



# FORMAÇÃO DE ESTRELAS

JOSÉ WILLIAMS VILAS-BOAS

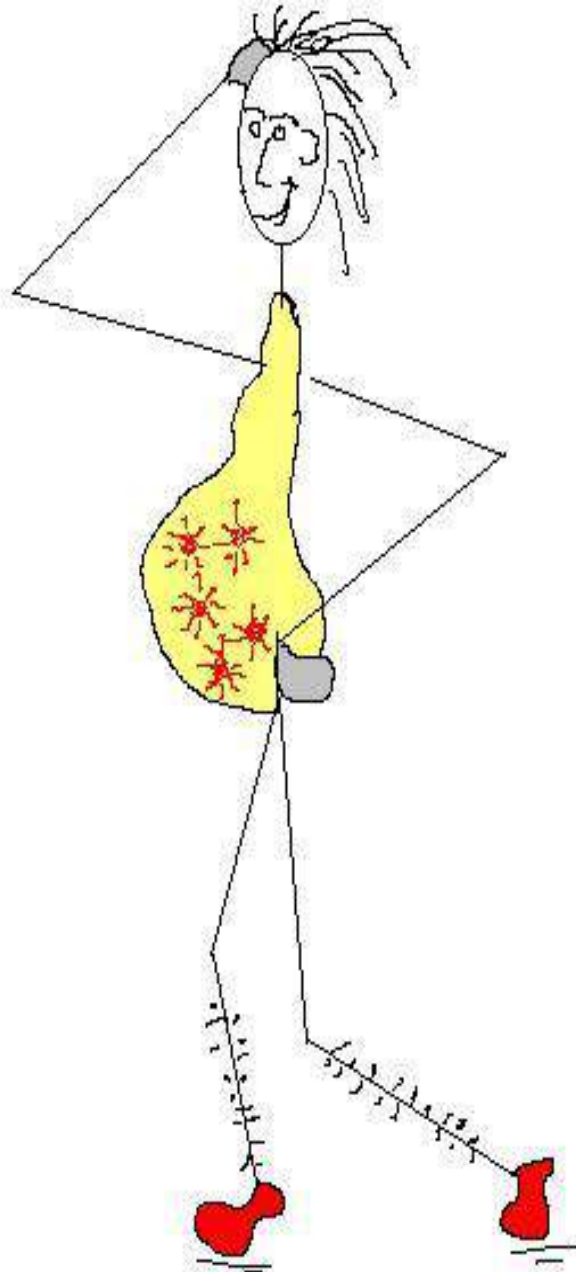
Divisão de Astrofísica

[Williams.boas@inpe.br](mailto:Williams.boas@inpe.br)

[jwboas@gmail.com](mailto:jwboas@gmail.com)

# FISICA DO PROBLEMA

ABORDAGEM SIMPLIFICADA





# 1 - Introdução

- O que se pensava sobre as estrelas ?
- 1.1 - Pré-Socrático:

➔ – Anaximandro (610 a.c.)

“O Sol e a Lua são anéis de fogo circundados pelo ar”

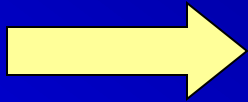
➔ – Anaximenes (discípulo de Anaximandro)

“O ar era a substância básica da qual se originavam todas as coisas.”



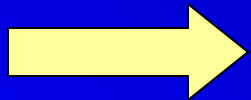


## • 1.1 - Pré-Socrático:



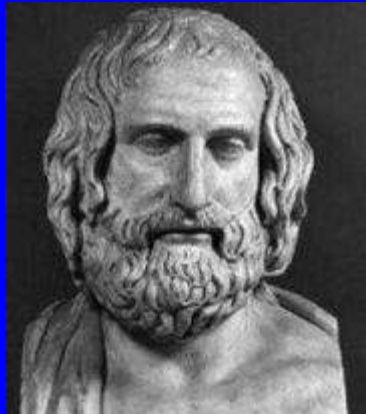
– Heráclito

"O universo se equilibra entre duas forças e o fogo tem primazia como agente de mudanças. Os corpos celestes são taças de fogo"



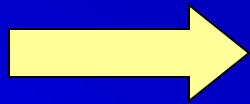
– Anaxágora (476 a.c.)

"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. O Sol e a Lua foram arrancados da Terra."



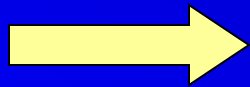


- 1.1 - Pré-Socrático:



- Empédocles

“Apresentou a doutrina dos quatro elementos mais duas forças: terra, ar, água, fogo + atração (amor) e repulsão (ódio)”

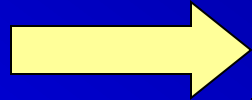


- Anaximandro e Anaximenes (476 a.c.)

“ A Terra e todo corpo material se formaram da condensação de uma massa de ar giratória”



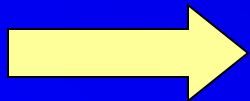
- **1.2 - Chineses:**



– Chi Meng (25 a 250 d.c.)

“O Céu era vazio e sem substância... Não tendo fronteiras. O Sol, a Lua e as estrelas flutuavam no espaço”

- **1.3 – Renascimento**



– La Place (1749-1827)

“O Sistema Solar nasceu de uma nuvem de gás primitiva em rotação (Hipótese Nebular)”





## Questões fundamentais?

- Se as estrelas se formaram de uma nuvem progenitora,
  - ⇒ – *Onde estão essas nuvens ou o que restou delas ?*
  - ⇒ – *Todas as estrelas estão formadas ou ainda existem estrelas se formando ?*

## 2 - ONDE NASCEM AS ESTRELAS?

### Primeiras observações das nuvens.

John Hartman (1904)

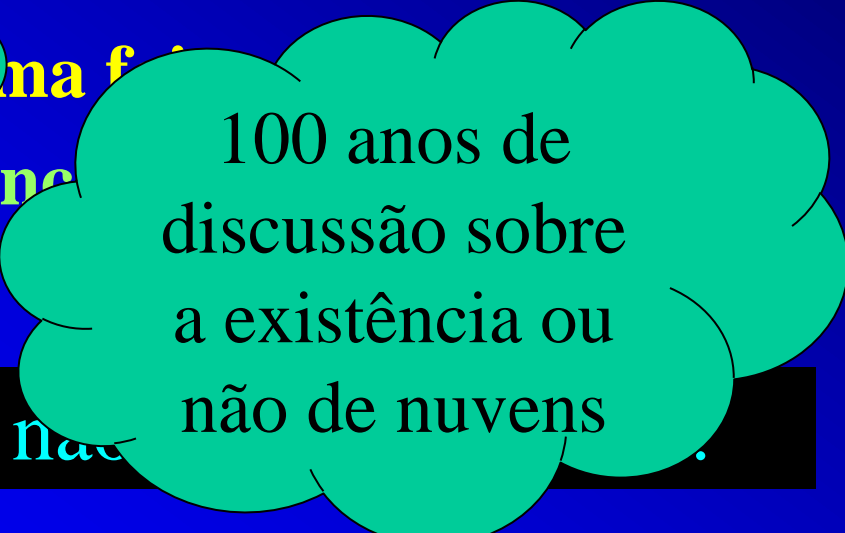
- Emissões de *Ca* na direção de estrelas.
- Onde são geradas essas emissões ?

Década de 60 - O problema na física

Observadas as substâncias

H, H<sup>+</sup>, Na, Ca,

OK, o gás existe mas não



100 anos de  
discussão sobre  
a existência ou  
não de nuvens





## MOLÉCULAS DETECTADAS NO ESPAÇO

(nuvens interestelares, envelopes de estrelas)

Diatomic	Triatomic	4 atoms	5 atoms	6 atoms	7 atoms	8 atoms	9 atoms	10 atoms	11 atoms	13 atoms
H <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	c-C <sub>3</sub> H	C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub> H	C <sub>6</sub> H	CH <sub>3</sub> C <sub>3</sub> N	CH <sub>3</sub> C <sub>4</sub> H	CH <sub>3</sub> C <sub>5</sub> N	HC <sub>9</sub> N	HC <sub>11</sub> N
AlF	C <sub>2</sub> H	I-C <sub>3</sub> H	C <sub>4</sub> H	I-H <sub>2</sub> C <sub>4</sub>	CH <sub>2</sub> CHCN	HCOOCH <sub>3</sub>	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CN	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CO		
AlCl	C <sub>2</sub> O	C <sub>3</sub> N	C <sub>4</sub> Si	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	CH <sub>3</sub> C <sub>2</sub> H	CH <sub>3</sub> COOH	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> O	NH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> COOH		
C <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> O	I-C <sub>3</sub> H <sub>2</sub>	CH <sub>3</sub> CN	HC <sub>5</sub> N	C <sub>7</sub> H	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH			
CH	CH <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S	c-C <sub>3</sub> H <sub>2</sub>	CH <sub>3</sub> NC	HCOCH <sub>3</sub>	CH <sub>2</sub> OHCHO	HC <sub>7</sub> N			
CH <sup>+</sup>	HCN	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	CH <sub>2</sub> CN	CH <sub>3</sub> OH	NH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>		C <sub>8</sub> H			
CN	HCO	CH <sub>2</sub> D <sup>+</sup>	CH <sub>4</sub>	CH <sub>3</sub> SH	c-C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O					
CO	HCO <sup>+</sup>	HCCN	HC <sub>3</sub> N	HC <sub>3</sub> NH <sup>+</sup>	CH <sub>2</sub> CHO					
CO <sup>+</sup>	HCS <sup>+</sup>	HCNH <sup>+</sup>	HC <sub>2</sub> NC	HC <sub>2</sub> CHO						
CP	HOC <sup>+</sup>	HNCO	HCOOH	NH <sub>2</sub> CHO						
CSi	H <sub>2</sub> O	HNCS	H <sub>2</sub> CHN	C <sub>5</sub> N						
HCl	H <sub>2</sub> S	HOCO <sup>+</sup>	H <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O							
KCl	HNC	H <sub>2</sub> CO	H <sub>2</sub> NCN							
NH	HNO	H <sub>2</sub> CN	HNC <sub>3</sub>							
NO	MgCN	H <sub>2</sub> CS	SiH <sub>4</sub>							
NS	MgNC	H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>	H <sub>2</sub> COH <sup>+</sup>							
NaCl	N <sub>2</sub> H <sup>+</sup>	NH <sub>3</sub>								
OH	N <sub>2</sub> O	SiC <sub>3</sub>								
PN	NaCN									
SO	OCS									
SO <sup>+</sup>	SO <sub>2</sub>									
SiN	c-SiC <sub>2</sub>									
SiO	CO <sub>2</sub>									
SiS	NH <sub>2</sub>									
CS	H <sub>3</sub> <sup>+</sup>									
HF	SiCN									
SH										



# 3 - Onde estão as nuvens de gás ?

- Substâncias mais observadas - H, CO

- Amplamente distribuídas na Galáxia

- Excitadas → Temperaturas baixas ( $> 90$  K)
- Excitadas → Densidades baixas ( $> 10^4$  cm $^{-3}$ )

**Formam estrelas  
de grande  
massa**

- Distribuição de nuvens na Galáxia

- Nuvens Moleculares → Gigantes ( $M > 10^6 M_{\odot}$ )
- Nuvens Moleculares → Escuras ( $M < 10^4 M_{\odot}$ )

- Primeiras Observações: William Herschel (1780)

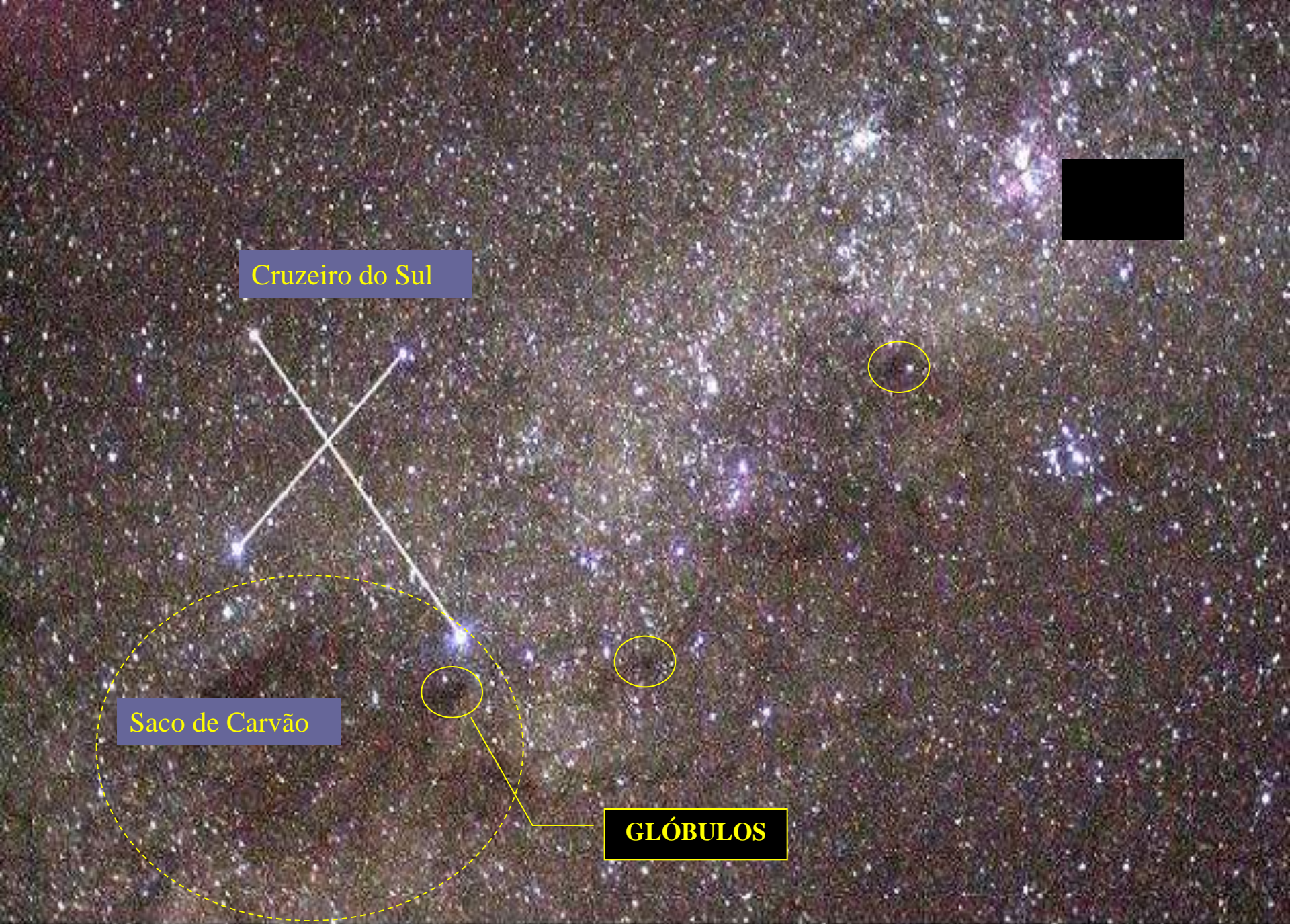
“... Observo buracos na Galáxia...”



Nessa época do ano podemos ver essa região no céu.  
Que região é essa ?







Cruzeiro do Sul



Saco de Carvão



GLÓBULOS













## Star-Birth Clouds · M16

HST · WFPC2

RC95-44b · ST ScI OPO · November 2, 1995

Hester and P. Scowen (AZ State Univ.), NASA

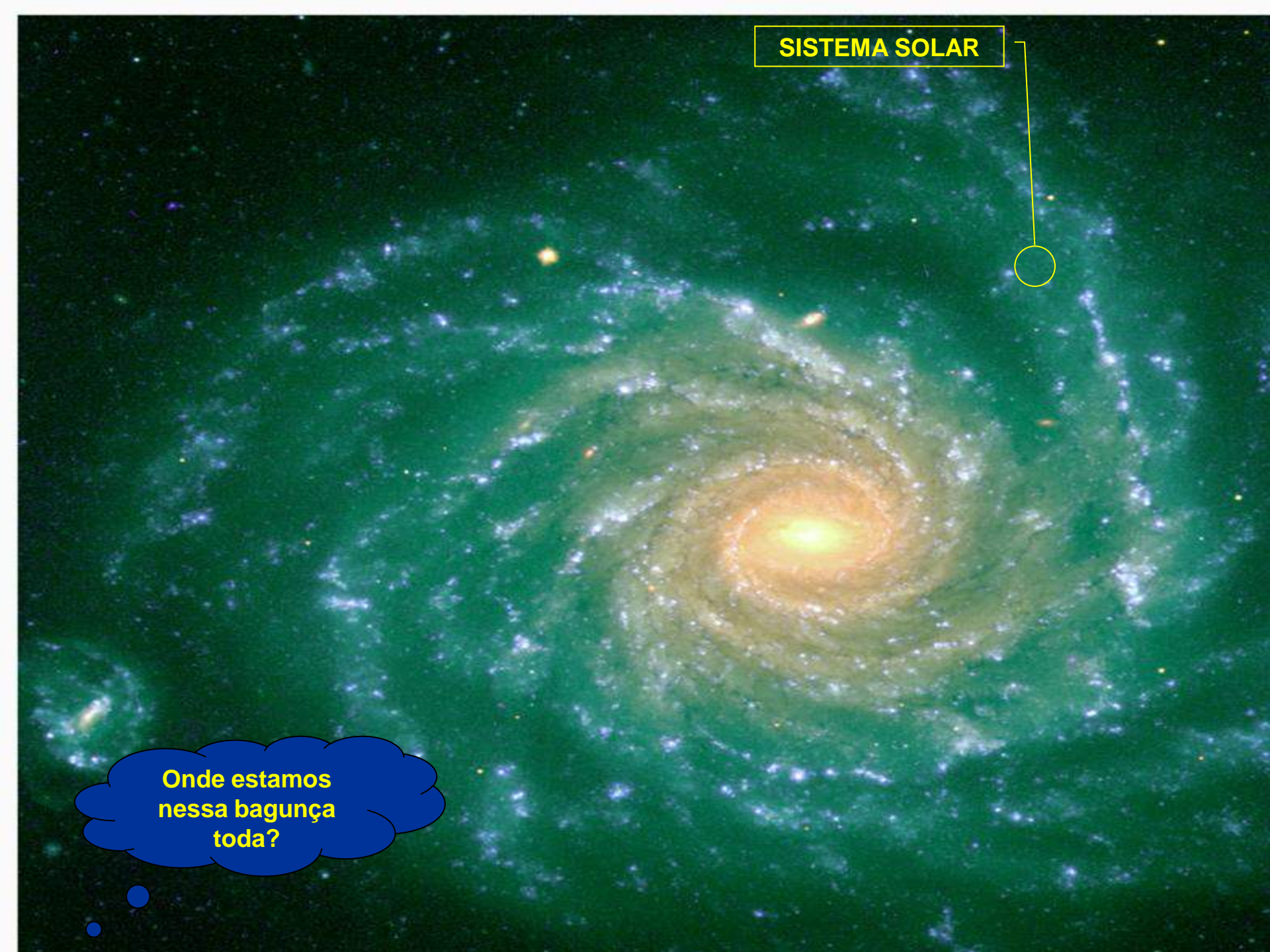
ONDE ESTÃO ESSAS NUVENS DE GÁS EM  
NOSSA GALÁXIA ?





**SISTEMA SOLAR**

**Onde estamos  
nessa bagunça  
toda?**



## 4 - Como nascem as estrelas ?

- Em 1986 → Estrelas nascem em condensações densas (glóbulos) nas nuvens de gás e poeira



A relação entre glóbulo e formação de estrela foi proposta em 1944

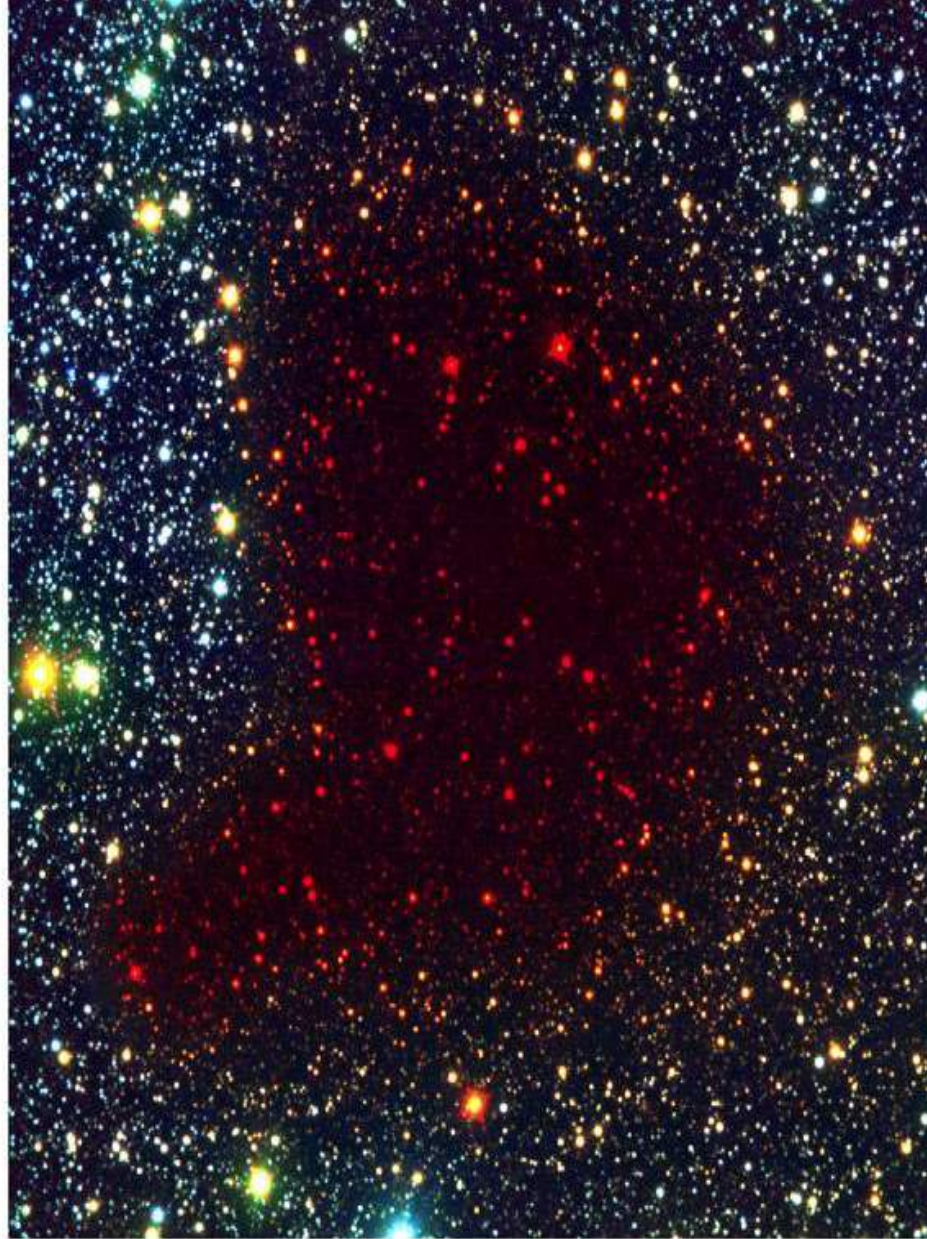
- **Glóbulos ?**

São regiões muito densas que absorvem a radiação das estrelas formadas em seu centro e portanto aparecem escuras quando observados no visível.





V, I



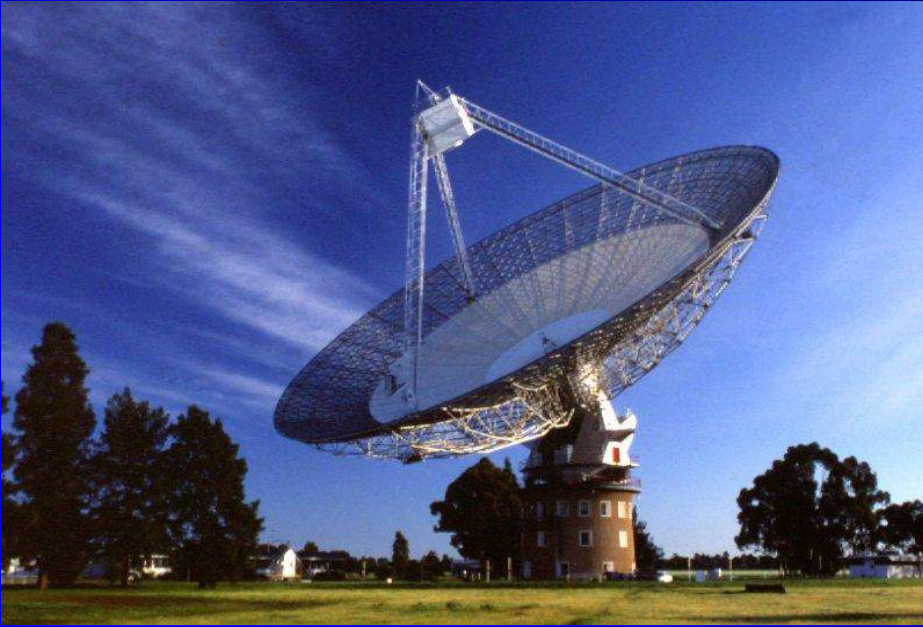
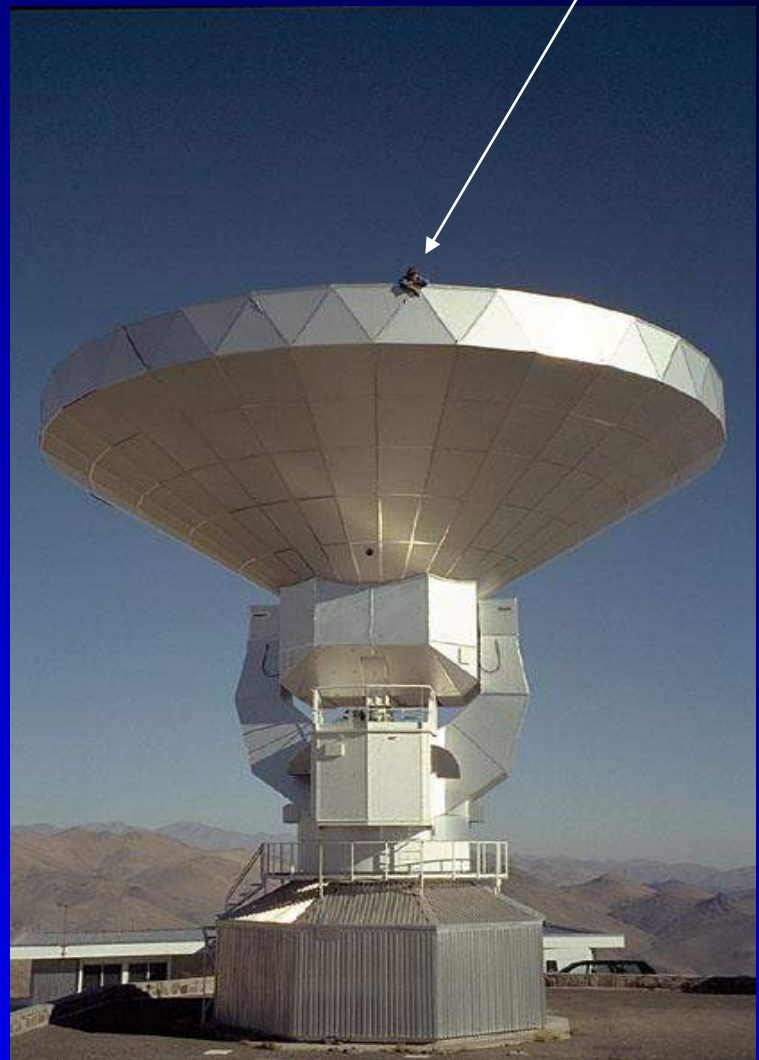
B, I,

Pre-Collapse Black Cloud B68 (comparison)



Uma pessoa

*SEST, Chile (14m)*



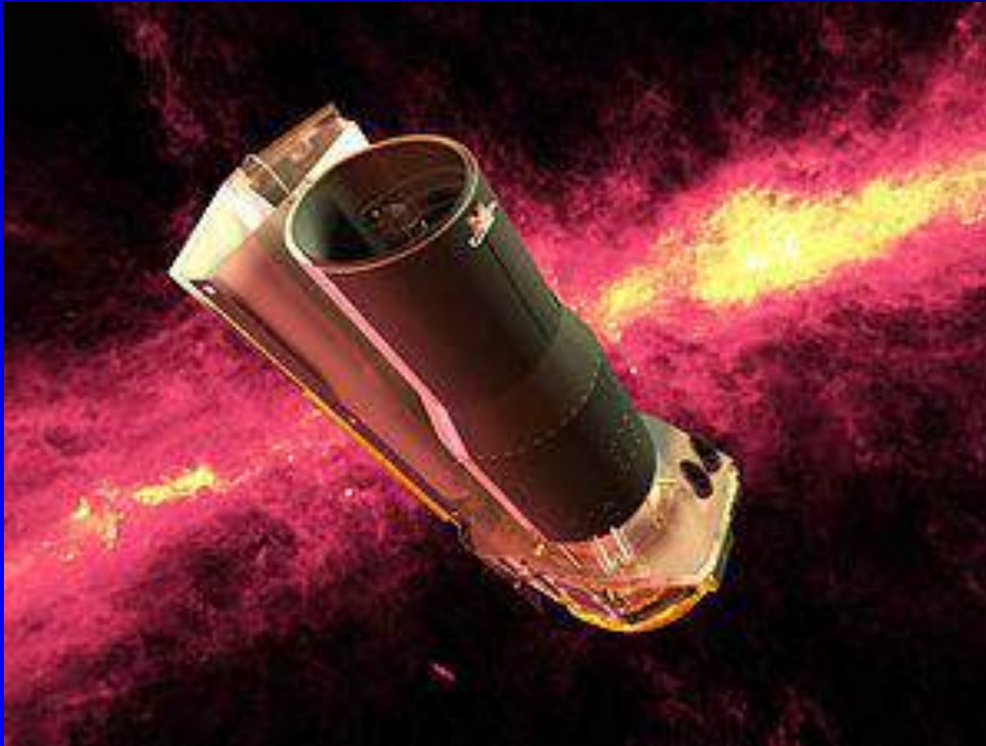
*Parkes, Austrália (64 m)*



# Interferômetro ALMA



# Telescópios no Espacial Spitzer



SPITZER

[www.spitzer.caltech.edu](http://www.spitzer.caltech.edu)



IRAS

<https://en.wikipedia.org/wiki/IRAS>

## 4.1 – O colapso dos glóbulos

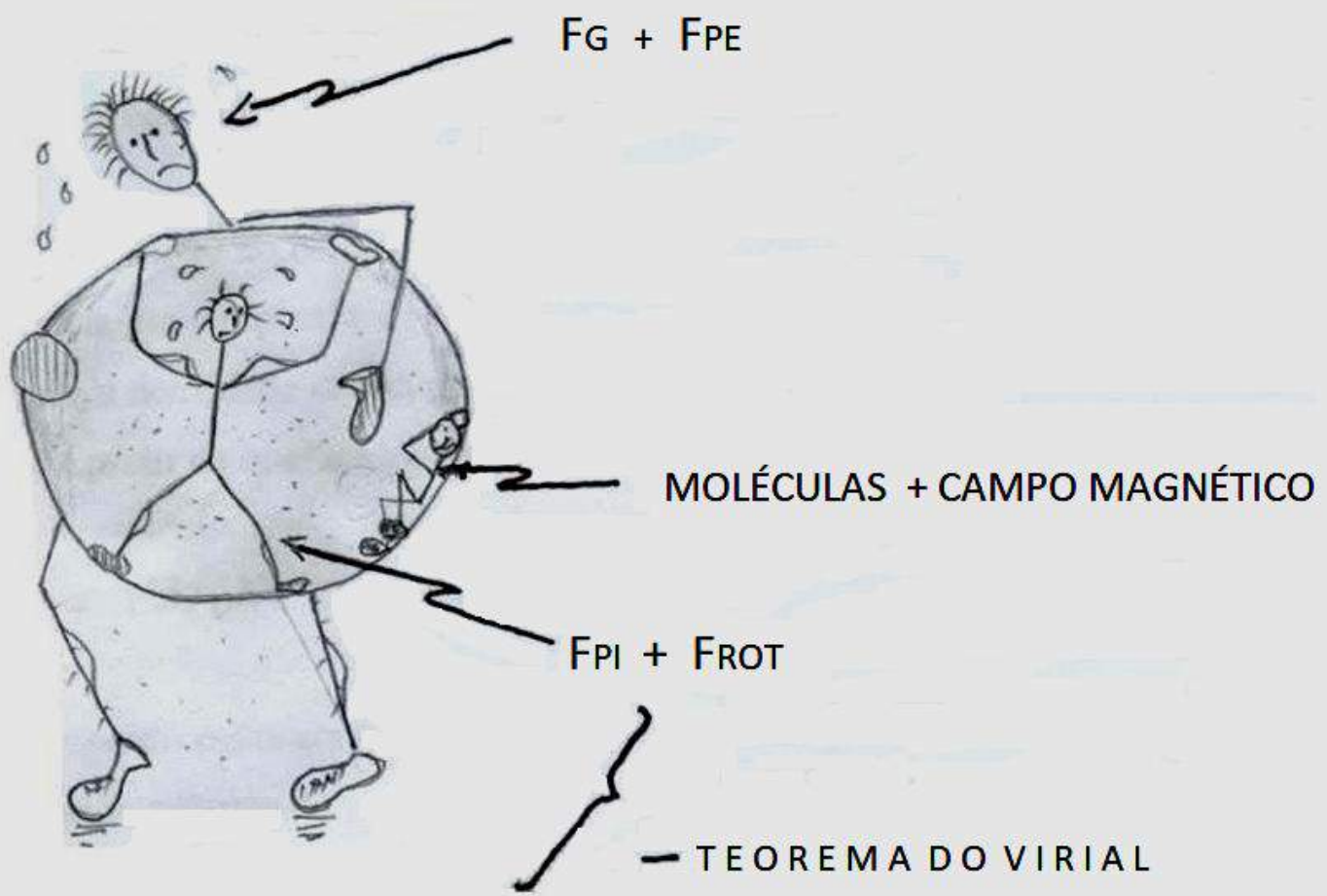
Hipóteses para simplificar:

- 1 - Glóbulo Esférico (observado)
- 2 - Temperatura constante (observado).
- 3 - Pressão externa (imerso em uma nuvem)
- 4 - Tem rotação uniforme (observado)
- 5 - Campos magnéticos associados (observado)

**Como explorar o problema tendo-se  
em vista a complexidade?**

Concepções Física e Matemática do Problema







Resultado similares são obtidos com a Matemática  
(Equações da hidrodinâmica)

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = \mathbf{f} - \nabla P; \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

$$\nabla^2 \Phi = -4\pi G \rho; \quad \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \frac{1}{4\pi} \nabla^2 \mathbf{B}$$

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

Varia'veis :  $Q = \sum_{n=0}^{\infty} \lambda^n Q_n$

$$\rho = \rho_0 + \lambda \rho_1; P = P_0 + \lambda P_1; \Phi = \Phi_0 + \lambda \Phi_1$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 + \lambda \mathbf{v}_1; \mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \lambda \mathbf{B}_1$$

Meu Deus !



Tem como  
resolver?



## 5.1 Descrição do Modelo de Bonnor-Ebert

Consideremos uma massa esférica de gás perfeito em equilíbrio isotérmico sob os efeitos da sua própria gravidade. Em cada ponto, o gás obedece à equação local de estado

$$p = \rho \frac{k_B T}{m} = \rho a^2, \quad (5.1)$$

onde  $k_B$  é a constante de Boltzmann,  $T$  a temperatura da nuvem e  $m$  a massa média das partículas do gás, sendo  $a = \sqrt{k_B T/m}$  a velocidade isotérmica do som. O gás também satisfaz a equação de equilíbrio hidrostático:

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left( \frac{r^2}{\rho} \frac{dp}{dr} \right) = -4\pi G \rho. \quad (5.2)$$

Combinando as equações 5.1 e 5.2 obtemos a distribuição de densidade de uma esfera de gás isotérmica:

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left( \frac{r^2}{\rho} \frac{d\rho}{dr} \right) = -\frac{4\pi G \rho}{a^2}. \quad (5.3)$$

Se agora transformamos 5.3 com as seguintes substituições :

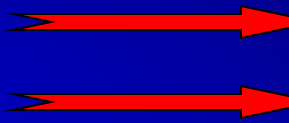
$$\rho = \rho_c e^{-\psi}, \quad r = \beta^{1/2} \rho_c^{-1/2} \xi, \quad (5.4)$$

onde  $\rho_c$  é a densidade central e  $\beta = a^2/4\pi G$ , obtemos a equação modificada de Lane-Emden:

$$\frac{1}{\xi^2} \frac{d}{d\xi} \left( \xi^2 \frac{d\psi}{d\xi} \right) = e^{-\psi}. \quad (5.5)$$

## 4.2.1 – Massa crítica e tempo de colapso

Simplificação para tratar o problema:

Considerar apenas:  Atração gravitacional  
Pressão interna

Usando as leis:

$$V = V_0 + gt$$

$$V^2 = V_0^2 + 2gd$$

$$d = V_0 t + \frac{1}{2} gt^2$$

$$mV^2 = kT$$

N  
E  
W  
T  
O  
N

mostra-se que:

$$t_{\text{ff}} = \left( \frac{3\pi}{32G\bar{\rho}} \right)^{1/2} = 1.37 \times 10^6 \left( \frac{10^3 \text{ cm}^{-3}}{\bar{n}_{\text{H}}} \right)^{1/2} \text{ year,}$$

$$M_{\text{crit}} \propto T^{3/2} / \rho^{0.5} \text{ e que } t_{\text{colapso}} \propto \rho^{-0.5}$$



## 4.2.2 – Qual o papel do campo magnético ?

Glóbulo:

$$x \sim (5 \times 10^{-8}) \left( \frac{n}{10^5 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1/2}$$

→ Ionização interna pequena (Raio Cósmico)



Suficiente para o campo magnético afetar a evolução do colapso.



$$M > M_{\text{cr}} \equiv \frac{5^{3/2}}{48\pi^2} \frac{B^3}{G^{3/2} \rho^2}$$
$$= (4 \times 10^6 M_{\odot}) \left( \frac{n}{1 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-2} \left( \frac{B}{3 \mu\text{G}} \right)^3$$

### 4.2.3 – Qual o papel das substâncias químicas?

- Convertem o calor interno em radiação
- Resfria o núcleo e desequilibra o sistema.

Moléculas mais importantes:  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$

### 5 – Consequência do nascimento de uma estrela.

Uma estrela é uma intensa fonte de radiação, produzindo mais luminosidade quanto maior sua massa.



## 5.1 – Estrela de grande massa ( $M > 10 M_{\text{sol}}$ )

Gigantes Azuis (O,B)  
Produz muita radiação

-

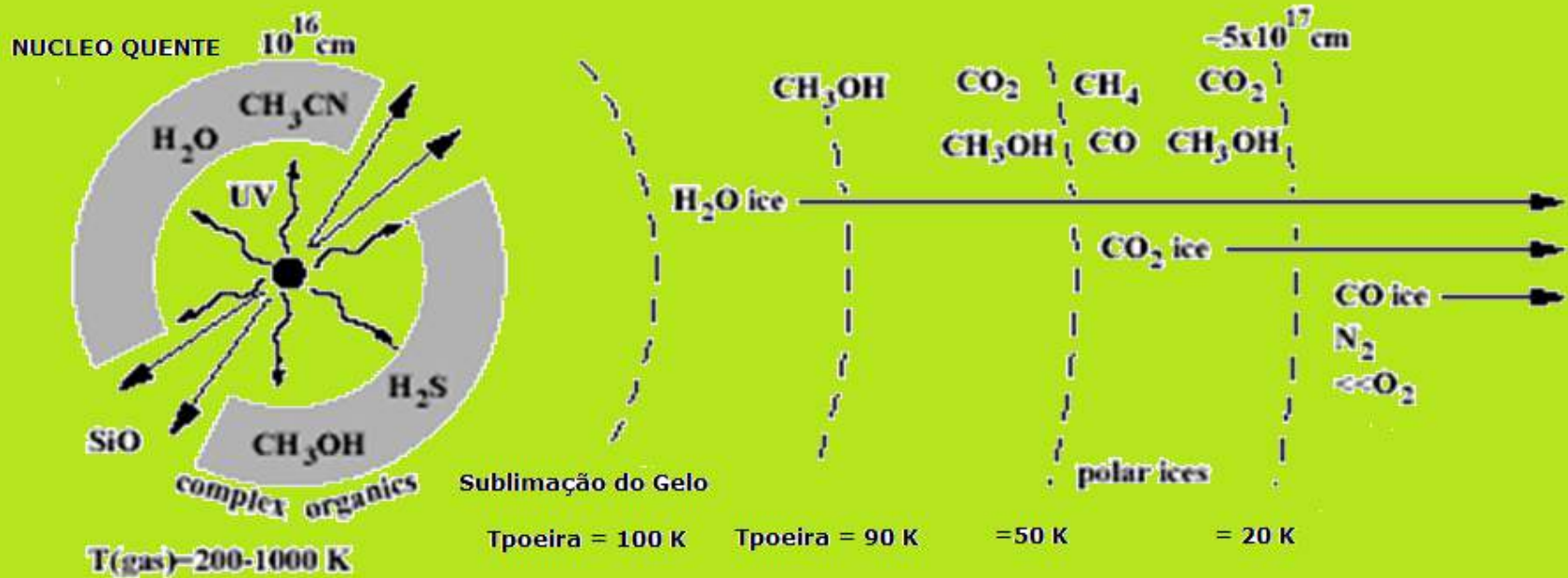
$T_{\text{SUP}} > 30.000,00 \text{ K}$   
Cria uma bolha ionizada.  
Cria novas estrelas.

## 5.2 – Estrela de pequena massa ( $M < 3 M_{\text{sol}}$ )

Criam um disco

Formam sistemas planetários

# ESTRELAS DE GRANDES MASSAS ( $> 10 M_{\odot}$ )



Representação esquemática do ambiente químico e físico de objetos estelar jovens de grande massa. (Vandishoeck and Hogerheijde, 1999)



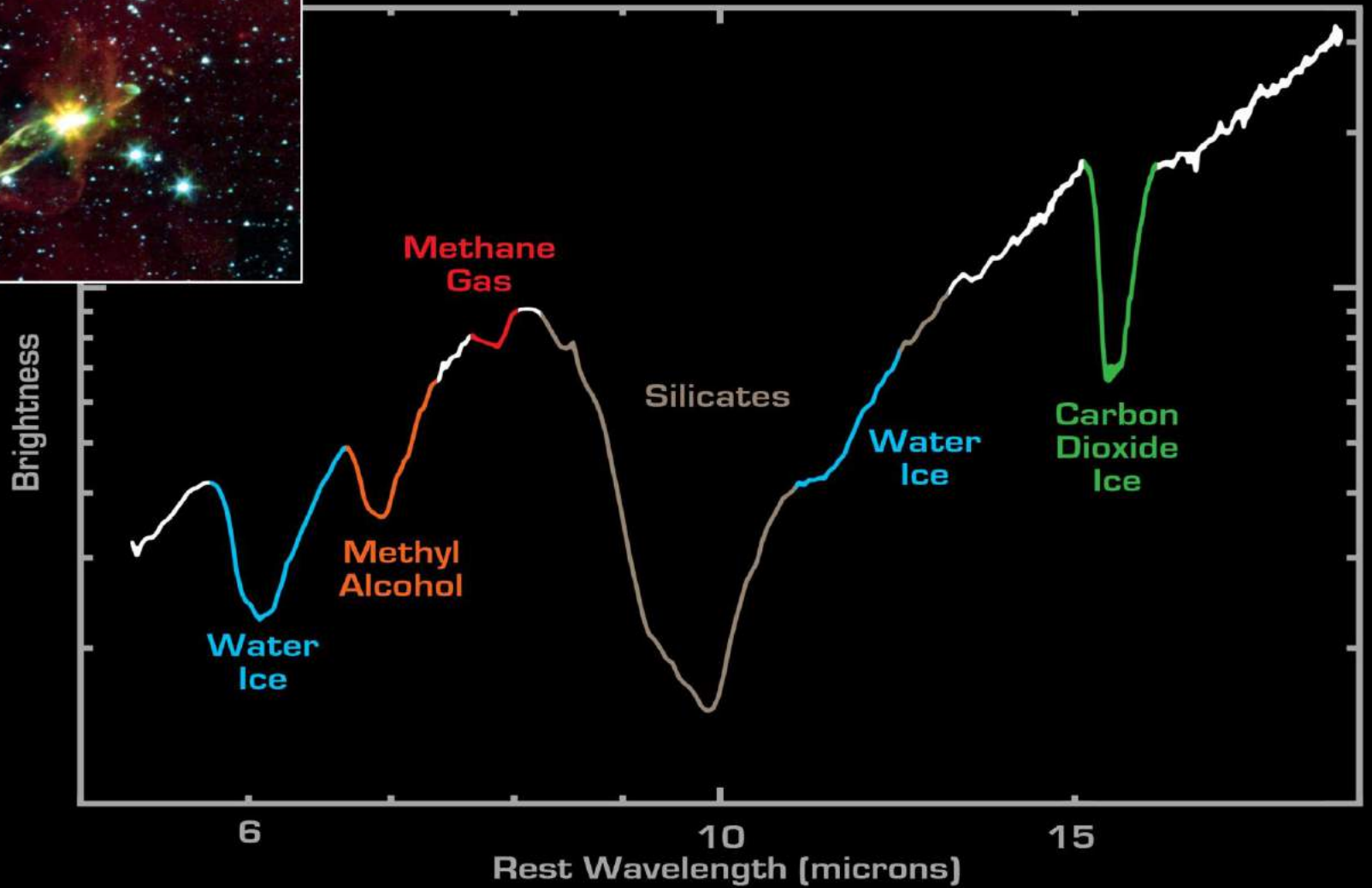
Ringed-Polar Ringed Nebula

NGC 1501 · ST ScI OPO · November 20, 1995

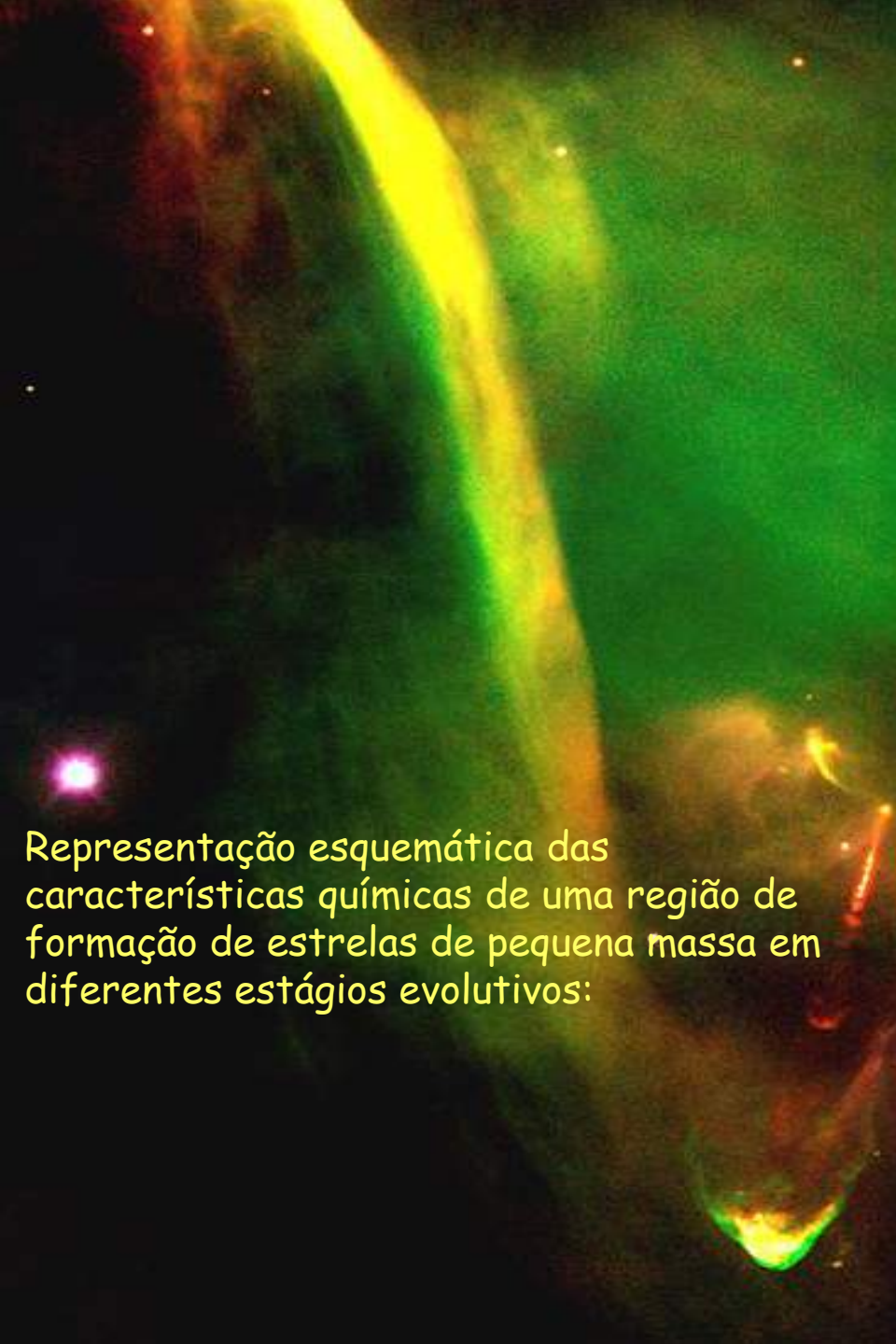


# HH 46/47

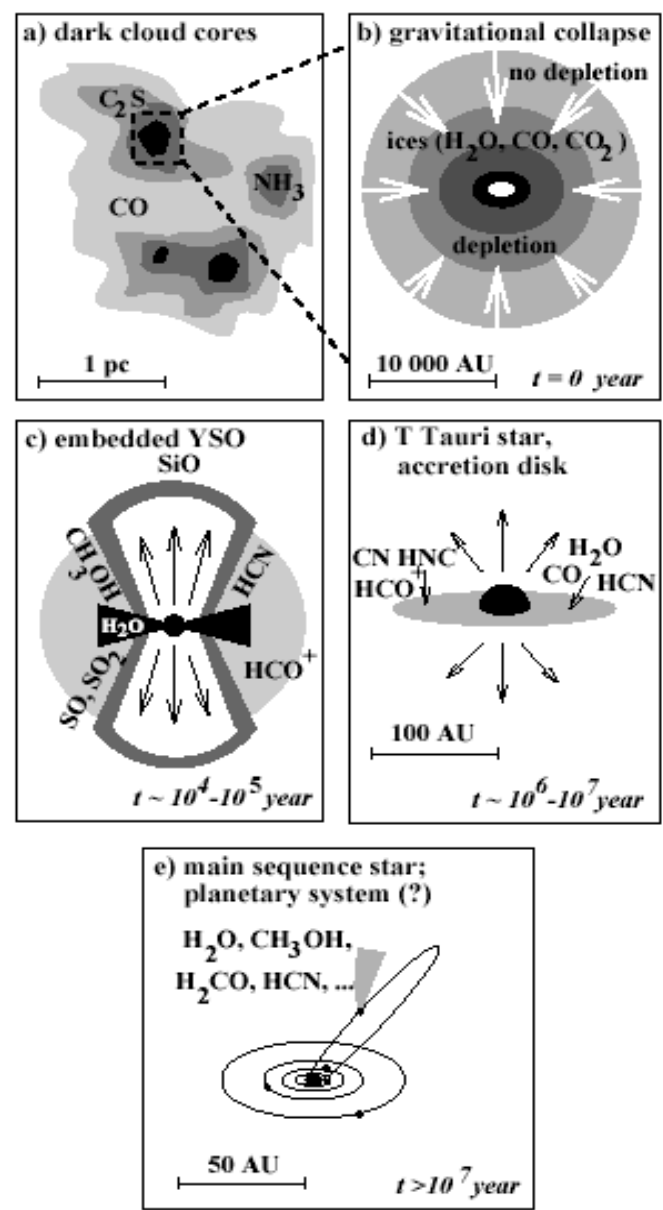
NASA's Spitzer Space Telescope  
and ALMA (Atacama Large



**Nascimento de uma estrela como  
nunca visto anteriormente**



Representação esquemática das características químicas de uma região de formação de estrelas de pequena massa em diferentes estágios evolutivos:



IC

HH 211

H<sub>2</sub>

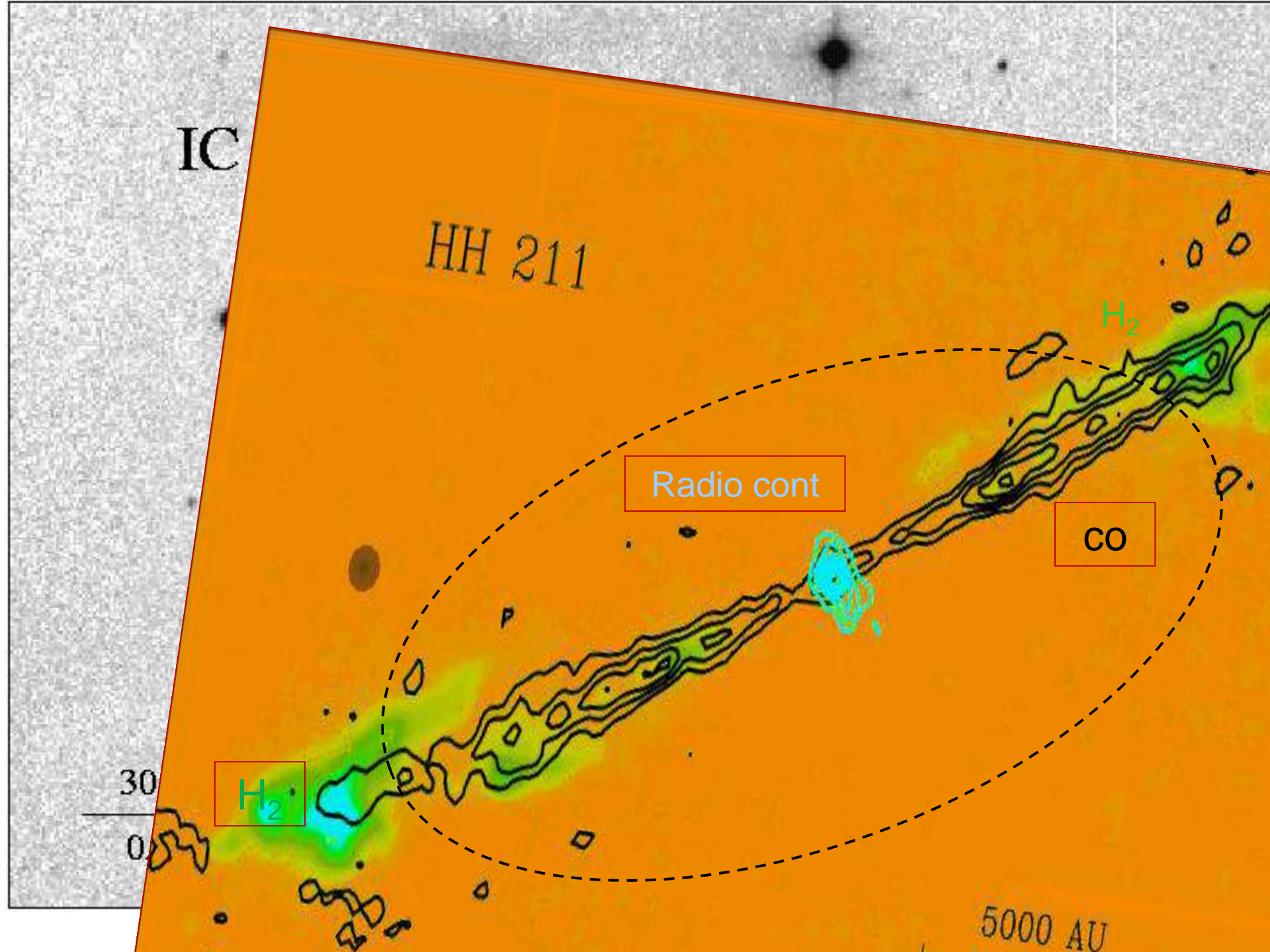
Radio cont

CO

H<sub>2</sub>

30  
0

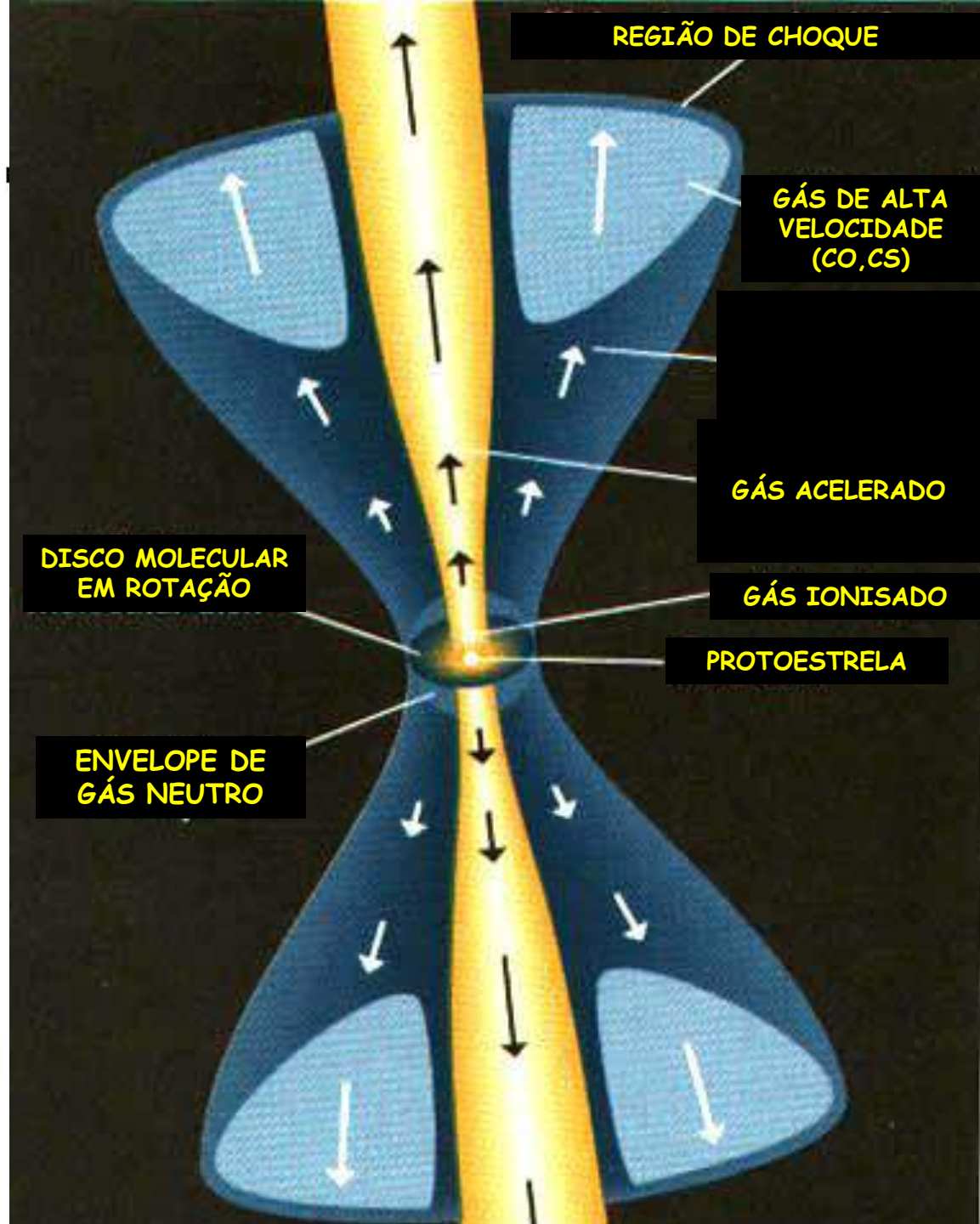
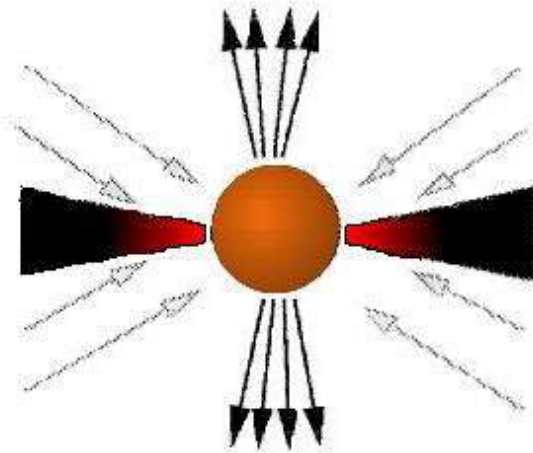
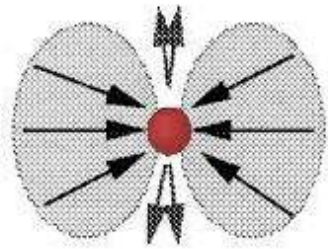
5000 AU





O QUE APRENDEMOS DEPOIS DE TUDO ISSO?





REGIÃO DE CHOQUE

GÁS DE ALTA VELOCIDADE (CO, CS)

GÁS ACELERADO

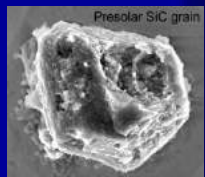
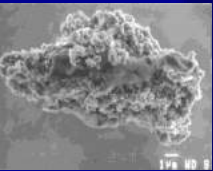
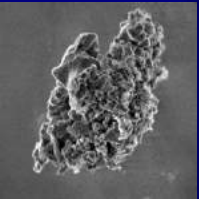
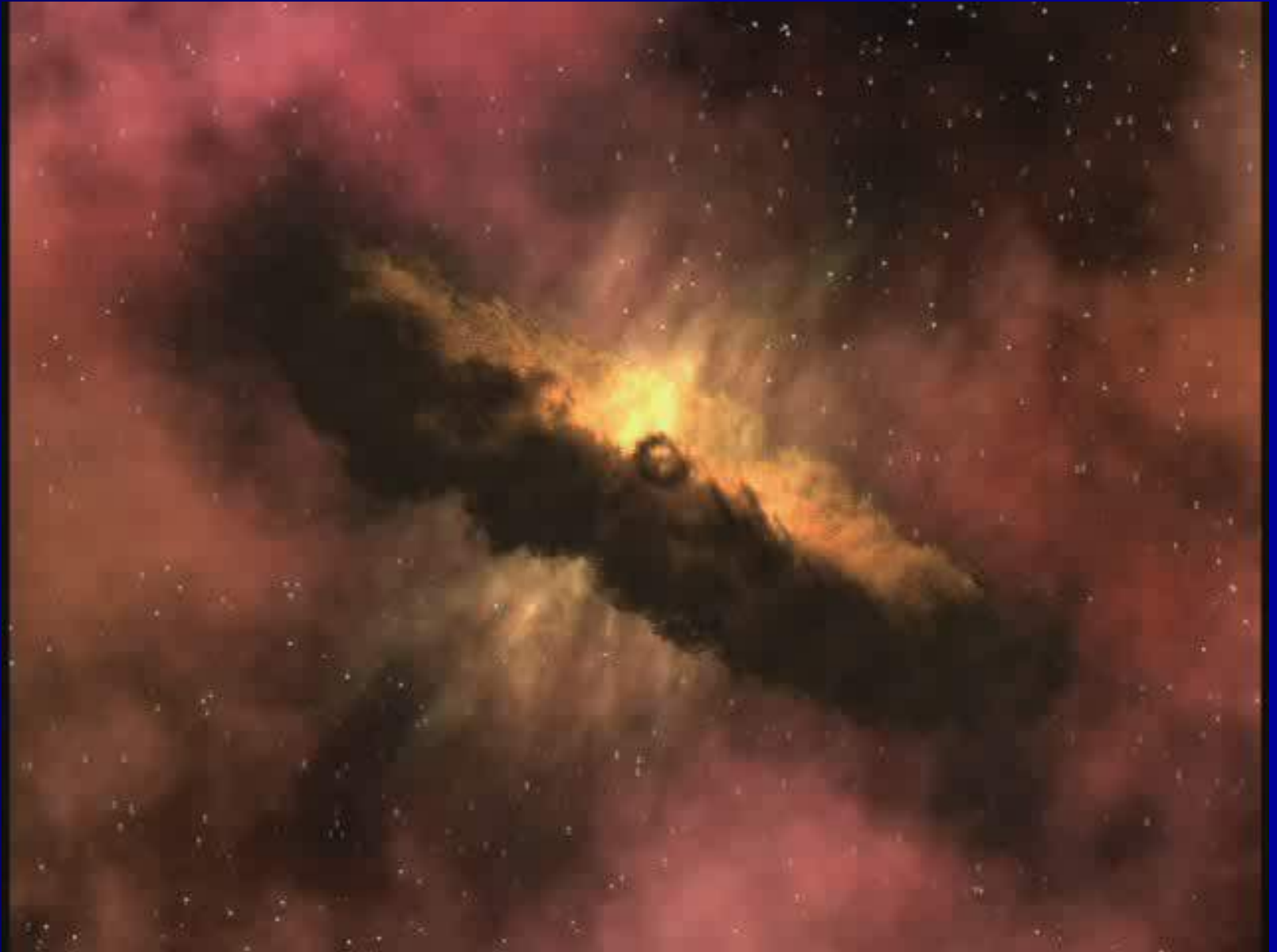
GÁS IONISADO

PROTOESTRELA

DISCO MOLECULAR EM ROTAÇÃO

ENVELOPE DE GÁS NEUTRO

# Poeira e gelos dentro das nuvens





# Nascimento das Estrelas

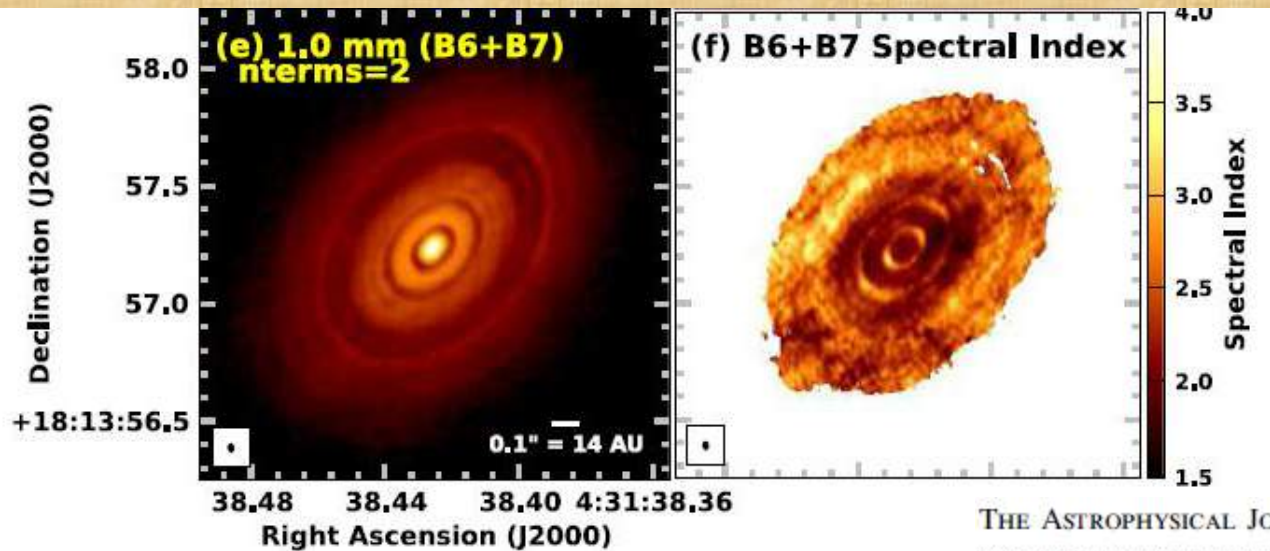
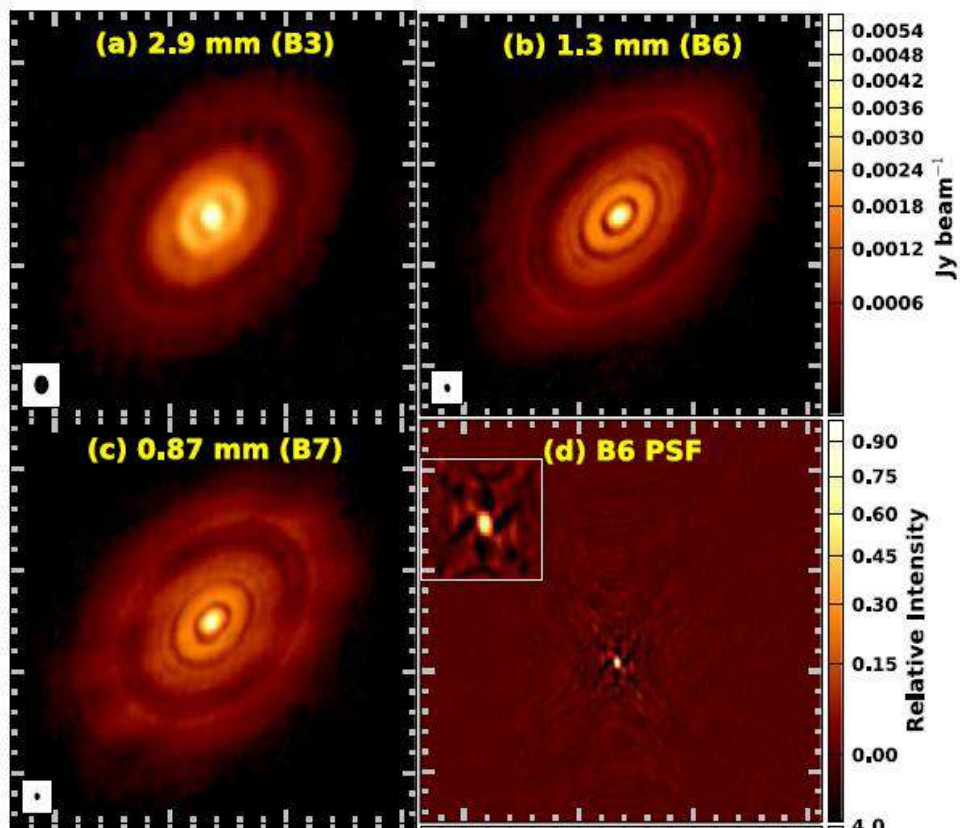


# ESTRELA HL Tau

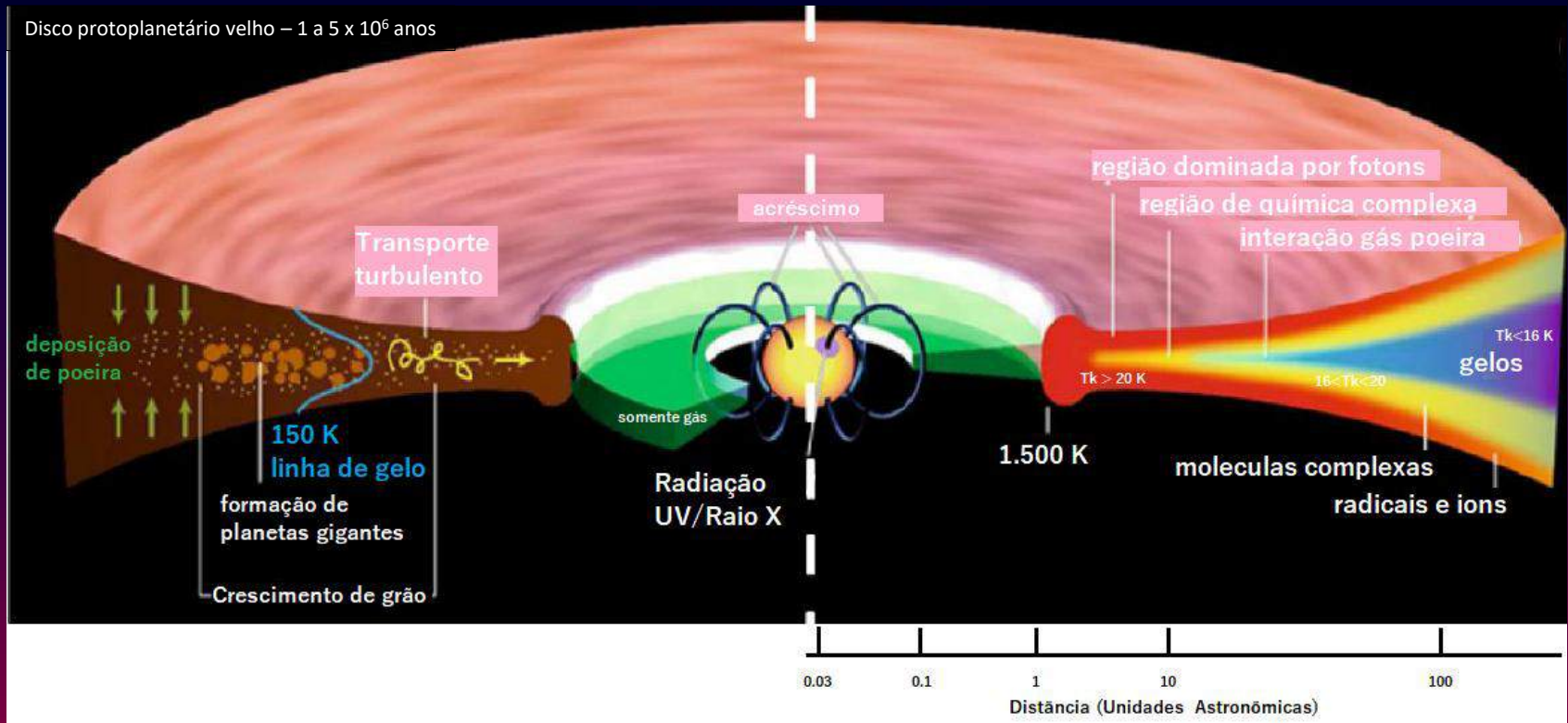
(a, b, c) Imagens ALMA no contínuo de HL Tau.

Distância da Terra: 456,6 anos-luz  
Magnitude: 15,1  
Constelação: Taurus  
Tipo espectral: Class K  
Magnitude Aparente (V):15,2

(e, f) – Imagem e mapa do índice espectral resultante da combinação de 1,3 e 0,8 mm. Feixe sintetizado à esquerda e abaixo das figuras.



## Discos protoplanetários



Acredita-se que a linha de gelo tem um papel importante na formação de planetas, já que os mantos de gelo aumentam a massa dos grãos e promovem a coagulação em partículas maiores, efeito que é especialmente importante fora “da linha de gelo”. Também controlam a composição dos gelos dos planetesimais, dos quais se formam as atmosferas dos exoplanetas.





FIM

