI}$ ), a pressão externa ( $F_{PE}$ ), o campo magnético ( $F_B$ ) e o movimento de rotação ( $F_{ROT}$ ). O que pode ser escrito matematicamente como

$$(F_G + F_{PE}) = (F_B + F_{PI} + F_{ROT})$$

Na análise que é feita a seguir, apenas para simplificar o entendimento do problema, serão desprezados os efeitos da pressão externa e da rotação. Apenas no final do texto a rotação será considerada, com ênfase no seu papel para explicar porque algumas estrelas não giram com a velocidade esperada ou giram no sentido invertido.

#### 5.4.2.1. MASSA CRÍTICA E TEMPO DE COLAPSO

Se a força gravitacional for maior do que a repulsão interna, o colapso será inevitável, resultando em uma estrela jovem. Se a repulsão interna for maior do que a atração, o glóbulo irá se desfazer. No entanto se a atração e a repulsão forem iguais o glóbulo não sofrerá qualquer alteração e permanecerá nesse estado de equilíbrio.

A partir das equações da cinemática de Newton,

$$V = V_0 + a t$$

$$V^2 = V_0^2 + 2 a R$$

$$R = V_0 t + \frac{1}{2} a t^2$$

Onde,  $V$  é a velocidade,  $a = GM/R^2$  é a aceleração da gravidade,  $R$  é a distância ao centro do glóbulo,  $M$  a massa do glóbulo e  $G$  a constante de gravitação universal e assumindo que no centro do glóbulo a energia das partículas do gás em queda livre é convertida em temperatura ( $\frac{1}{2} m v^2 = 1.5 k T$ ), é possível mostrar que se a temperatura interna e a densidade de um glóbulo são  $T$  e  $\rho$  respectivamente, então existe uma massa crítica a partir da qual o glóbulo colapsa, dada por



$$M_{\text{CRIT}} \propto T^{3/2} / \rho^{1/2}$$

Ainda usando essas equações simples da cinemática, é possível obter uma relação entre o tempo de colapso do glóbulo e sua densidade.

$$t_{\text{colapso}} \propto \rho^{-1/2}$$

Esses resultados mostram que quanto maior a temperatura no centro dos glóbulos maiores serão as massas necessárias para desencadear o colapso. Outro aspecto interessante, é que, tanto maiores serão as densidade centrais quanto maiores forem às massas dos glóbulos. Logo, o colapso para formar estrelas de massas grandes (estrelas tipo O) ocorre numa escala de tempo menor do que as estrelas de massas pequenas (o nosso Sol).

Uma estimativa mais rigorosa da Massa Crítica, também denominada massa de Jeans, e do tempo de colapso pode ser feita a partir das equações da hidrodinâmica fornecidas na figura 5B. Para resolvê-la em primeira aproximação, usa-se o método das perturbações. Resultados similares aos obtidos anteriormente também são obtidos com esse procedimento bem mais rigoroso. Ele tem a vantagem de poder explorar em detalhes todo o processo do colapso, usando-se métodos computacionais.

#### **5.4.2.2. QUAL O PAPEL DO CAMPO MAGNÉTICO NO COLAPSO?**

Embora os glóbulos sejam densos e absorvam praticamente toda a radiação em suas camadas externas, algumas partículas de altas energias vindas do Cosmo (raios cósmicos) conseguem penetrá-los, ionizando uma pequena quantidade de matéria. Essa matéria ionizada é suficiente para mudar apreciavelmente a história do colapso. Isso porque as partículas carregadas sofrem uma influência muito forte do campo magnético. Quando as cargas em seu movimento de colapso cruzam perpendicularmente o campo, elas tendem a arrastá-lo. Isto não acontece quando elas seguem ao longo do campo.

Nessa direção, elas se movem sem sofrer qualquer interação com ele. É essa maneira diferente das partículas ionizadas interagirem com o campo magnético que acaba influenciando o quadro evolutivo do colapso. Uma situação interessante é aquela em que o campo é tão forte que ele se opõe ao movimento das partículas carregadas, inibindo completamente o colapso. Embora isso possa acontecer, o campo magnético apresenta um comportamento muito interessante: ao longo do tempo ele tende a voltar à configuração que ele tinha antes do início do colapso. Isso faz com que, transcorrido certo tempo (tempo de **difusão ambipolar**), o campo magnético deixe o glóbulo gradativamente, permitindo que as regiões centrais comecem a colapsar. Isto é, o núcleo do glóbulo entra em colapso primeiro e posteriormente as partes mais externas. Esse tipo de colapso cria uma região rarefeita entre o núcleo denso e a borda interna envelope de gás que continua caindo para o centro. Tudo se passa como se esse anel de rarefação estivesse se propagando de dentro para fora. Esse tipo de colapso é denominado **colapso de dentro para fora**.

O colapso que ocorre sem a ação de qualquer mecanismo externo, é denominado de *colapso espontâneo*.

Na figura 6, é mostrada uma representação esquemática do problema. Em 6A é mostrada a nuvem molecular, o glóbulo e as linhas de campo magnético. Em 6B as linhas de campo estão distorcidas dentro dos glóbulos porque os íons que participam do colapso e se movem perpendicularmente ao campo magnético, arrastam o campo consigo. Observe que ao longo do campo o gás cai livremente, o que não acontece nas direções perpendiculares. Conseqüentemente, o que antes era uma esfera de gás se transforma em algo com a forma de disco, como mostram as figuras 6 B e C. Essa geometria também é favorecida pela rotação.

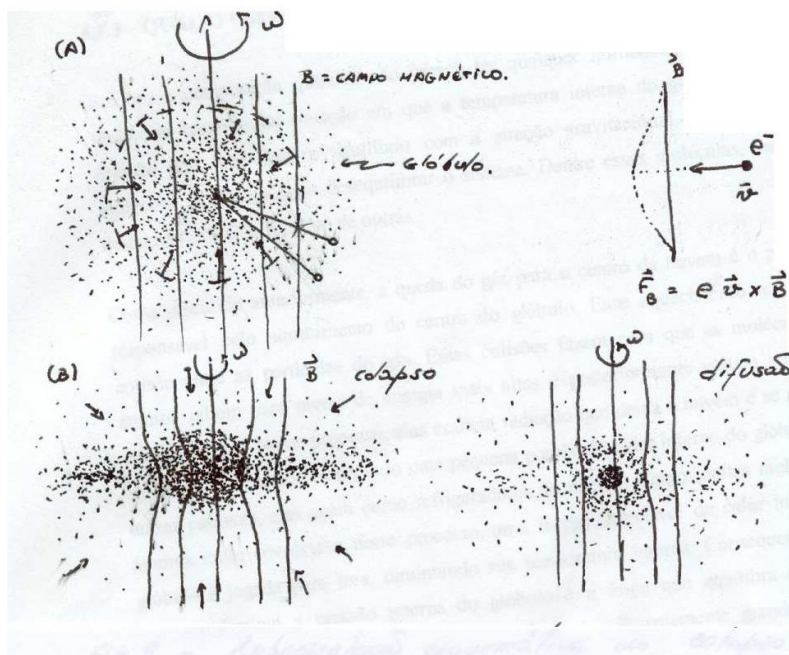


FIGURA 6 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS ESTÁGIOS EVOLUTIVOS DO COLAPSO DE UM GLÓBULO. (A) REPRESENTA O ESTADO INICIAL DO COLAPSO. O GLÓBULO AINDA É ESFÉRICO E AS LINHAS DO CAMPO MAGNÉTICO SÃO PARALELAS. ISTO É, O CAMPO É UNIFORME. EM (B) O COLAPSO EVOLUIU E AS LINHAS DE CAMPO FORAM ARRASTADAS PELO GÁS EM QUEDA LIVRE E A GEOMETRIA DA NUVEM TENDE PARA UM DISCO (ELIPSÓIDE OBLATO). EM (C) O COLAPSO DO NÚCLEO JÁ OCORREU E UMA ESTRELA JOVEM ENCONTRA-SE NO CENTRO DO GLÓBULO.

#### 5.4.2.3. QUAL O PAPEL DAS SUBSTÂNCIAS QUÍMICAS?

Embora a composição química não pareça ter qualquer influência no colapso, ela realmente tem. Numa situação em que a temperatura interna do glóbulo gera uma pressão que estabelece o equilíbrio com a atração gravitacional, a presença das moléculas e átomos pode desequilibrar o sistema. Dentre essas moléculas, merecem destaque  $H_2O$ ,  $CO$ ,  $H_2$  além de outras.

Como discutido anteriormente, a queda do gás para o centro da nuvem é o principal responsável pelo aquecimento do centro do glóbulo. Esse aquecimento resulta da

colisão entre as partículas do gás. Essas colisões fazem com que as moléculas ou átomos saltem para níveis de energia mais altos e posteriormente voltem para seus estados iniciais. Nesse processo, elas emitem radiação que deixa a nuvem e se propaga em todas as direções, carregando uma pequena porção do calor interno do glóbulo. Em outras palavras, elas agem como refrigeradores do núcleo. Como muitas moléculas e átomos estão envolvidos nesse processo, uma fração apreciável do calor interno do glóbulo é jogada para fora, diminuindo sua temperatura interna. Consequentemente, também diminui a pressão interna do glóbulo e a força que equilibra a atração gravitacional. Quando a diminuição dessa força é suficientemente grande, todo o glóbulo inicia um novo colapso.

O colapso resulta em um grande aquecimento do centro do glóbulo. Esse aquecimento é tal que 4 átomos de hidrogênio se fundem dando origem a um átomo de **He**. Quando isso ocorre, por definição nasce uma estrela. A principal característica desse processo de fusão é que parte da massa dos 4 átomos de **H** se transforma em energia ( $E=mc^2$ ), sendo esse um dos principais processos de produção de energia nas estrelas (Ver Cap 4 da Apostila).

### **5.5. CONSEQUÊNCIAS DO NASCIMENTO DE UMA ESTRELA.**

Como mencionado no item anterior, o colapso resulta em aquecimento do núcleo dos glóbulos e finalmente no nascimento de uma estrela. A principal característica de uma estrela é que ela é uma intensa fonte de radiação. Tanto mais intensa ela será quanto maior for a sua massa. Com base nessa informação, pode-se concluir que as estrelas tipo O (gigantes azuis com massas  $>10$  Massas do Sol) são muito mais brilhantes do que estrelas como o Sol que é uma anã tipo G. Devido às altas temperaturas de suas superfícies ( $>30000$  C) as estrelas de grande massa produzem radiação ( $>10^{48}$  fótons ionizantes) com energia suficiente para dissociar completamente uma grande quantidade de gás em torno das estrelas recém-nascidas. Como as estrelas de massa pequena, como o nosso Sol, produzem pouca radiação com essas características, elas não são capazes de ionizar o gás em sua vizinhança a ponto de criar uma grande bolha de gás ionizado.

Levando-se em consideração apenas essa característica, é possível concluir que as primeiras evidências do nascimento de um “bebê” estrela variam em função de suas massas.

### **5.5.1. ESTRELAS MASSIVAS O E B (M DA ORDEM DE 10 MASSAS SOLARES)**

Ao nascerem, as estrelas de grande massa (10 massas solares ou mais) criam em torno de si uma bolha de gás totalmente ionizado, inicialmente pequena, e que se expande continuamente criando uma onda de choque na região que delimita a bolha ionizada e o gás externo. Essa bolha pode se expandir consumindo completamente o glóbulo progenitor, podendo inclusive ionizar toda a nuvem de gás. Um aspecto interessante desse quadro evolutivo é que a frente de choque, propagando-se ao longo da nuvem, tem a propriedade de comprimir o gás que encontra em seu caminho. Se essa frente encontra um glóbulo, ela aumenta a pressão externa ( $F_{PE}$ ) do ambiente onde ele se encontra. O aumento da pressão pode desequilibrar os glóbulos induzindo a formação de novas estrelas. Esse mecanismo parece ser um dos principais responsáveis pela formação de estrelas de grandes massas e tem sido amplamente utilizado para explicar associações de estrelas de grande massa que apresentam gradientes de idades. Ele é denominado de *Formação Induzida* ou *Formação Seqüencial de Estrelas*.

A figura 7 (A) mostra o “bebê” estrela e a bolha de gás ionizado que se expande na direção do disco, bem como na direção perpendicular. Observe que a direção perpendicular é a direção do campo magnético. A expansão da bolha de gás ionizado ao longo do plano do disco é mais difícil do que na direção perpendicular. Isso porque a densidade do disco é muito alta e também porque o gás ionizado tem que se mover perpendicularmente ao campo magnético. Como se discutiu anteriormente, o campo magnético se opõe ao movimento de cargas elétricas nessa direção. Esse efeito tem menor importância quando a estrela é muito brilhante e a energia injetada no gás ionizado é muito alta. Embora o disco e o campo magnético ofereçam resistência à expansão dessa bolha de alta energia, ela acaba destruindo o disco e o próprio glóbulo.

E tudo isso numa escala de tempo muito curto ( $<10^5$  anos). Embora essas estrelas, durante sua fase “pré-natal”, estejam completamente embebidas em um “casulo” muito denso (glóbulo), elas anunciam a sua existência criando um forte jato de gás que escapa do núcleo do casulo na direção perpendicular ao disco. Uma vez que toda essa atividade pode ocorrer no período compreendido entre as “últimas semanas de gestação” e os primeiros dias de vida das estrelas, esses jatos podem ser vistos como o primeiro “choro” do bebê estrela.

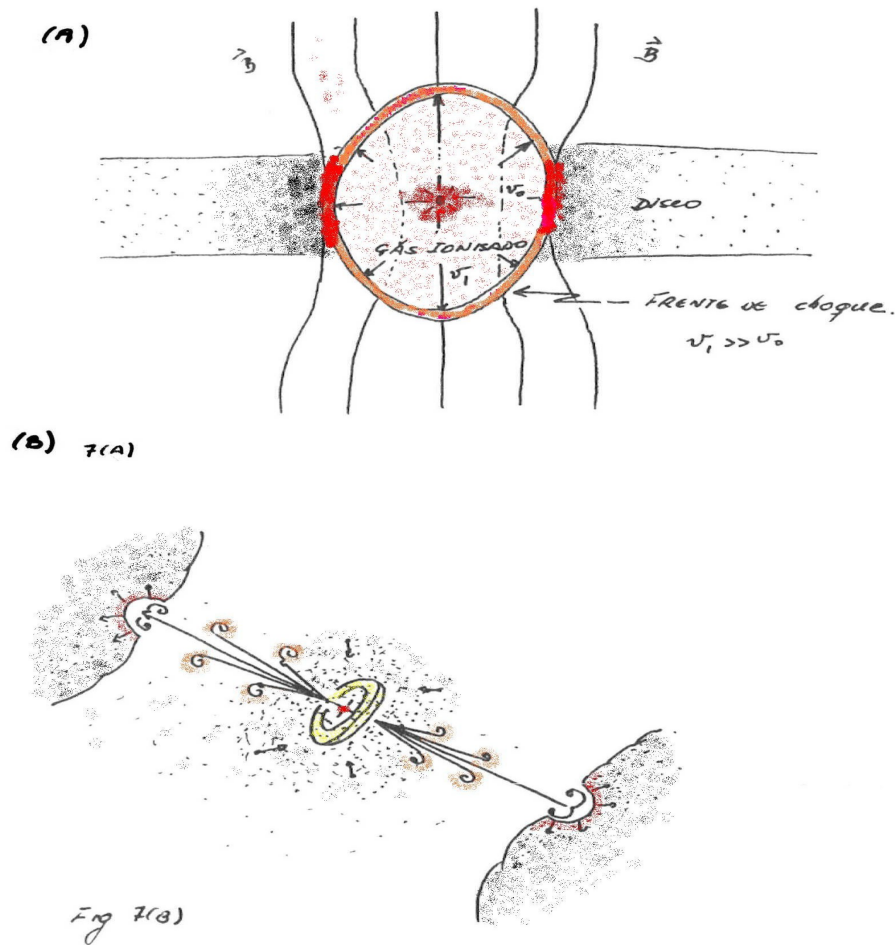


FIGURA 7 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS ESTÁGIOS POSTERIORES AO NASCIMENTO DAS ESTRELAS. EM (A) É MOSTRADA A BOLHA DE GÁS IONIZADO (REGIÃO HII COMPACTA) CRIADA POR UMA ESTRELA DE GRANDE MASSA (O,B) EXPANDINDO-SE AO LONGO DO DISCO E NAS DIREÇÕES PERPENDICULARES. A FRENTE DA BOLHA IONIZADA É MARCADA PELA PRESENÇA DE UM CHOQUE SUPERSÔNICO E UM INTENSO CAMPO DE RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA. EM (B) É

MOSTRADA A EVOLUÇÃO DA BOLHA DE GÁS AQUECIDO QUE SE FORMA EM TORNO DA ESTRELA DE MASSA PEQUENA. É MOSTRADA A INTERAÇÃO DO JATO PERPENDICULAR AO DISCO COM AS NUVENS MOLECULARES VIZINHAS.

### **5.5.2. ESTRELAS DE PEQUENA MASSA (M DA ORDEM DE 1 MASSA SOLAR)**

As estrelas de pequena massa se formam de maneira similar às estrelas de grande massa. As principais diferenças no processo de formação de ambas estão relacionadas principalmente com seus estágios finais de “gestação”. Enquanto as estrelas muito brilhantes, de grande massa, nascem e podem destruir completamente o glóbulo progenitor, as estrelas de massa pequena não. Por esse motivo, os efeitos do nascimento desse “bebê” estrela sobre o meio ficam determinados pelas características da própria estrela mais as condições impostas pelo meio em que ela se forma. Isto é, da mesma forma que uma estrela de grande massa, ela também cria uma bolha de gás aquecido que se expande em todas as direções. Todavia, no caso dessas estrelas, a expansão ao longo do disco se limita a certa distância da estrela central, preservando assim o disco e o ambiente externo. Na direção perpendicular, o gás aquecido de alta pressão escapa ao longo da direção do campo magnético formando um jato que vai interagir com a nuvem molecular ou o resto do glóbulo que não foi consumido nessa “gestação”.

A principal característica da formação dessas estrelas é que elas preservam o disco de gás e poeira do qual se formam os sistemas planetários. É exatamente num sistema planetário como esse que se encontra a única forma de vida *“inteligente”* que se conhece.

Uma representação esquemática dos estágios primordiais de evolução dessas estrelas é mostrada na figura 7B.

Os estudos da atividade de formação de estrelas nas nuvens moleculares, realizados na última década, mostram que as estrelas de grande massa nascem apenas em nuvens

moleculares gigantes onde também se formam estrelas de pequena massa. Esse é o caso de nuvens moleculares como Orion e NGC6334. Por outro lado às nuvens moleculares escuras, que tem massas até mil vezes menores que as gigantes, forma apenas estrelas de pequena massa. Esse é o caso, por exemplo, das nuvens conhecidas como Cepheus, Taurus, Musca, Chamaeleon etc.

### **5.5.3. ROTAÇÃO DAS NUVENS.**

As observações dos glóbulos mostram que eles têm rotações muito pequenas ou quase imperceptíveis.

Mesmo sendo pequena, essa rotação pode ter consequência muito importante na história evolutiva de um glóbulo. Por menor que seja esse movimento no início do colapso, caso em que a rotação é originária da própria rotação galáctica, ele acaba sendo importante nos estágios finais porque o colapso conserva o momento angular. Isto é, quanto menor for o raio do glóbulo colapsando, mais rápido ele gira.

Se o glóbulo gira mais rápido à medida que o colapso prossegue, o que deveria acontecer com o campo magnético se, de acordo com as discussões anteriores, ele é arrastado pelo gás?

Seria de se esperar que ele também fosse arrastado pelo movimento de rotação. Como consequência o campo tenderia a torcer sobre si mesmo. Como o campo se opõe a esse movimento, da mesma forma que ao colapso, a torção resulta na diminuição da velocidade de rotação do gás. Esse efeito é um dos mecanismos capazes de explicar porque a rotação de estrelas recém-formadas não conserva a energia de rotação das nuvens progenitoras. Devido a esse tipo de torção do campo, pode haver uma situação extrema em que o próprio sentido de giro da estrela pode ser invertido.

Na realidade, as observações de algumas estrelas jovens com massa idêntica à do Sol (estrelas T Tauri) mostram movimento de rotação contrário à rotação da sua nuvem progenitora com energia da rotação sempre menor do que a energia de rotação inicial



## 5.6. BIBLIOGRAFIA

Wynn-Williams, G. "The Fullness of Space". Cambridge University Press, 1992.

Taylor, S.R., "Solar System Evolution. A New Perspective". Cap 2. Cambridge University Press, 1992

Verschuur, G. L. "Interstellar Matters". Spring-Verlag, 1990.

Ronan, C. A. "História Ilustrada da Ciência". Jorge Zahar Editor Vols. I e II. 1991.

Proceedings of the International Conference "Star Formation 1999". Nagoya, Japan.  
Obs: Material disponível via Internet.

Física –UFRGS, 1999.