

(Adaptado do curso AGA0215 da **Profa. Thais Idiart**)

# MEIO INTERESTELAR





**O espaço interestelar é o local onde estrelas “nascem” e onde partes delas retornam quando “morrem”.**

**Meio interestelar: gás e poeira, distribuído de modo extremamente tênue através das regiões escuras entre as estrelas.**

**Nebulosa da Águia: 10 anos-luz de tamanho (berçário estelar).**

**Pode “brilhar” como nebulosa: radiação das estrelas recém formadas excita o gás circundante,**

## A Via-Láctea fotografada de horizonte a horizonte (~180°)



**Regiões brilhantes = conjuntos de estrelas**

**Regiões escuras = regiões de matéria interestelar que bloqueiam a luz vinda das estrelas -> Extinção**

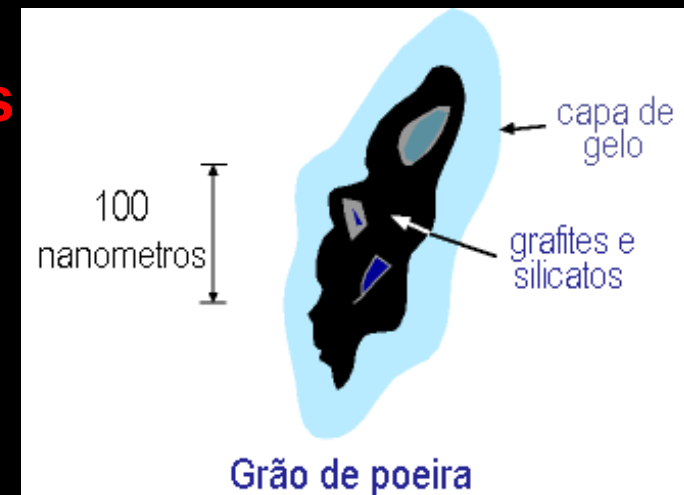
**O gás está concentrado no disco da Galáxia**

# A matéria existente entre as estrelas consiste de:

- gás
- poeira

**Gás:** átomos:  $10^{-10}$  m (0,1 nm)  
pequenas moléculas:  $< 10^{-9}$  m (1 nm)

**Poeira:** grupos de átomos e moléculas  
grão de poeira típico:  
 $10^{-7}$  m (100 nm)



**Distribuição da matéria interestelar é irregular.**

**O componente que mais obscurece a luz visível é a POEIRA**

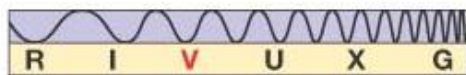
**Um feixe de luz pode ser espalhado ou absorvido eficientemente por partículas de tamanhos comparáveis ou maiores do que o  $\lambda$  da radiação incidente.**



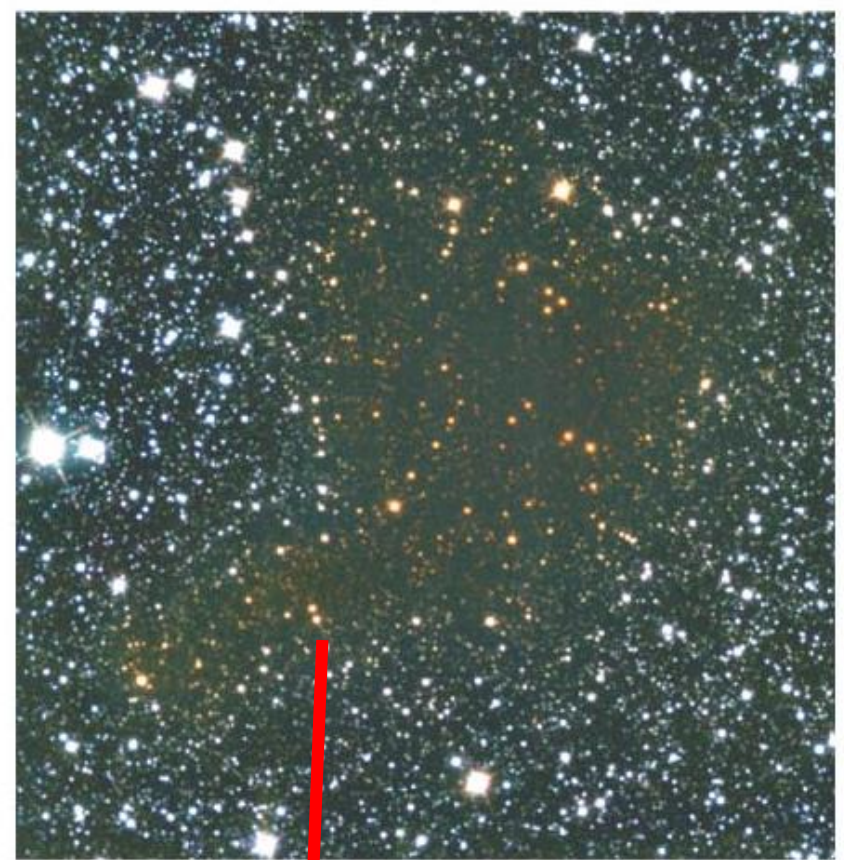
**Regiões de poeira são transparentes à radiação infravermelha e rádio e opacas à radiação no óptico, UV e raio-X**  
**⇒ ESPALHAMENTO MIE**  
**ESPALHAMENTO RALEIGH:**  
**espalhamento por moléculas**



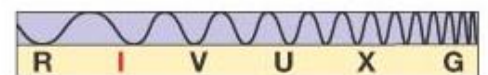
(b)



**absorção ou espalhamento  
da luz visível vinda das  
estrelas pela nuvem de poeira**



(c)



**luz vermelha vinda das estrelas  
não é espalhada ou absorvida  
pela nuvem de poeira**

A atenuação total da luz de estrelas pelo meio interestelar chama-se **EXTINÇÃO**

A luz é mais atenuada em  $\lambda$  menores  $\Rightarrow$  estrelas tendem a parecer mais avermelhadas  
**AVERMELHAMENTO INTERESTELAR**

**MÓDULO DE DISTÂNCIA CORRIGIDO DA ATENUAÇÃO:**

$$m_0 - M = 5 \log D(\text{pc}) - 5$$

$m_0$  = magnitude observada se não houvesse extinção

considerando extinção  $A_\lambda$  (em mag/pc)

$$m_0 = m - A_\lambda \times D$$

$$m - M = 5 \log D(\text{pc}) - 5 + A_\lambda(\text{mag/pc}) \times D(\text{pc})$$

$A_\lambda$  é positivo

Se não levar em conta a extinção a estrela aparentará estar mais distante, pois será observada como sendo mais fraca (maior mag.)

Em média a densidade do meio interestelar é extremamente baixa:  $10^6$  átomos por  $m^3$

Regiões variam de  $10^4$  a  $10^9$  átomos/ $m^3$

(melhor vácuo conseguido em lab :  $10^{10}$  moléculas/ $m^3$ )

Em média há somente 1 grão de poeira para cada trilhão de átomos:  $10^{-6}$  grãos/ $m^3$  (1000 grãos/ $km^3$ )

(Poeira é mais rara do que átomos e moléculas).



**Mas como o meio interestelar sendo tão pouco denso pode atenuar tanto a luz vinda das estrelas?**

A densidade de matéria interestelar é baixa, mas o volume do universo é muito grande: na vizinhança do sol a massa existente no meio interestelar é da ordem da massa existente em estrelas.

## Composição química

### Gás interestelar:

- 90% de H (atômico e molecular)
- 9% de He
- 1% de elementos + pesados

**C, O, Si, Mg e Fe são menos abundantes no gás interestelar do que nas estrelas**

**Grãos: formados por silicatos, grafite e ferro contém tb gelo sujo (água + amônia + metano)**



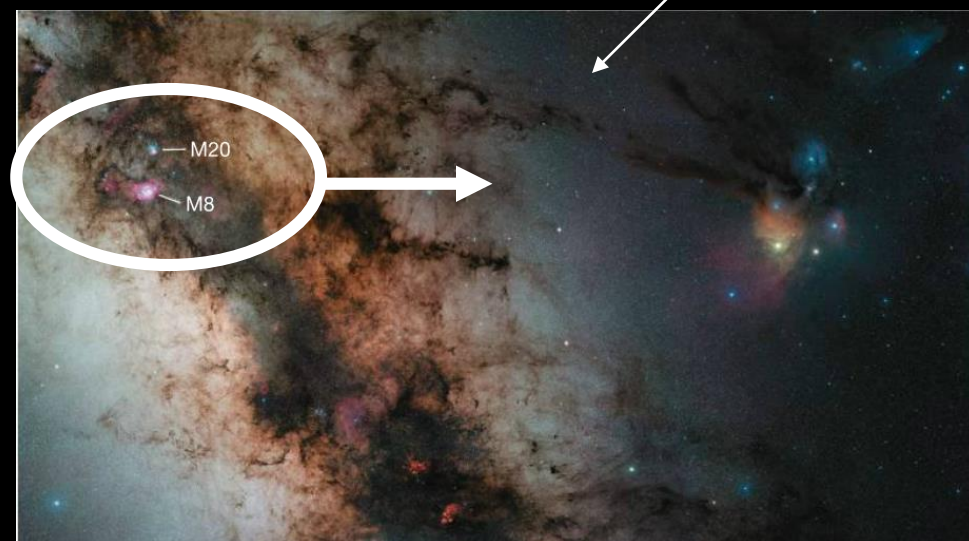
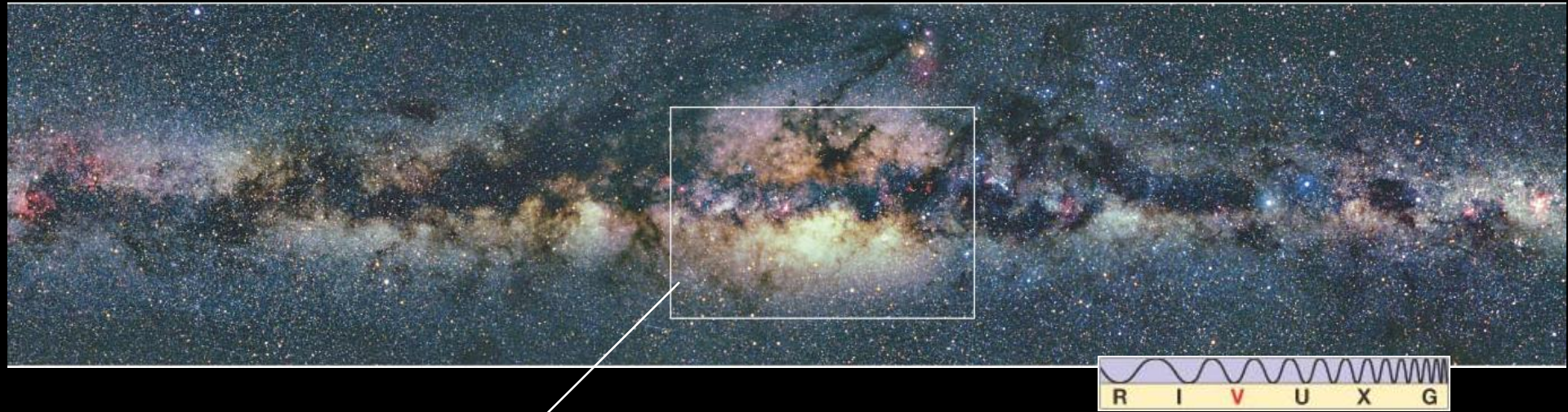
**Indicativo de que a sub-abundância de C, O, Si, Mg e Fe no gás interestelar está sob forma de grãos.**



**Grãos são formados no gás interestelar (condensação).**

Nem todas as nuvens  
de gás aparecem como  
nuvens escuras

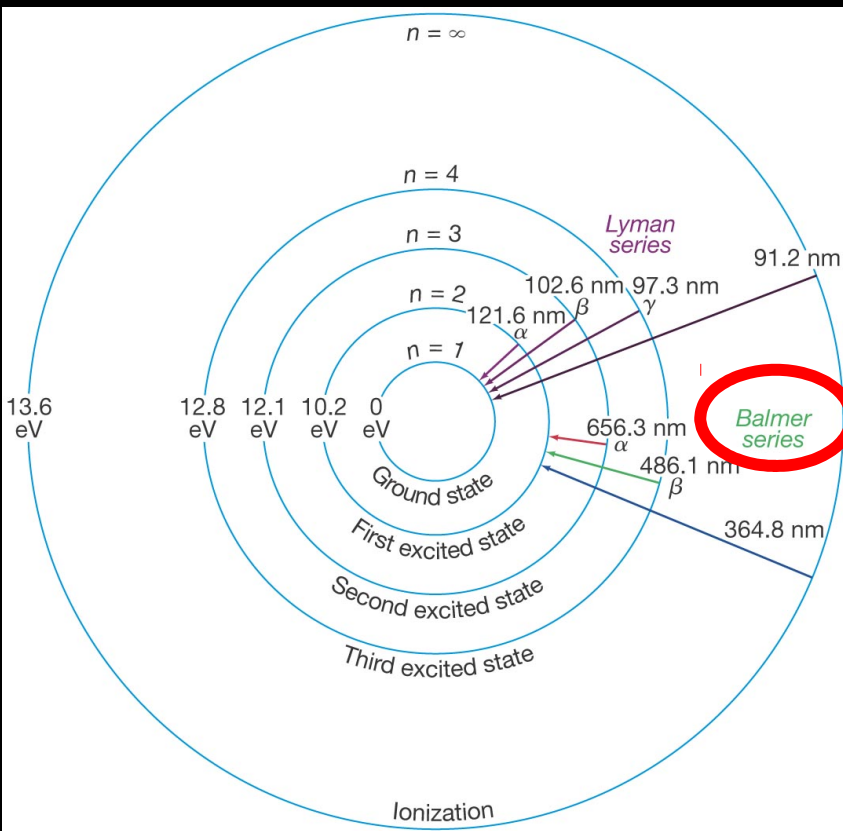
## NEBULOSAS DE EMISSÃO



**Nebulosas de emissão**

**São regiões de gás  
ionizado por estrelas  
jovens recém formadas**

**Estrelas jovens e quentes do tipo espectral O-B produzem radiação UV que ioniza o gás interestelar ao redor destas estrelas.**



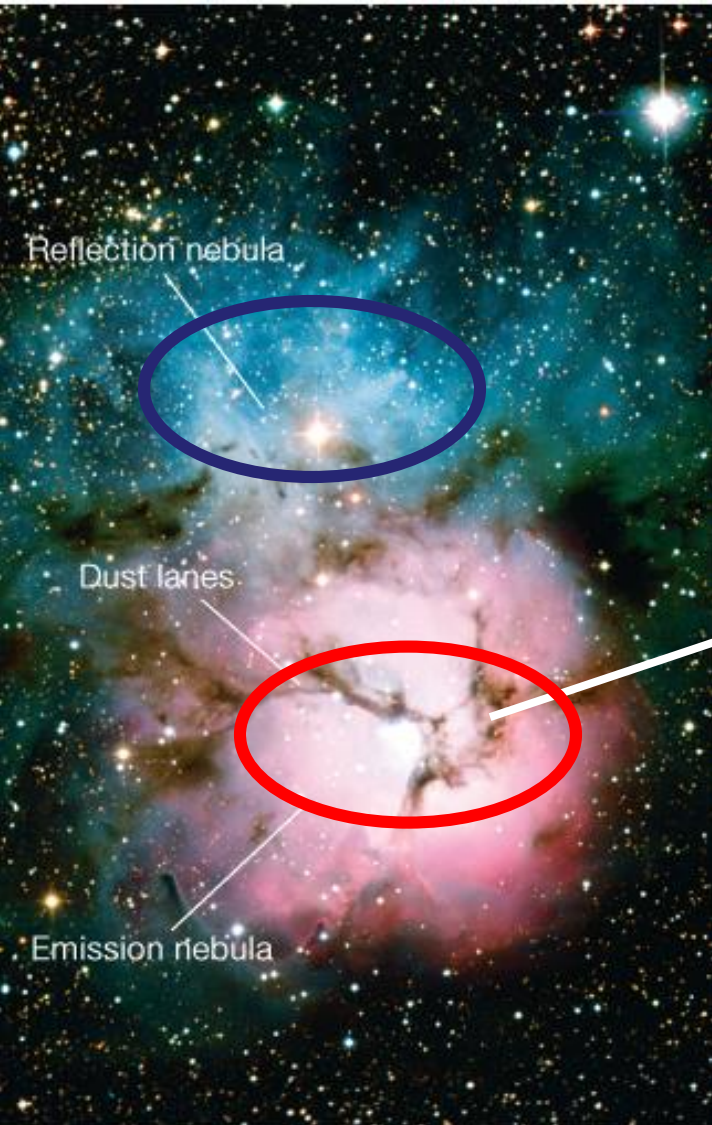
**Quando os elétrons voltam a se recombinar com o átomo, ocorrem transições para níveis mais baixos.**

**Radiação visível pode ser emitida (série de Balmer) fazendo com que as nuvens de gás “brilhem”.**

**AO PASSAR PELA NUVEM, FÓTONS UV VINDOS DA ESTRELA SÃO TRANSFORMADOS EM FÓTONS NO VISÍVEL**

**A cor verdadeira da maior parte da radiação emitida é avermelhada  $\lambda$  6563 Å (linha do H [ $H\alpha$ ])**

# Nebulosa Trífida (M20)



**Nebulosa de reflexão: luz visível vinda da nebulosa de emissão espalhada pela nuvem de poeira (luz azul )**

**Camadas de poeira (regiões escuras)**

**Nebulosa de emissão = brilha no vermelho (visível) devido à presença de estrelas quentes**

(a)

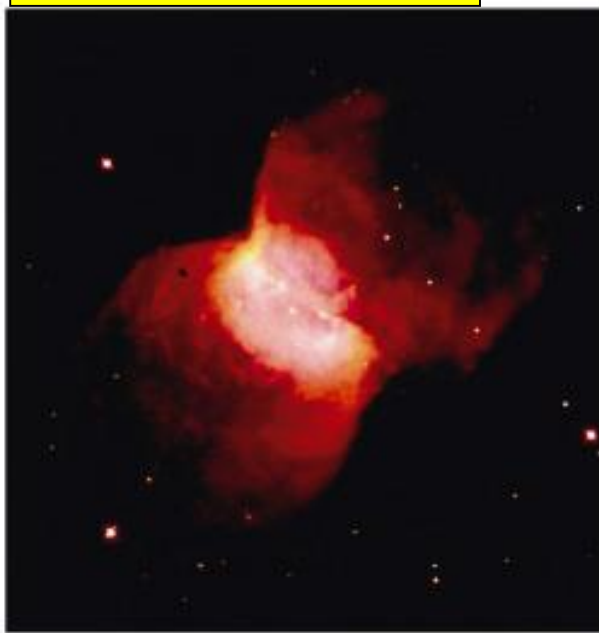


# ESPECTRO DA NEBULOSA

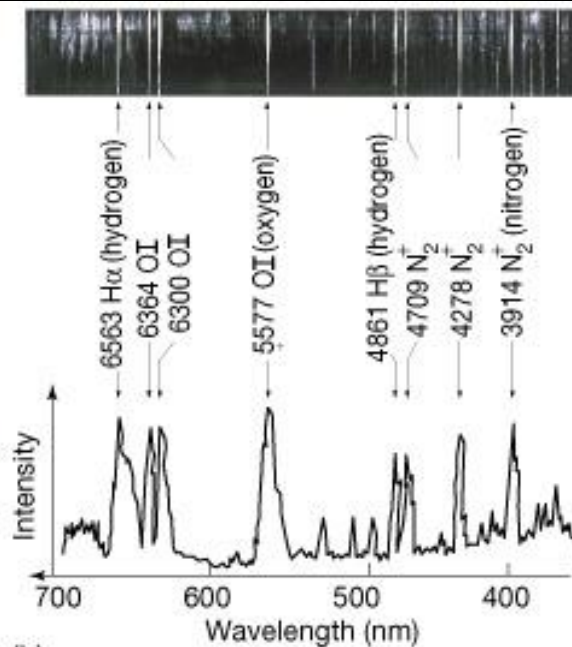
NGC 2346

0.2 pc de extensão

D = 700 pc



(a)



(b)

Nebulosas de emissão, formadas por gás quente e de baixa densidade, produzem linhas de emissão no espectro

# NUVENS ESCURAS



**90% do meio interestelar é composto por regiões escuras (sem estrelas e sem nebulosas brilhantes)**

**Temperatura típica de uma região escura= 100 K**

**congelamento da água  $T=273\text{ K}$**

**movimentos atômicos e moleculares cessam  $T=0\text{ K}$**

**Nuvens escuras de poeira  $\Rightarrow T \sim$  dezenas de K (regiões + frias)**

**Densidade =  $10^7$  a  $10^{12}$  átomos/ $\text{m}^3$**

**( $10^3$  a  $10^6$  x mais denso do que o MI na sua vizinhança)**

# Nebulosa da Cabeça do Cavalo

Nuvem escura de poeira cercada por uma brilhante nebulosa de emissão

Toda a nuvem brilhante há uma nuvem escura associada





## RADIAÇÃO DE 21 CM

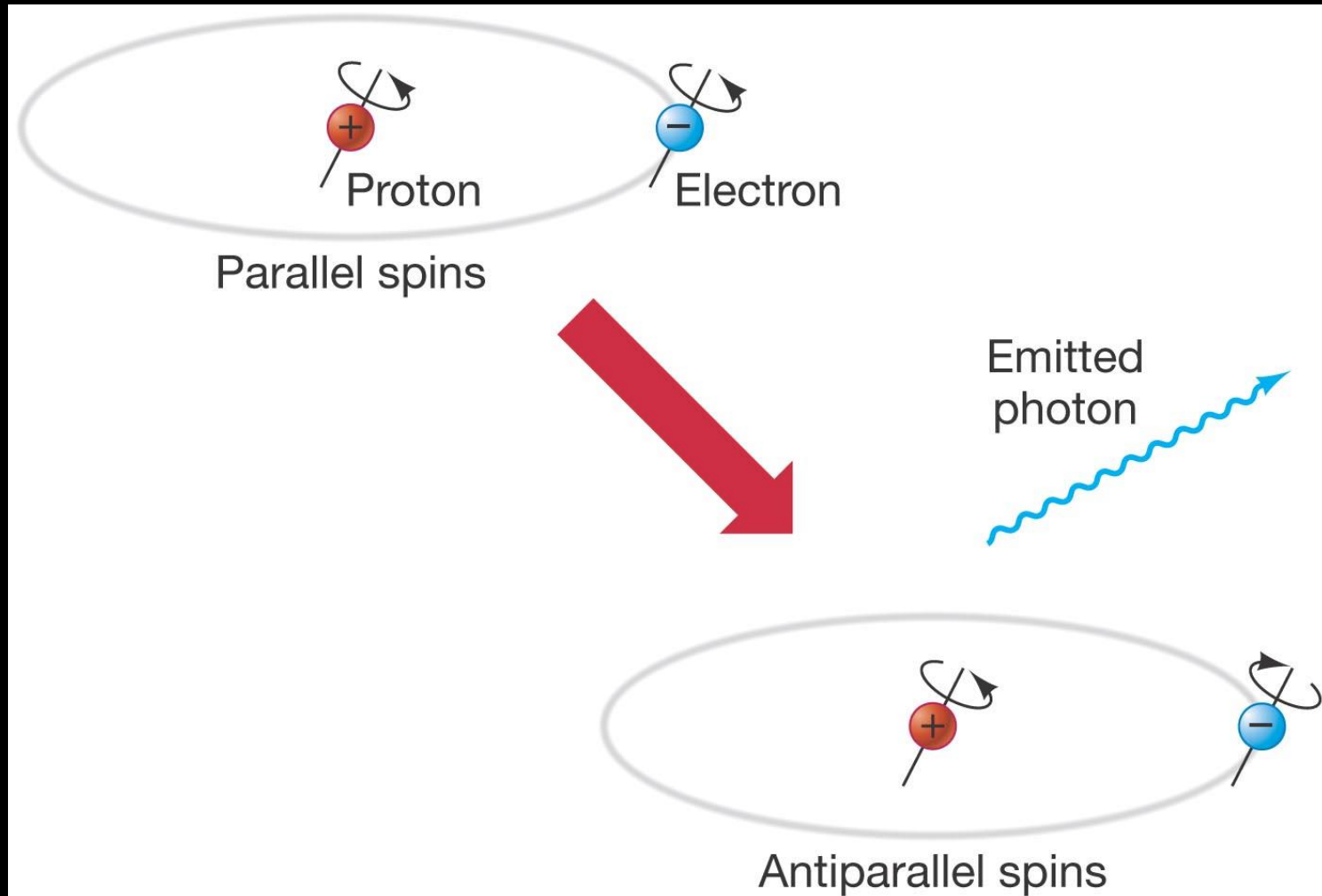
Método mais eficiente para observar a distribuição de gás interestelar:

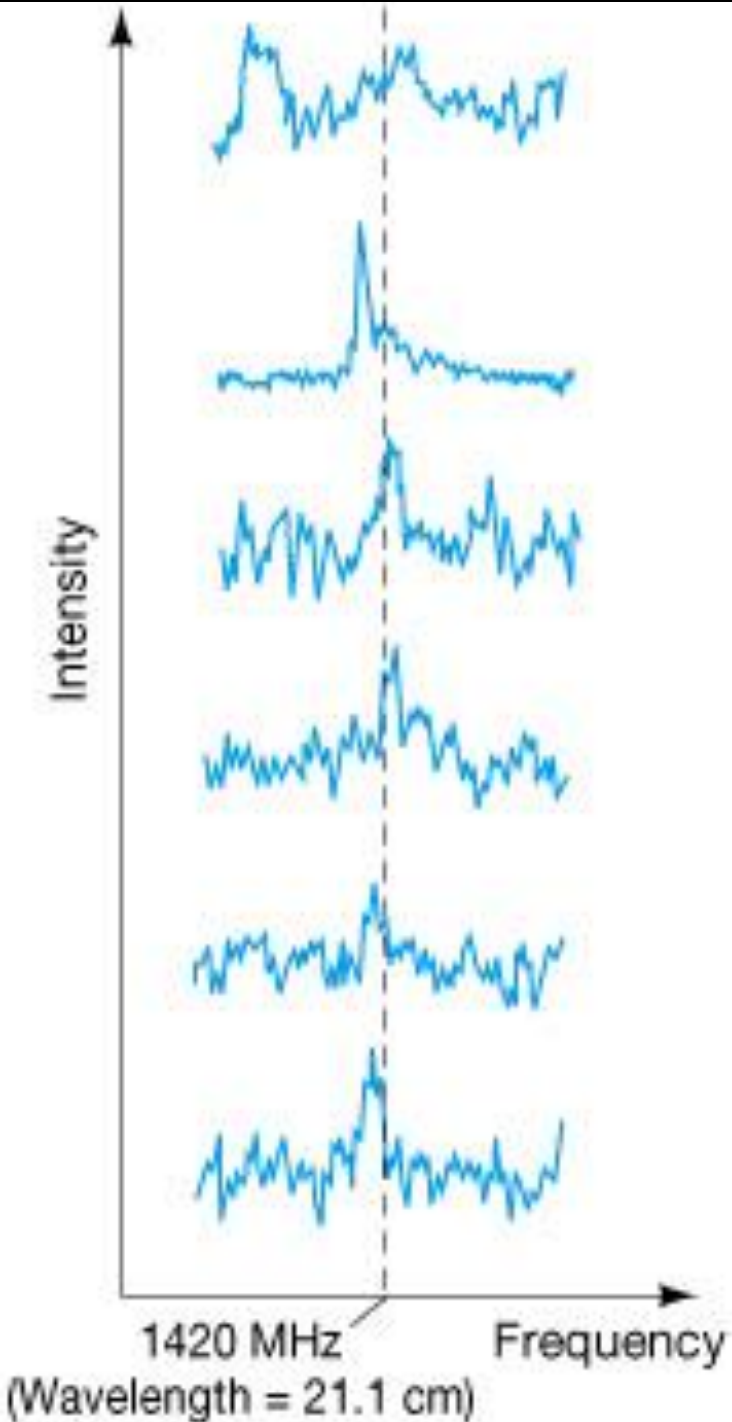
emissão em rádio da linha de 21 cm do H



- mapeamento das nuvens de **gás de H neutro**
- informações sobre densidade, temperatura e movimentos internos das nuvens de gás

O gás interestelar emite radiação de baixa energia, devido a transição do H para um estado de energia um pouco mais baixo = próton e elétron rotando em diferentes direções.





**Observações em diferentes regiões do espaço:**

**linhas deslocadas devido ao movimento das nuvens em relação a Terra.**

## NUVENS MOLECULARES

$H_2$  é esperado como sendo o mais abundante na nuvem molecular  $\Rightarrow$  *mas emite só no UV !* O gás e poeira existentes nas nuvens moleculares absorvem ou espalham a radiação UV emitida pela molécula de  $H_2 \Rightarrow$  difícil detecção

**Observações usam outras moléculas (emissoras/absorvedoras em radio):  
CO, HCN,  $NH_3$ ,  $H_2O$ ,  $CH_3OH$ ,  $H_2CO$**

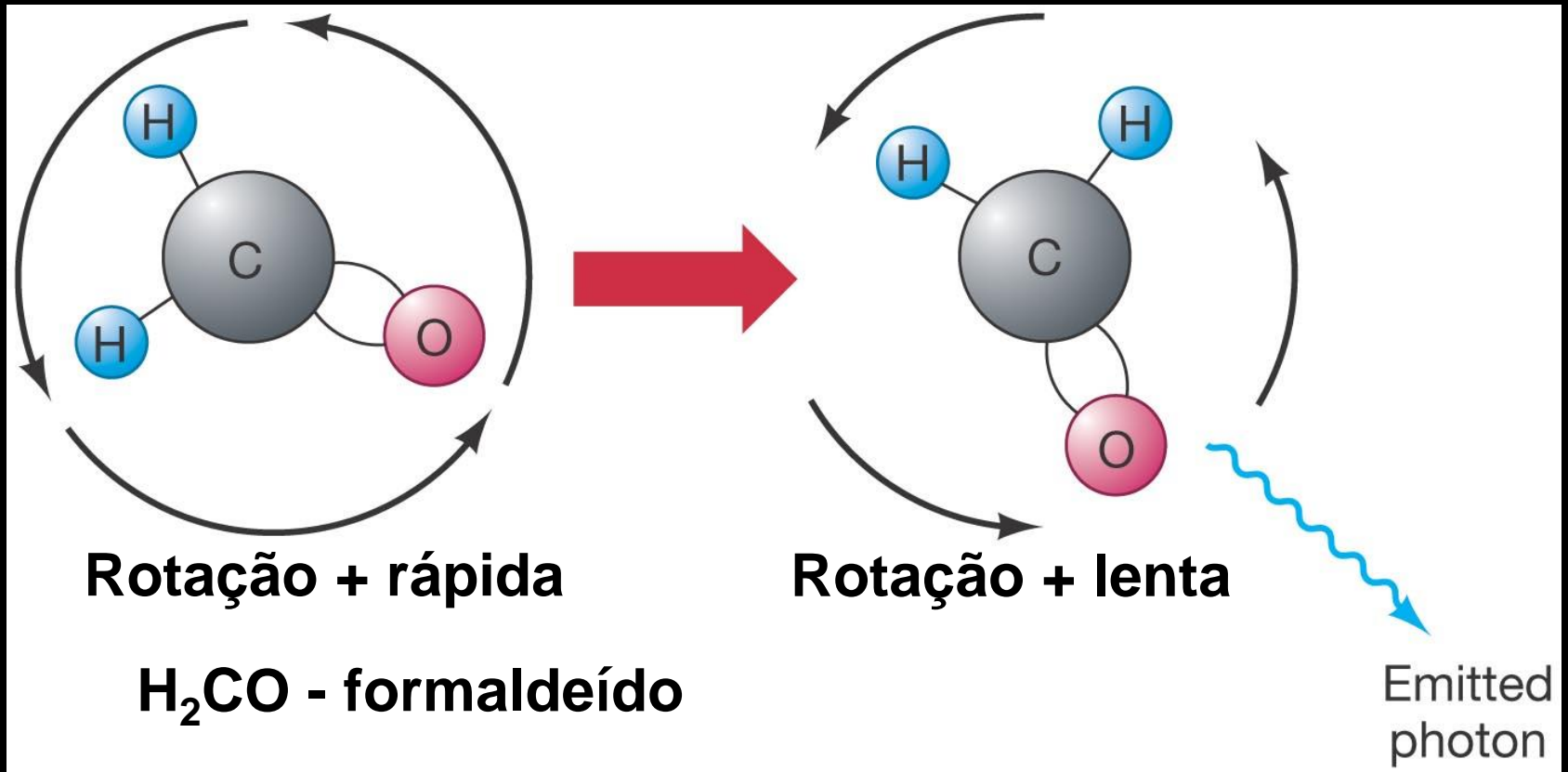
monóxido de carbono, ácido cianídrico, amônia, água, metanol, formaldeído

**T ~ 20-50 K e densidade ~  $10^{11}$  moléculas/ $m^3$**

**Existem hoje mais de 100 espécies moleculares detectados**

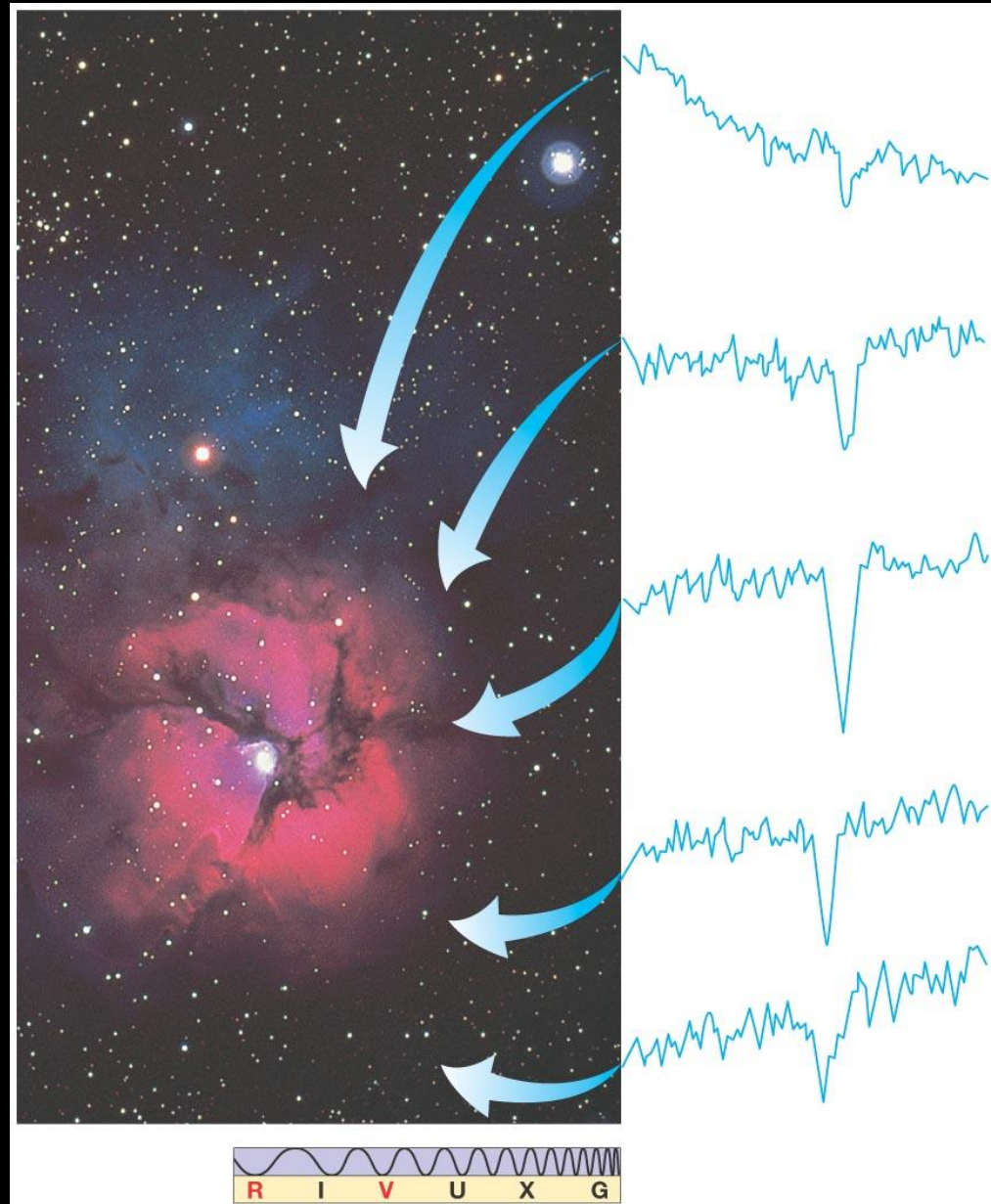
As nuvens mais densas são também muito frias (20 K). Estas nuvens tendem a conter moléculas ao invés de átomos.

Transições entre estados rotacionais de uma molécula emitem ou absorvem fótons na frequência de rádio.

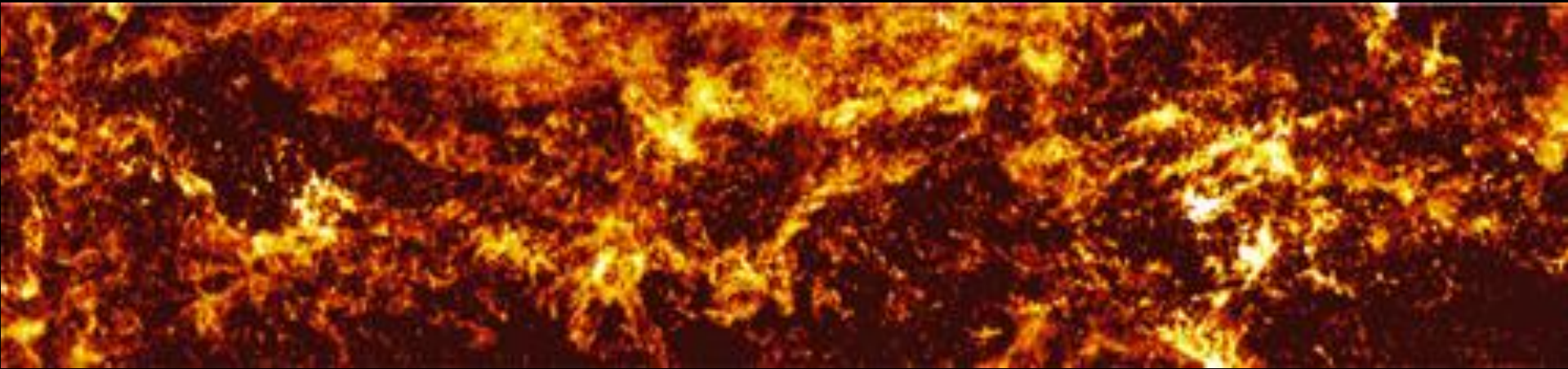


**Espectro de absorção (gás +denso) do formaldeído ( $H_2CO$ ) em diferentes partes de M20:**

**linhas de absorção da luz que vem de trás da nuvem são mais intensas nas camadas escuras .**



# Mapa de CO em emissão do plano da Galáxia



**Regiões brilhantes são complexos de nuvens moleculares onde moléculas são mais abundantes e há formação estelar.**

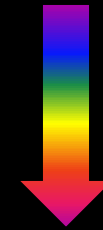
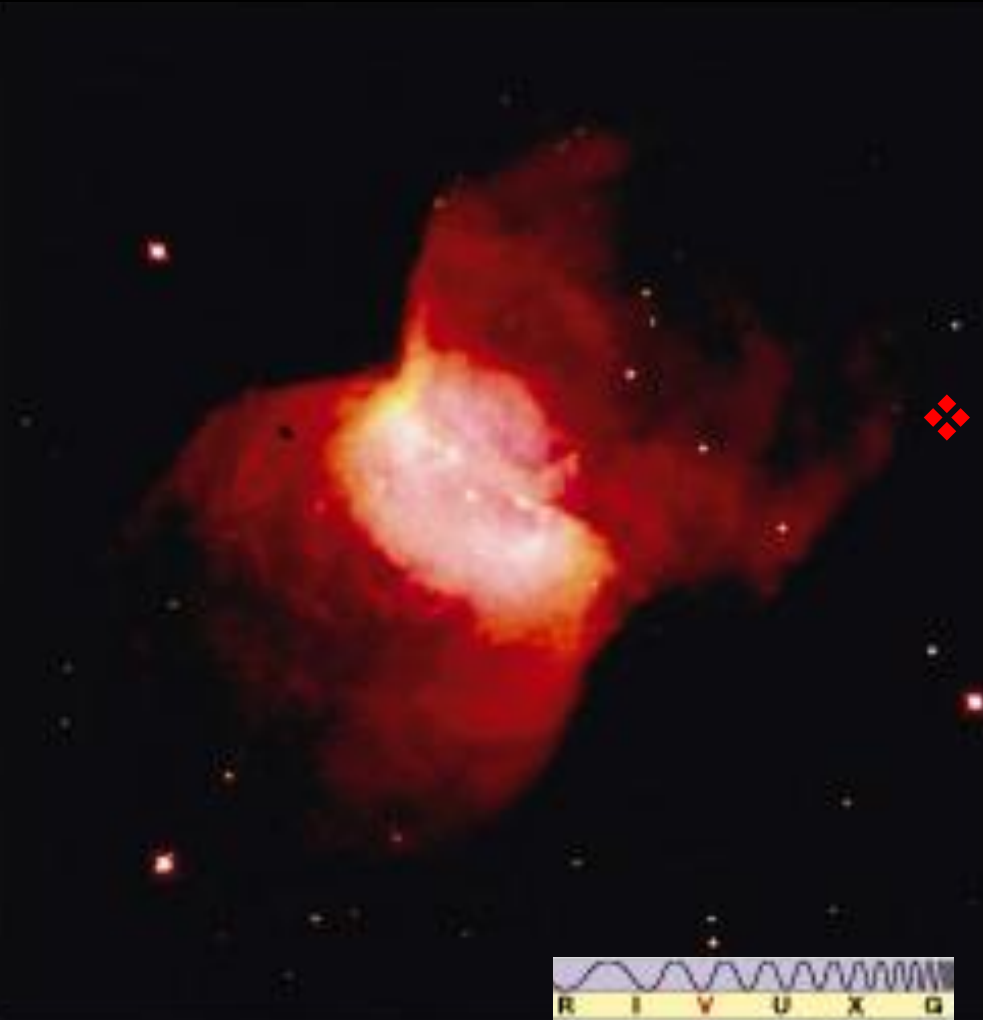
**Complexos de nuvens moleculares = nuvens moleculares gigantes (NMG): podem formar cerca de milhões de estrelas como o Sol.**

A background image of a star-forming region, likely the Orion Nebula, showing a dense field of stars and dark dust lanes. The stars are predominantly white and blue, with some larger, brighter stars. The dust lanes are dark and irregularly shaped, creating a complex pattern against the reddish-brown background of the nebula. The overall scene is dynamic and energetic, representing the birth of new stars.

# FORMAÇÃO ESTELAR

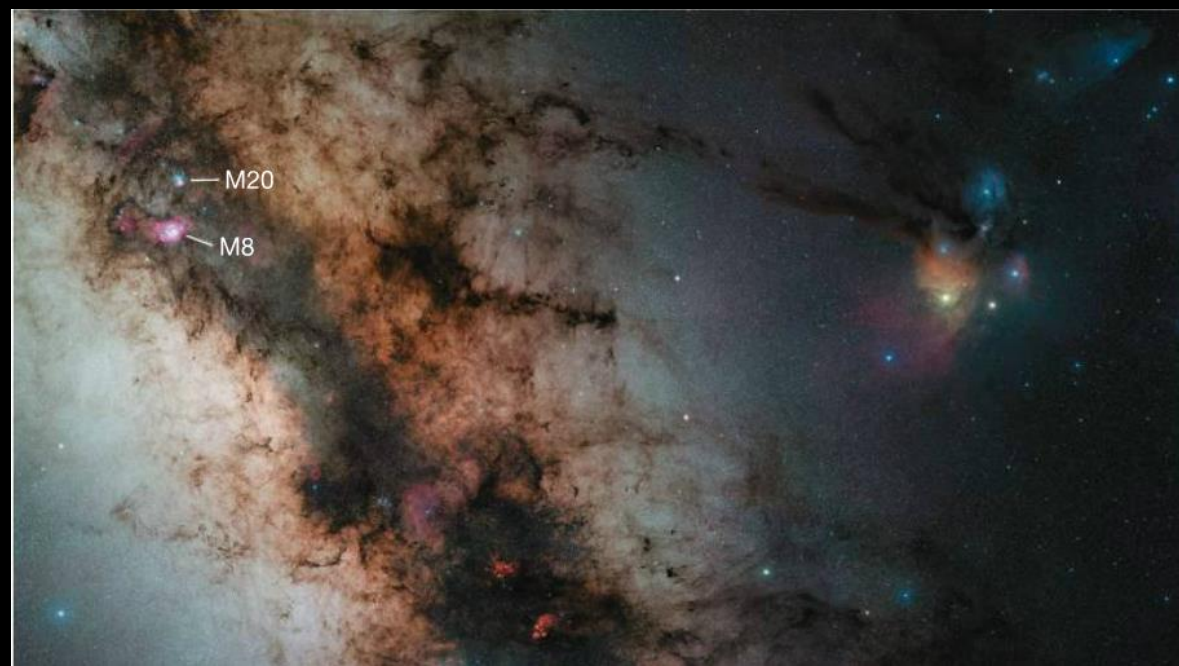


❖ **Evidência de formação estelar recente** ⇒  
**nebulosas de emissão : nuvens de gás ionizado pela  
radiação de estrelas jovens e quentes**



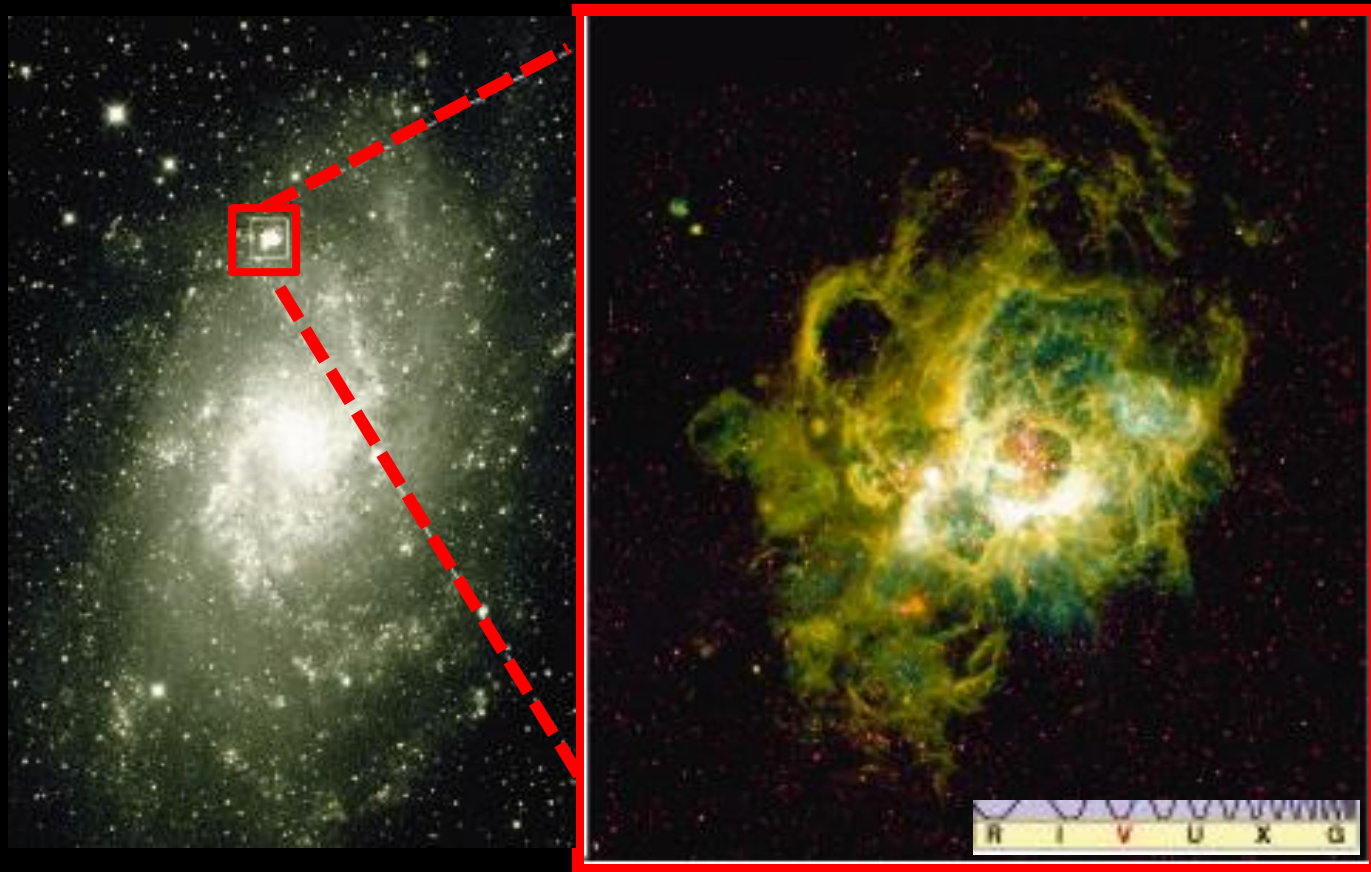
❖ **Formação de estrelas na  
nossa Galáxia ainda  
continua existindo**

# ❖ Sítios de formação estelar estão no plano do disco da Galáxia



❖ **Regiões de formação estelar são observadas em muitas outras galáxias também.**

**Nebulosa de emissão gigante de 500 pc de extensão pertencente a galáxia M33 (M33 está a 1 milhão de pc da nossa Galáxia)**



1pc =  $3,09 \times 10^{13}$  Km =  $2,06 \times 10^5$  UA = 3,26 anos-luz

❖ **Nebulosas de emissão indicam o local de nascimento de estrelas**




❖ **Nebulosas de emissão estão associadas a nuvens escuras frias de matéria interestelar**



❖ **Nuvens escuras são sítios de formação de estrelas**

❖ **Como ocorre a formação de uma estrela a partir de uma nuvem de gás frio?**

**PROCESSO:**

- 1. Nuvem fria colapsa sob seu próprio peso**
- 2. Durante o colapso ocorre fragmentação**
- 3. Os fragmentos continuam a colapsar e começam a esquentar a medida que vão se contraindo**
- 4. Eventualmente a temperatura do centro de cada fragmento alcança um valor alto o suficiente para ocorrer a cadeia p-p.**
- 5. Contração pára e  s nascem**

# **ATENÇÃO!!**

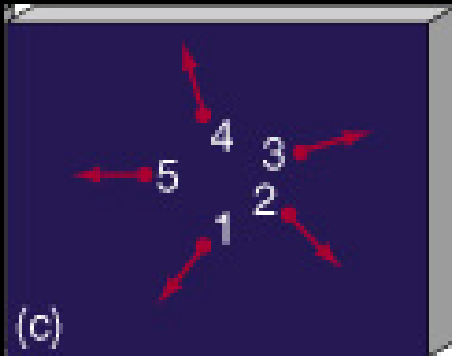
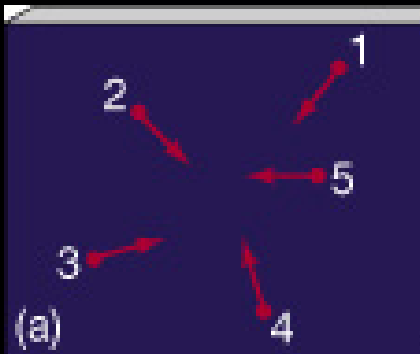
**O processo ocorre somente se a massa de cada fragmento for grande o suficiente**

**Os átomos de uma nuvem fria de gás (100K) estão em movimento (=agitação térmica)**

**Quando ocorre um encontro de alguns átomos eles tendem a ser atraídos pela sua força gravitacional**

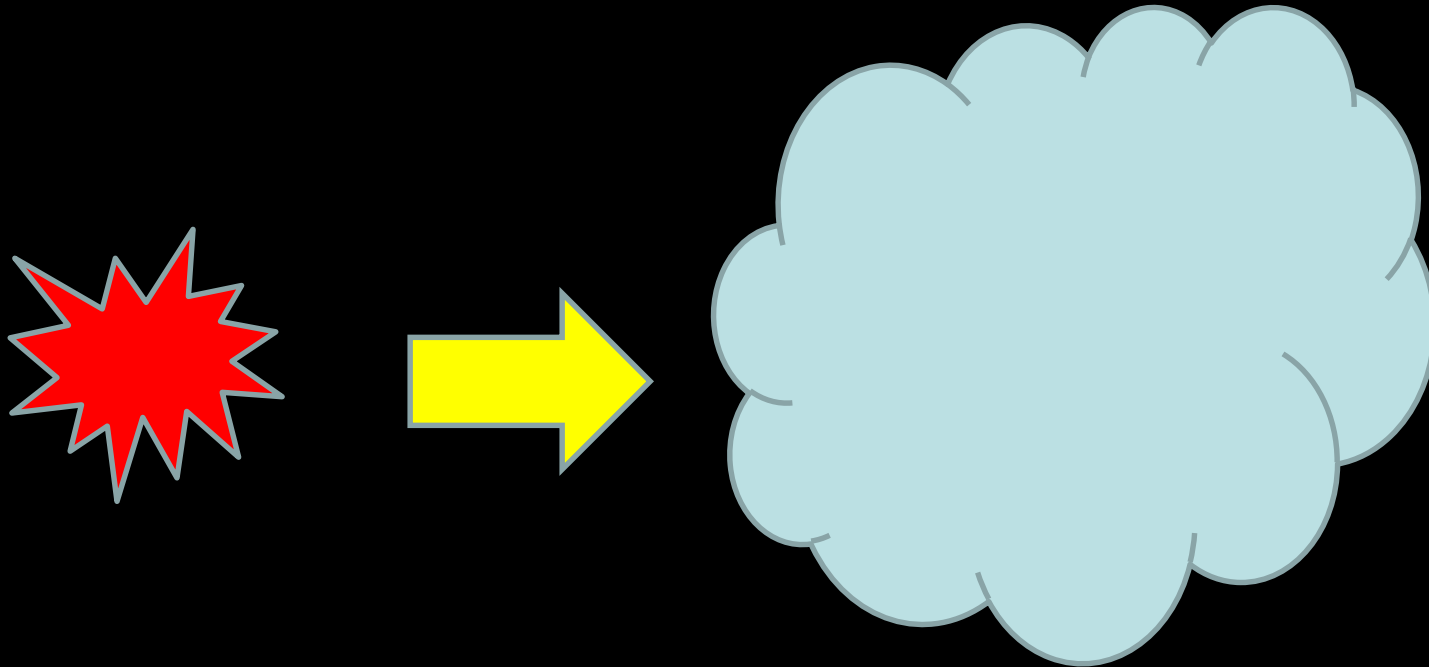
**Depois de algum tempo, os átomos acabam se agrupando**

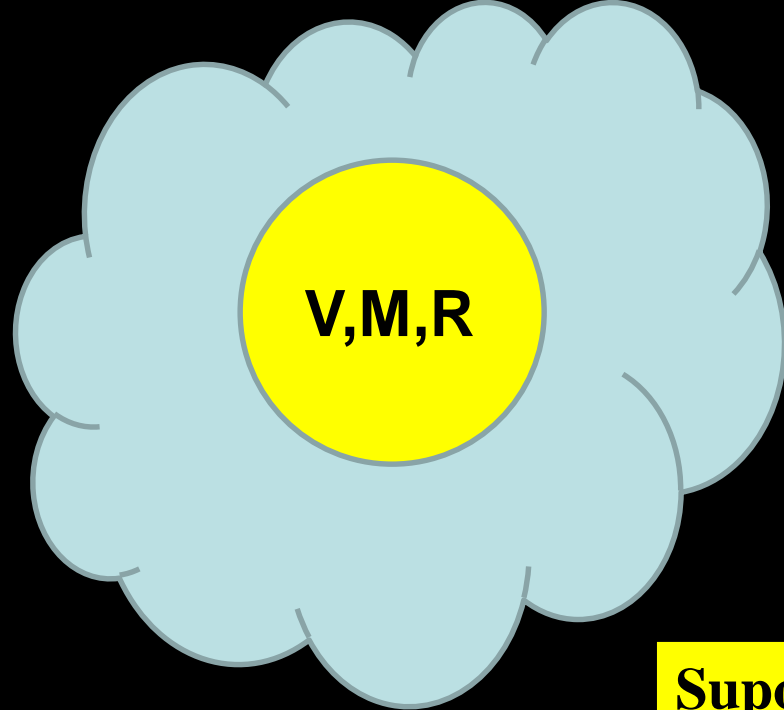
**Mas se a força gravitacional não for grande o suficiente para mantê-los ligados, a sua agitação térmica tende a dispersá-los novamente**



## COLAPSO GRAVITACIONAL

- Considerando (caso ideal) uma nuvem de baixa densidade, temperatura uniforme e equilíbrio hidrostático.
- Uma perturbação aleatória produz uma região de maior densidade: ação gravitacional e pressão aumentam.





Para descrever uma nuvem de gás formada por  $N$  partículas, podemos partir do TEOREMA DO VIRIAL onde:

$$\frac{1}{2} \frac{d^2 I}{dt^2} = 2K + U$$

Varição da distribuição da massa de um corpo em torno de um eixo de rotação

Supondo que as partículas da nuvem estejam em equilíbrio (momentum de inércia não varia com o tempo) :  $2K + U = 0$

A energia cinética total de um conjunto de  $N$  partículas pode ser representada pela energia térmica de um gás ideal a uma temperatura  $T$  :

$$K = \frac{3}{2} N k_B T \quad k_B = \text{constante de Boltzmann}$$





V,M,R

$$K = \frac{3}{2} N k_B T$$

A quantidade de partículas  
pode ser representada por:

$$N = \frac{M}{m} = \frac{M}{\mu m_H}$$

$\mu$  = peso molecular médio (u.m.a.)

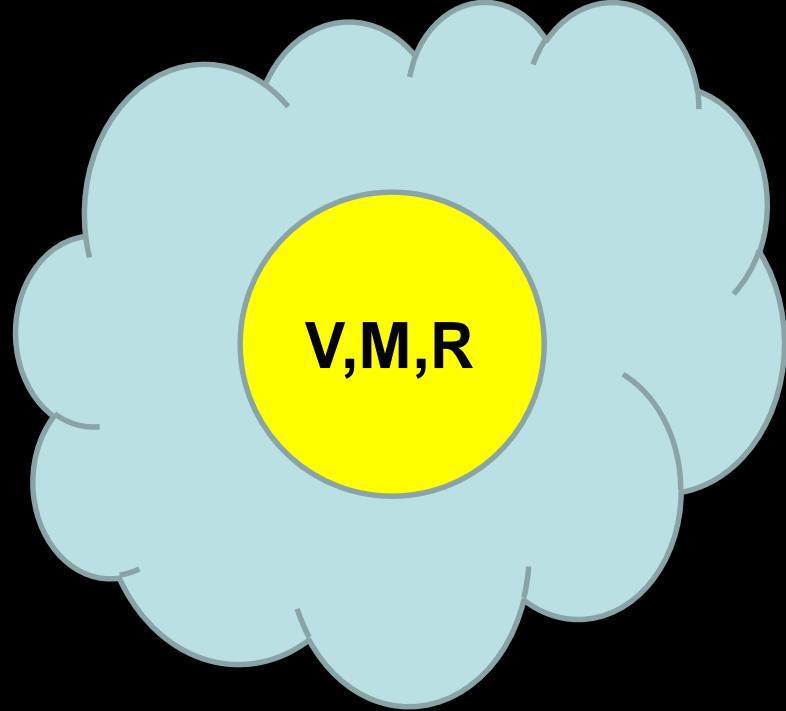
$m_H$  = massa do hidrogênio ( $\mu \sim 1$  u.m.a.) =  $1,66 \times 10^{-24}$  g

**peso molecular médio = massa atômica  $\times$  quantidade de átomos**

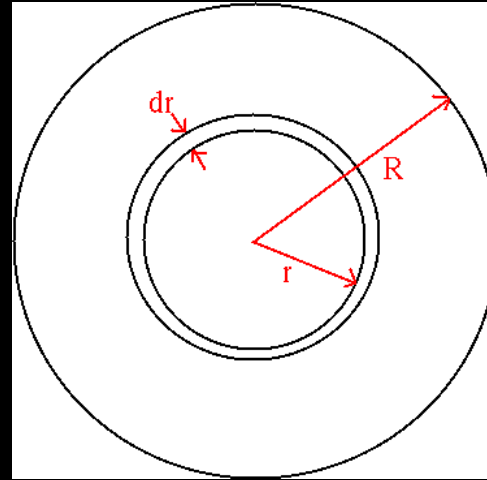
**Ex. H<sub>2</sub>O:  $\mu \sim 18$  u.m.a.**

A energia cinética total será:

$$K = \frac{3 k_B T M}{2 \mu m_H}$$



Considerando uma esfera de raio  $R$ , formada por camadas de espessura infinitesimais  $dr$  e massas infinitesimais  $dm$ :



Para cada camada temos uma energia potencial:

$$dU = - \frac{GM(r)dm}{r}$$

Também para cada camada temos:

$$\text{Volume da superfície} = 4\pi r^2 dr$$

$$\text{Densidade} = \rho(r)$$

$$\text{massa da superfície } dm = 4\pi r^2 \rho(r) dr$$

$$dU = - \frac{GM(r)dm}{r}$$

Supondo uma densidade média:

$$M(r) = \frac{4}{3} \pi r^3 \bar{\rho}$$

Então:

$$dU = - \frac{G \left( \frac{4}{3} \pi r^3 \bar{\rho} \right) (4\pi r^2 \bar{\rho} dr)}{r}$$

$$= - \frac{16G\pi^2 \bar{\rho}^2}{3} r^4 dr$$

**Integrando sobre toda a superfície esférica:**

$$U = - \frac{16G\pi^2 \bar{\rho}^2}{3} \int_0^R r^4 dr = - \frac{16G\pi^2 \bar{\rho}^2}{3} \frac{R^5}{5}$$



V,M,R

$$U = -\frac{16G\pi^2\bar{\rho}^2 R^5}{3 \cdot 5}$$

Considerando densidade média constante:

$$\bar{\rho} = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3}$$

Então:

$$U = -\frac{3GM^2}{5R}$$

Substituindo as expressões para K e U no teorema de virial:

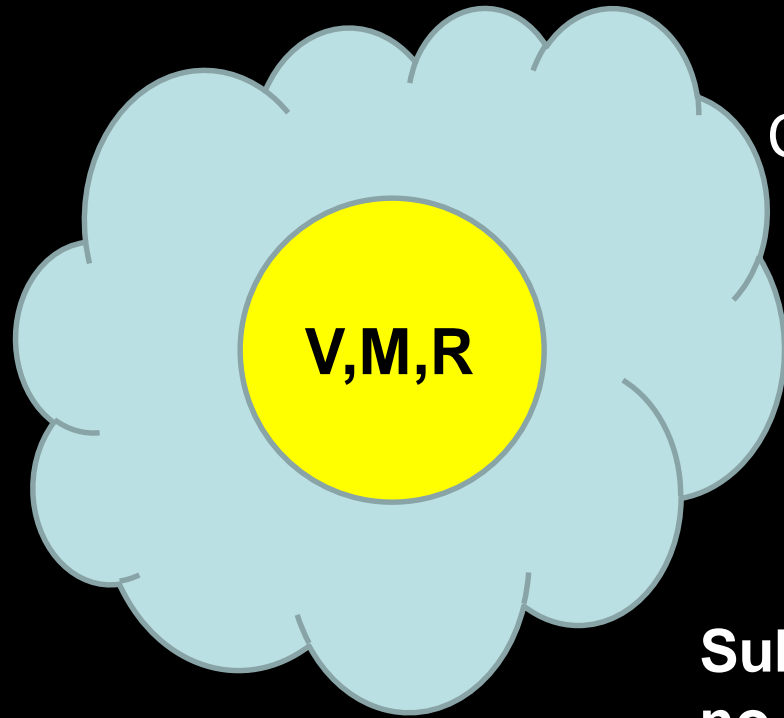
$$2K + U = 0$$

$$\frac{3k_B T M}{\mu m_H} = \frac{3GM^2}{5R}$$

Temos 3 opções:

- Se  $|2K| = |U| \Rightarrow$  a nuvem está em equilíbrio virial
- Se  $|2K| > |U| \Rightarrow$  expansão da nuvem
- Se  $|2K| < |U| \Rightarrow$  contração da nuvem = colapso

$$2K + U \neq 0$$





V,M,R

Usando:

$$\frac{3k_B T M}{\mu m_H} = \frac{3 G M^2}{5 R}$$

Obtemos:

$$R = \frac{5\mu m_H G M}{k_B T}$$

R é chamado de RAIO DE JEANS  $R_J$

⇒ limite inferior para a dimensão de uma região estável de massa M e temperatura T.

$$R = \frac{5\mu m_H GM}{k_B T}$$

Sabendo que :

$$M = \frac{4\pi}{3} R^3 \bar{\rho} \quad e \quad R_J = \frac{5\mu m_H GM}{k_B T}$$

$$M = \frac{4\pi}{3} \left( \frac{5\mu m_H GM}{k_B T} \right)^3 \bar{\rho}$$

$$M_J = \left( \frac{3}{4\pi \bar{\rho}} \right)^{1/2} \left( \frac{5k_B T}{\mu m_H G} \right)^{3/2}$$

**$M_J$  é chamada massa de Jeans**

Para uma nuvem de densidade  $\bar{\rho}$ , temperatura  $T$  e composição química  $\mu$ :

**Critério de Jeans : se  $M_{nuvem} > M_J$  a nuvem colapsa!**

Em unidades de massa solar

$$M_{\text{nuvem}} > M_J = 2,3 \times 10^{-10} \frac{T^{3/2} (K)}{\mu^{3/2} \rho^{1/2} (g / cm^3)} M_{\odot}$$

Em uma nuvem de H ( $\mu \sim 1$  u.m.a.) com:  $T=100$ K e  $n \sim 1$  cm<sup>-3</sup> :  
considerando  $m_H = 1,66 \times 10^{-24}$  g  $\Rightarrow \rho = 1,66 \times 10^{-24}$  g cm<sup>-3</sup>

$$M_{\text{nuvem}} > 2 \times 10^5 M_{\odot}$$

$\Rightarrow$  dadas essas condições, somente massas grandes podem colapsar pela instabilidade de Jeans

Massa da nuvem mãe da ordem de um aglomerado de estrelas

Durante o colapso da nuvem mãe ocorre sua fragmentação: formação de estrelas (aglomerados estelares).

## O colapso da nuvem mãe não ocorre de maneira homogênea!

a medida que a nuvem colapsa os fragmentos formados também colapsam  $\Rightarrow$  aumentam de densidade  $\Rightarrow M_J$  de cada fragmento é menor  $\Rightarrow$  formação de estrelas.

**Estrelas se formam por fragmentação da nuvem colapsante: os fragmentos colapsam mais rápido do que a nuvem como um todo.**

**Exemplo, analisando um fragmento:  $T=100K$ ,  $\mu \sim 1u.m.a.$  e  $n=10^9 \text{ cm}^{-3}$  ( $2 \times 10^{-15} \text{ gcm}^{-3}$ ) (colapso isotérmico: fragmento ainda conserva  $\sim T$  da nuvem mãe )**



**$M_{\text{frag}} > M_J \sim 5 M_{\odot} \Rightarrow$  uma única estrela pode se formar**



**Se a nuvem continuar colapsando isotermicamente, estruturas cada vez menores podem se formar (ex. planetas).**

**Se o colapso se tornar adiabático, isto é, sem perda de energia (nuvem opaca), a fragmentação cessa!**

## Outros fatores que podem interferir no colapso:

- Rotação da nuvem de gás
- Campo magnético

A massa sempre deve ser suficiente para a força gravitacional sobrepor os efeitos da rotação e magnetismo.

**$M_j$  fica maior se considerarmos rotação e campo magnético!!!**

