

## Capítulo 14

### O MEIO INTERESTELAR

Nós dedicaremos esse capítulo ao estudo do meio entre as estrelas ou meio interestelar, usualmente rico em gás, poeira e outros materiais, sendo um local prolífico para o nascimento de novas estrelas. Os tópicos abordados serão os seguintes:

- PROPRIEDADES GERAIS DO GÁS E POEIRA INTERESTELARES

- Temperatura do Meio Interestelar

- Densidade do Meio Interestelar

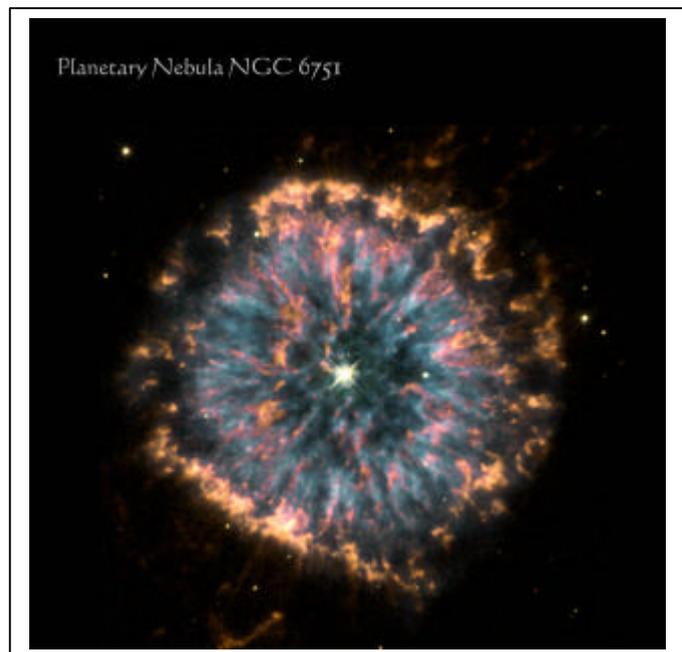
- Composição Química do Gás e Poeira Interestelares

- NUVENS INTERESTELARES

- Nebulosas de Emissão

- Nebulosas de Poeira

- Nuvens Moleculares



### Bibliografia

- *Astronomia & Astrofísica* - Apostila do Curso de Extensão Universitária do IAG/USP (ed. W. Maciel) (1991).
- *Introductory Astronomy & Astrophysics*, de Zeilik & Smith (1987).
- *Astronomy: a beginner's guide to the Universe*, Chaisson & McMillan (1999).

## O MEIO INTERESTELAR

A importância do meio interestelar (meio entre as estrelas) reside na observação de que é nele onde nascem as estrelas e é para ele que retornam todos os elementos químicos reprocessados pelas estrelas em evolução. A quantidade de matéria presente no meio interestelar é da mesma ordem de grandeza daquela contida nas estrelas. Os principais integrantes do meio interestelar são o gás e a poeira, que aparecem misturados em todo o espaço interestelar.

### PROPRIEDADES GERAIS DO GÁS E POEIRA INTERESTELARES

O gás interestelar é constituído principalmente de átomos individuais e moléculas pequenas. Regiões contendo gás são transparentes a quase todos os tipos de radiação eletromagnética. Com exceção das numerosas linhas estreitas de absorção atômica e molecular, o gás não bloqueia radiação.

A poeira interestelar é de composição mais complexa. Ela consiste de aglomerados de átomos e moléculas – semelhantes a poeira de giz, de fumaça ou névoa. A luz das estrelas distantes não pode penetrar as acumulações densas de poeira interestelar, assim como o farol de um carro não penetra uma neblina densa. O diâmetro típico de uma partícula de poeira é de  $10^{-7}$  m, comparável em tamanho ao comprimento de onda da luz visível.

Temos duas regras bem úteis que nos ajudam a lembrar algumas das propriedades do meio interestelar:

1. Um feixe de luz pode ser absorvido ou espalhado somente por partículas com um diâmetro próximo ou maior que o comprimento de onda da radiação incidente, e
2. O obscurecimento (absorção ou espalhamento) produzido pelas partículas aumenta com a diminuição do comprimento de onda da radiação.



Figura 1 – Nebulosa de reflexão NGC1999, constelação de Orion (NASA and The Hubble Heritage Team).

Conseqüentemente, regiões de poeira interestelar (cujas partículas têm diâmetro de  $\sim 10^{-7}$  m) são transparentes aos comprimentos de ondas de rádio ou infravermelho, por exemplo ( $\lambda$ 's  $\gg 10^{-7}$  m), mas são completamente opacos aos comprimentos de onda de ultravioleta e raios X ( $\lambda$ 's  $\ll 10^{-7}$  m curtos).

Devido a opacidade do meio interestelar aumentar com o decréscimo do comprimento de onda, a luz vinda de estrelas distantes “perde” preferencialmente seus comprimentos de onda mais curtos (azuis). Assim, além de ter a luminosidade diminuída como um todo, estrelas também tendem a parecer mais vermelhas do que realmente são. Este efeito, denominado avermelhamento, é similar ao processo que produz o pôr do Sol avermelhado na Terra.

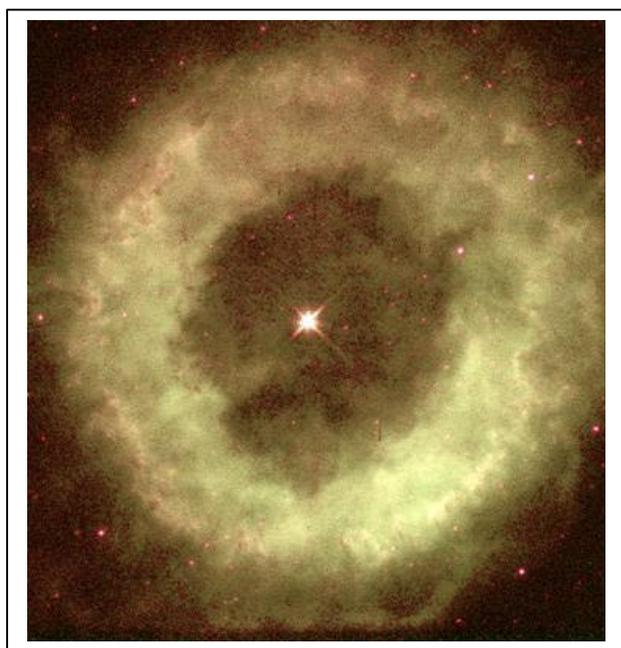


Figura 2 – Nebulosa planetária NGC 6369 (Howard Bond / STScI, and NASA).

A poeira interestelar pode modificar a magnitude aparente e a cor de uma estrela, mas as linhas de absorção do espectro original da estrela não são modificadas, possibilitando aos astrônomos identificarem seu tipo espectral. Com o tipo espectral, e assumindo que a estrela esteja na seqüência principal, pode-se determinar a verdadeira luminosidade e cor da estrela.

Desta maneira pode-se medir o quanto a luz original da estrela foi modificada (absorção geral e por cor) devido ao meio interestelar. Repetindo estas medidas em diferentes direções para muitas estrelas, os astrônomos puderam fazer um mapa da distribuição e propriedades do meio interestelar nas vizinhanças do Sol.

## Temperatura do Meio Interestelar

A temperatura do meio interestelar varia desde uns poucos kelvin até alguns milhares de kelvin, dependendo da proximidade da estrela ou outro tipo qualquer de fonte de radiação. Podemos dizer que a temperatura média típica de uma região escura do meio interestelar é  $\sim 100$  K. Compare este valor com a temperatura de 273 K, ponto em que a água congela e 0 K, ponto em que os movimentos moleculares e atômicos cessam. A conclusão é que o espaço interestelar é muito frio.

## Densidade do Meio Interestelar

Gás e poeira são encontrados em todo o meio interestelar. Não há nenhuma parte da galáxia que não tenha matéria. No entanto, a densidade do meio interestelar é extremamente baixa. O gás tem uma densidade média de  $10^6$  átomos por  $m^3$ , apenas 1 átomo por  $cm^3$ . A poeira interestelar é mais rarefeita ainda, em média há apenas uma partícula de poeira para cada trilhão de átomos. O espaço entre as estrelas é populado por material tão fino que se juntássemos todo o gás e poeira do meio interestelar contido em uma esfera do tamanho da Terra, teríamos um material que caberia dentro de alguns dedos.

Como um meio tão fino e tão esparsos pode bloquear a luz das estrelas tão efetivamente? A chave do paradoxo é a extensão, a vastíssima extensão do meio interestelar. A distância típica entre as estrelas ( $\sim 1$  pc na vizinhança solar) é muito, muito maior que o tamanho típico de uma estrela ( $\sim 10^{-7}$  pc).

## Composição Química do Gás e Poeira Interestelares

A composição do gás interestelar é conhecida através de estudos espectroscópicos das linhas de absorção interestelar, formadas quando a luz vinda de uma estrela distante interage com o gás ao longo da linha de visada. O gás absorve parte da radiação estelar de uma maneira que depende de sua temperatura, densidade e abundância elementar. Logo, as linhas de absorção produzidas contêm informação sobre o meio interestelar escuro, da mesma maneira que as linhas de absorção estelar revelam as propriedades das estrelas. Os astrônomos podem facilmente distinguir quais são as linhas da estrela (mais largas) e quais são as produzidas pela absorção interestelar devido ao gás frio e de baixa densidade (linhas mais finas). As estrelas têm um espectro de corpo negro com linhas de absorção. As nebulosas têm as linhas de emissão características do gás.

A constituição do gás é parecida com a constituição das estrelas: aproximadamente 90% é hidrogênio atômico ou molecular, 9% hélio e 1% de elementos mais pesados. A abundância de vários elementos pesados como o carbono, oxigênio, silício, magnésio, ferro, é muito mais baixa no meio interestelar do que no sistema solar e nas estrelas. A explicação mais provável é que estes elementos foram usados para formar a poeira interestelar. Em contraste com o gás interestelar, a composição da poeira interestelar não é bem conhecida. Há evidências de observações no infravermelho de que a poeira é constituída de silicatos,

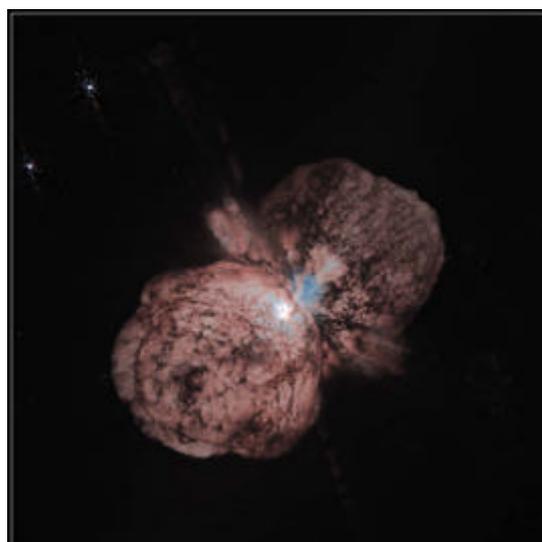


Figura 3 – Estrela Eta-Carinae e a ejeção de matéria para o meio interestelar (*J. Morse/ University of California, K. Davidson/ University of Minnesota, and NASA*).

carbono e ferro, alguns dos elementos que são sub-abundantes no gás, dando suporte à teoria de que a poeira interestelar formou-se a partir de gás interestelar. A poeira provavelmente também contém “gelo sujo”, uma mistura congelada de água contaminada com alguns traços de amônia, metano e outros componentes. A composição é muito parecida com a da cauda dos cometas do nosso sistema solar.

## NUVENS INTERESTELARES: NEBULOSAS DE EMISSÃO, DE POEIRA E NUVENS MOLECULARES

O gás e a poeira interestelares podem se aglomerar em nuvens ou nebulosas. Nebulosas são nuvens de gás e poeira interestelares. Se há um obscurecimento da luz vinda de estrelas que estão atrás de uma nuvem chamamos esta nuvem de nebulosa de poeira. Por outro lado, se há algum (s) objeto (s), por exemplo um grupo de estrelas jovens que faz com que a nuvem brilhe, a chamamos de uma nebulosa de emissão.

### Nebulosas de Emissão



Figura 4 – Nebulosa de emissão de Orion, região HII  
(C.R.O. Dell and S.K. Wong / Rice University, and NASA).

As nebulosas de emissão estão entre os objetos astronômicos mais espetaculares do Universo. Estas nebulosas são regiões de gás que emitem radiação e brilham no céu. Elas contêm pelo menos uma estrela O ou B recém-formada que produz radiação UV. A radiação UV ioniza o gás nas regiões próximas à estrela. À medida que os elétrons se recombinam com os núcleos, emitem radiação visível, fazendo com que a nuvem brilhe.

Ao contrário de estrelas, o tamanho das nebulosas pode ser medido por geometria simples, pois estas têm tamanhos grandes.

A observação espectroscópica das nebulosas permite o estudo das propriedades do gás interestelar. As linhas do espectro óptico correspondentes à nebulosa superpõem-se ao espectro da estrela.

A largura das linhas do espectro da nebulosa nos dá informação sobre a temperatura da nebulosa, que é de aproximadamente 8000 K ao redor da estrela.

## Nebulosas de Poeira (ou Nuvens de Poeira)

As nebulosas de emissão representam uma componente pequena do espaço interestelar. A maior parte do espaço, mais que 99% deste, são simplesmente regiões sem estrelas, regiões escuras.

Dentro das regiões interestelares escuras encontram-se as nuvens de poeira, nuvens que são mais frias e muito mais densas ( $10^3$  a  $10^6$  vezes mais) que as regiões vizinhas. Nestas regiões, até cerca de  $1000$  átomos/cm<sup>3</sup> são encontrados (similar à densidade do melhor vácuo em laboratório na Terra).

A maioria das nuvens de poeira tem um tamanho maior do que o nosso sistema solar. Apesar de sua denominação, **estas nuvens são constituídas principalmente de gás**, como o resto do meio interestelar. No entanto, a absorção da luz se dá devido a poeira que estas contêm.

A maioria das nuvens de poeira tem formas irregulares. Elas emitem principalmente em comprimentos de onda do infravermelho. As nuvens de poeira preenchem não mais que 2 a 3% do volume total do espaço interestelar.

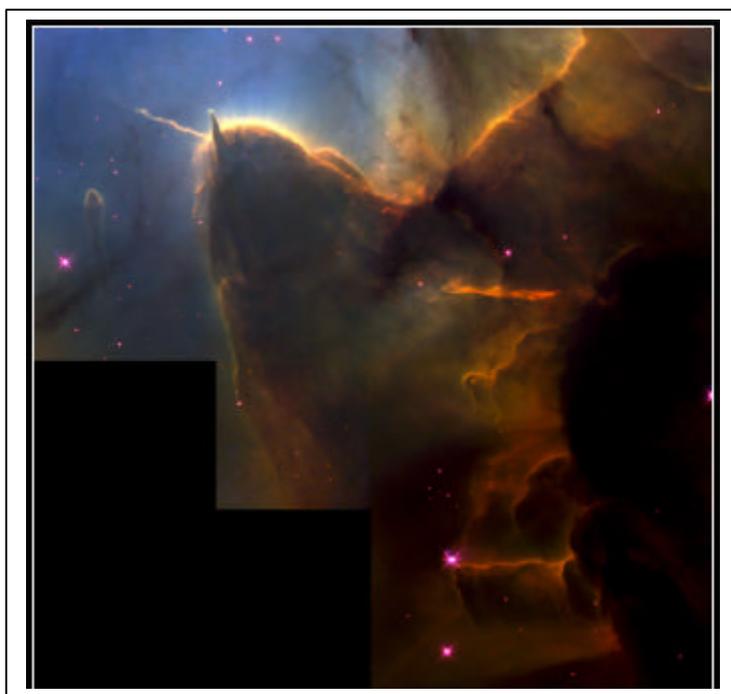


Figura 5 – Nebulosa Trífide M20, na constelação de Sagitário, um berçário de estrelas a 9000 anos-luz de distância, exemplo de nuvem de poeira e gás (J. Hester / Arizona State University., e NASA).

### *Como se observam nuvens de poeira e nebulosas de emissão?*

Uma maneira, como já explicado anteriormente, é através de espectroscopia óptica, quando há uma fonte estelar ionizante. Este nem sempre é o caso. Outra maneira é através da emissão de rádio do gás de hidrogênio neutro na linha de 21 cm. Este método é muito útil e permite estudar as propriedades de todas as nebulosas de poeira e de gás e as propriedades do meio interestelar.

O átomo de hidrogênio tem um elétron que orbita um núcleo contendo um próton. Além do movimento orbital ao redor do próton, o elétron tem movimento rotacional, ao redor de seu próprio eixo (“spin”). O próton também tem, assim como o elétron, um movimento rotacional em volta de seu eixo. Existem somente duas configurações para o

átomo de hidrogênio no estado “ground” ou fundamental. O elétron e o próton podem rodar com “spins” paralelos ou anti-paralelos.

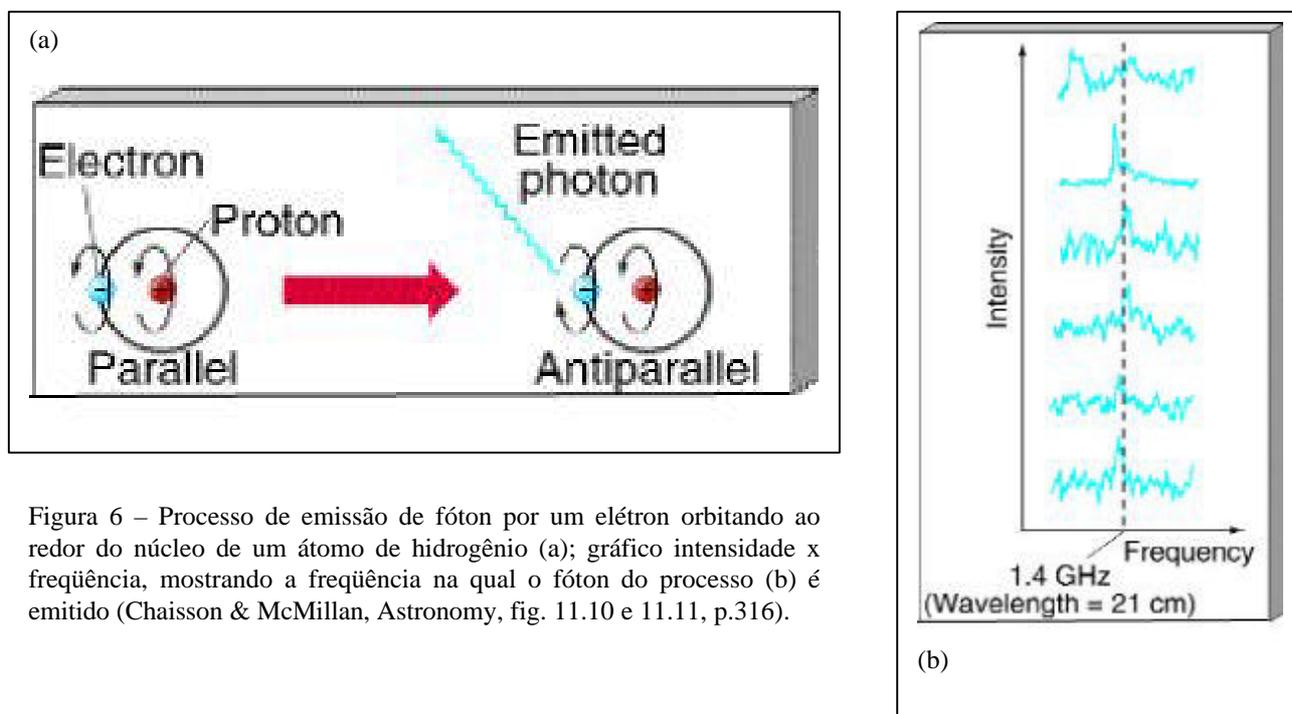


Figura 6 – Processo de emissão de fóton por um elétron orbitando ao redor do núcleo de um átomo de hidrogênio (a); gráfico intensidade x frequência, mostrando a frequência na qual o fóton do processo (b) é emitido (Chaisson & McMillan, Astronomy, fig. 11.10 e 11.11, p.316).

Como toda matéria no Universo, o gás interestelar tende a ficar no estado de menor energia. Um átomo de hidrogênio levemente excitado, com o elétron e o próton girando na mesma direção, pode decair para o estado de menor energia quando o “spin” do elétron muda espontaneamente de direção. Esta transição libera um fóton com energia igual a diferença entre os dois níveis, uma energia que é muito pequena e portanto corresponde a um comprimento de onda longo, de 21 cm, que chega até nós como radiação de rádio ( $\lambda = 21$  cm).

Esta transição, que dá origem a linha de 21 cm, é importantíssima no estudo das regiões do meio interestelar que possuem gás hidrogênio em forma atômica (a maior parte do meio interestelar). Mesmo em nuvens escuras de poeira a radiação de rádio pode facilmente atravessar as regiões de poeira e chegar até o observador.

Se todos os átomos eventualmente tendem a decair para o nível de mais baixa energia, é necessário um mecanismo de excitação para que a transição continue acontecendo. Este mecanismo natural de fato existe: a diferença de energia entre os dois estados de “spin” paralelo e anti-paralelo é comparável a energia de um átomo (para  $T \sim 100$  K) e portanto as colisões atômicas são energéticas o bastante para elevar o elétron à configuração de mais alta energia.

## Nuvens Moleculares

As nuvens moleculares são compostas predominantemente de moléculas. Estas são muito maiores que as nebulosas de emissão e têm uma densidade que chega a atingir  $10^{12}$  partículas por  $m^3$ .

Moléculas emitem radiação quando elas mudam de um estado rotacional a outro. A diferença de energia entre os estados rotacionais é geralmente pequena e é emitida em forma de ondas de rádio.

As moléculas interestelares vão desde as mais simples moléculas diatômicas como CO, CN e OH, até complexas estruturas como  $CH_3$   $CH_2$  CN. Estas moléculas são importantes porque nos permitem investigar as nuvens moleculares.

*As moléculas no Meio Interestelar estão sempre associadas a poeira. Por que?*

A poeira pode agir como “protetora” das moléculas contra a radiação de alta frequência que poderia destruí-las. A poeira pode também agir como um catalisador que ajuda a formar moléculas. Os grãos de poeira propiciam um local onde os átomos podem reagir e um meio para dissipação de qualquer calor associado a reação, que de outra forma poderia destruir também as moléculas recém formadas.

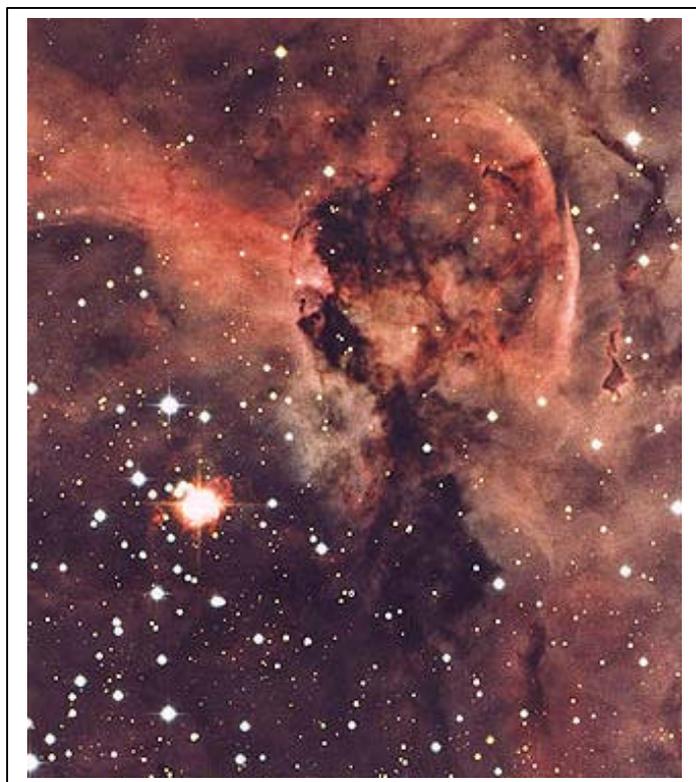


Figura 7 – Nebulosa na constelação de Carinae, exemplo de nuvem escura associada a região de formação de estrelas (David Malin / Anglo Australian Observatory – Royal Observatory, Edinburgh).

*Como observar nuvens moleculares?*

Aqui temos um problema. O conteúdo principal destas nuvens é o hidrogênio molecular,  $H_2$ , mas esta molécula não emite e nem absorve radiação rádio. Ela só emite radiação ultravioleta de comprimento de onda curto. Não podemos, então, usar o  $H_2$  para estudar a estrutura da nuvem.

E a linha de 21 cm? Esta só é possível medir quando o hidrogênio está em sua forma atômica e não molecular.

Temos então que usar outras moléculas para estudar os interiores das nuvens moleculares. Moléculas como as do monóxido de carbono (CO), do ácido cianídrico HCN, da amônia  $NH_3$ , da água  $H_2O$ , do formaldeído  $H_2$  CO e muitas outras são usadas.

Estas são de um milhão a um bilhão de vezes menos abundantes que as do  $H_2$ , mas são importantes para traçar a estrutura e propriedades físicas da nuvem molecular. O estudo das nuvens moleculares através da detecção destas moléculas, nos permite obter os seguintes resultados:

- nuvens moleculares nunca estão isoladas;
- estas formam complexos de até 50 pc de extensão;
- elas contêm suficiente gás para formar milhões de estrelas como o Sol;
- existem aproximadamente 1000 destes complexos em nossa Galáxia.

*Como se formam as estrelas como o Sol a partir das nuvens moleculares?*

A formação começa quando uma parte do Meio Interestelar contendo nuvens de moléculas, gás frio e poeira começa a colapsar devido à gravidade causada por sua própria massa. A nuvem começa a se contrair. Ela se fragmenta e continua contraindo até que o centro se torne quente o bastante para que a reação nuclear de queima de hidrogênio se inicie. Neste ponto a contração pára e a estrela nasce.

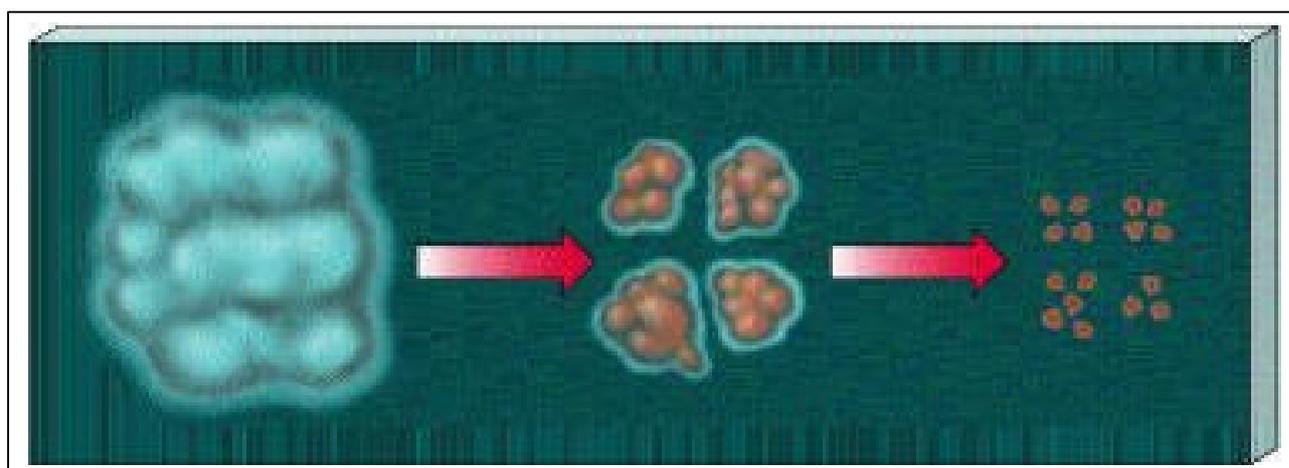


Figura 7 – Fragmentação de uma nuvem para formação de estrelas (*Chaisson & McMillan, Astronomy, fig. 11.14, p.320*).

*Mas o que determina quando uma nuvem começará a colapsar?*

Se observarmos alguns átomos de uma nuvem veremos que, apesar da baixa temperatura da nuvem, os átomos ainda têm movimento. O efeito do calor, ou seja, o movimento randômico dos átomos, é muito maior que o efeito da gravidade.

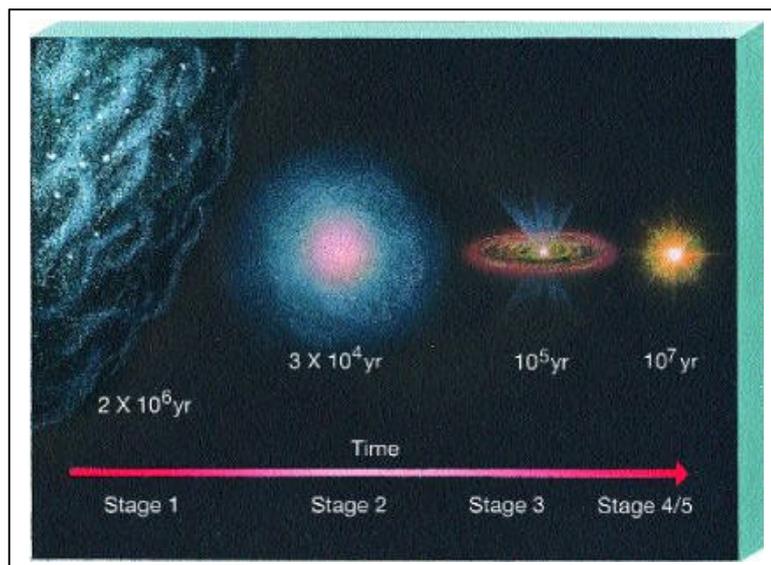


Figura 8 – Estágios de formação estelar a partir de nuvens estelares (Chaisson & McMillan, *Astronomy*, fig. 11.16, p.320).

*E se temos uma concentração de milhões de átomos? Isto é o bastante para vencer a gravidade?*

NÃO. Mesmo um milhão de átomos não são capazes de vencer a gravidade e iniciar um colapso. São necessários cerca de  $10^{51}$  átomos para uma nuvem começar a colapsar.

*Quais são os estágios da formação estelar?*

A “nuvem mãe” deve ser uma nuvem interestelar densa, por exemplo, a parte central de uma nuvem molecular com temperatura  $T = 10$  K, densidade  $\rho = 10^9$

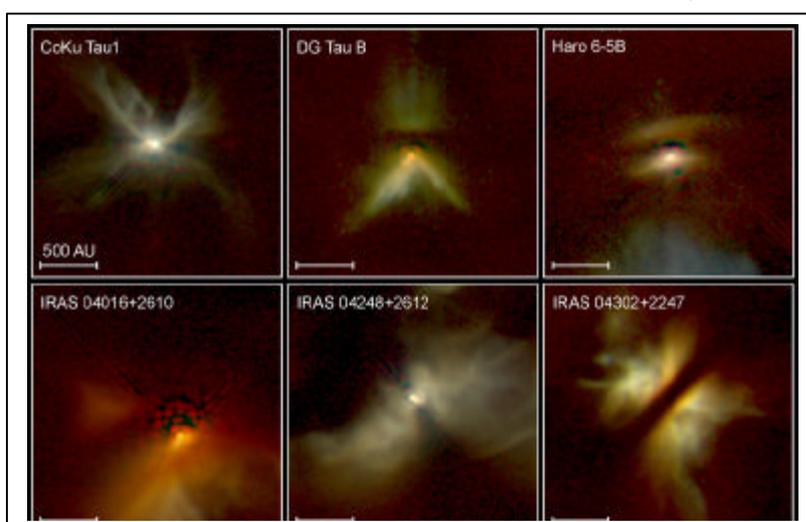


Figura 9 – Exemplos de discos de poeira ao redor de estrelas jovens, indícios de formação de sistemas planetários a partir de nuvens de gás e poeira (D. Padgett / IPAC-Caltech, W. Braudner / IPAC, K. Stapelfeld / JPL, e NASA).

partículas/m<sup>3</sup>.

Esta nuvem contém milhares de vezes a massa do Sol, em forma de gás atômico ou molecular (a fração de poeira é pequena mas importante).

O colapso inicial ocorre quando a nuvem fica instável gravitacionalmente devido a algum agente externo ou devido a uma queda de temperatura da nuvem. Nestes casos a pressão interna não é mais suficiente para impedir a contração.

A nuvem começa a

colapsar. A nuvem se fragmenta devido à instabilidade gravitacional. A medida em que se fragmenta em pedaços cada vez menores, a taxa de contração aumenta.

Os fragmentos que se contraem têm temperatura próxima a da nuvem primordial, porque toda a energia é irradiada imediatamente. Só em seu centro, a temperatura começa a aumentar. Em um dado momento o centro chega a uma temperatura  $T$  de 10000K, com densidade da ordem de  $\rho = 10^{18}$  partículas/m<sup>3</sup>.

Chamamos a nuvem em formação de uma protoestrela. Esta protoestrela desenvolve uma fotosfera. Dentro da fotosfera o material protoestelar é opaco à radiação emitida. A contração continua, a densidade e a temperatura aumentam cada vez mais. A temperatura central chega a  $10^7$  K e o hidrogênio começa a fusão em hélio. Assim, podemos dizer que a estrela recém formada chegou à seqüência principal.

Este processo pode produzir poucas estrelas (algumas dezenas) de massa muito maior que a massa do Sol, ou um aglomerado de estrelas de massa próxima a solar.

*Se isto é verdade, porquê o Sol está isolado?*

Provavelmente este sofreu uma colisão com uma estrela ou nuvem molecular e por isso escapou de um sistema múltiplo, onde deve ter sido formado.

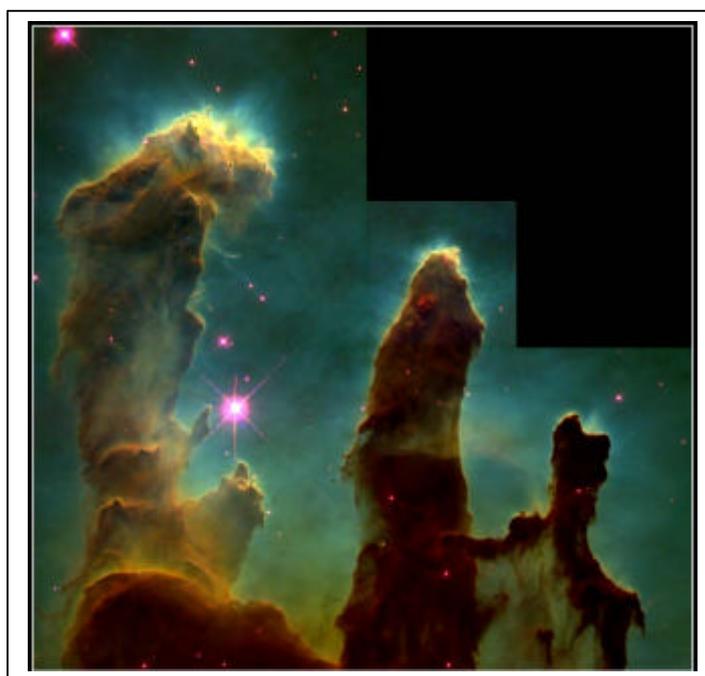


Figura 10 – Nuvens moleculares Águia M16, na constelação da Águia (J. Hester e P. Scowen / Arizona State University, e NASA).