



# MEIO INTERESTELAR

Walter J. Maciel

<http://www.astro.iag.usp.br/~maciel>

1. EXISTE UM MEIO INTERESTELAR?
2. ESTRUTURA DA GALÁXIA
3. A DENSIDADE DO MEIO INTERESTELAR
4. A FAUNA INTERESTELAR
5. LIMITE DE OORT
6. EQUILÍBRIO NO MEIO INTERESTELAR
7. PARA SABER MAIS

# 1. EXISTE UM MEIO INTERESTELAR?

- Meio intergaláctico
- Meio circumstelar
- Meio interplanetário
- Meio interestelar

Hydra





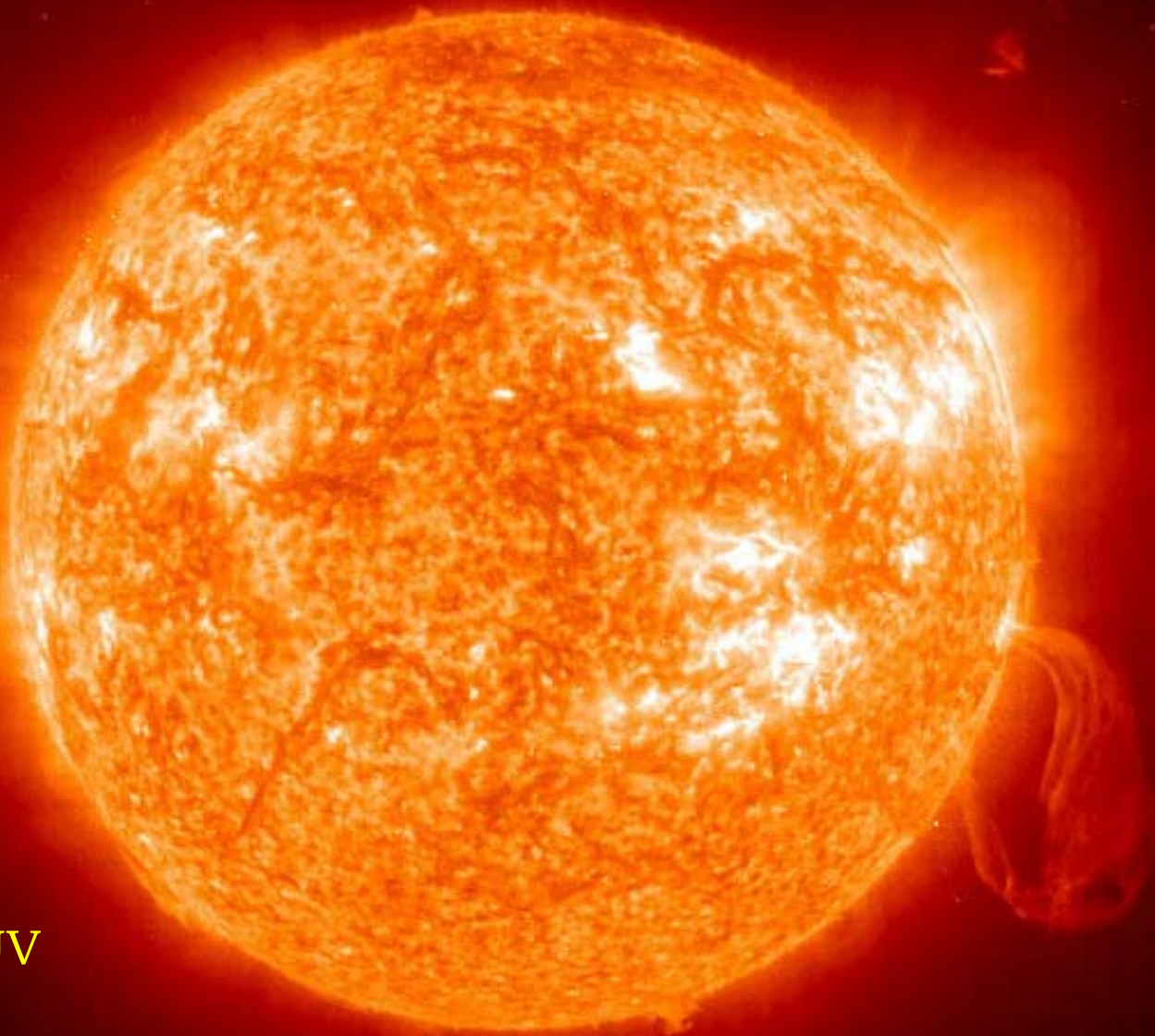
Pleiades



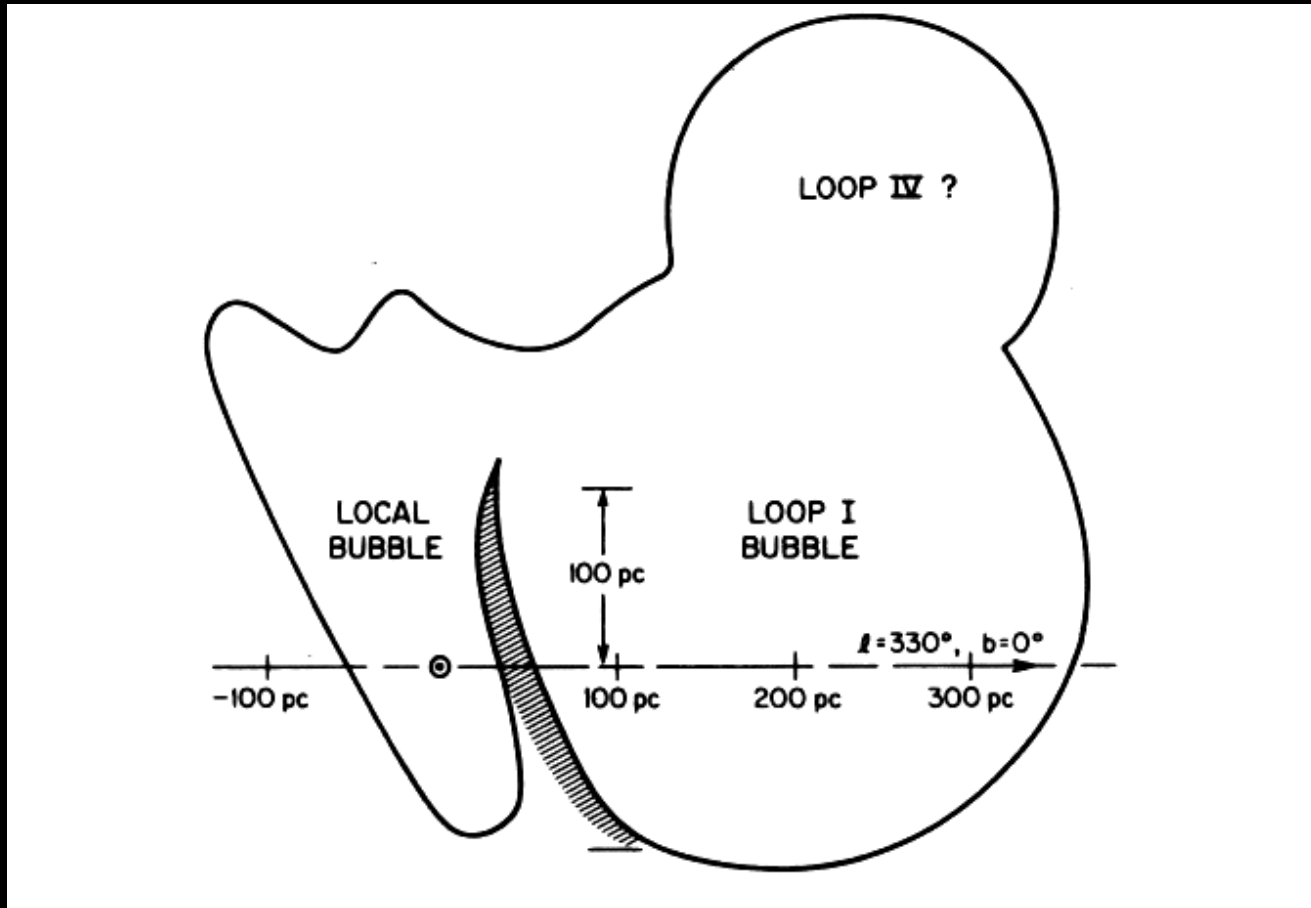
NGC 7293



Sol: UV



# MEIO INTERESTELAR LOCAL



Dieter Breitschwerdt



M51



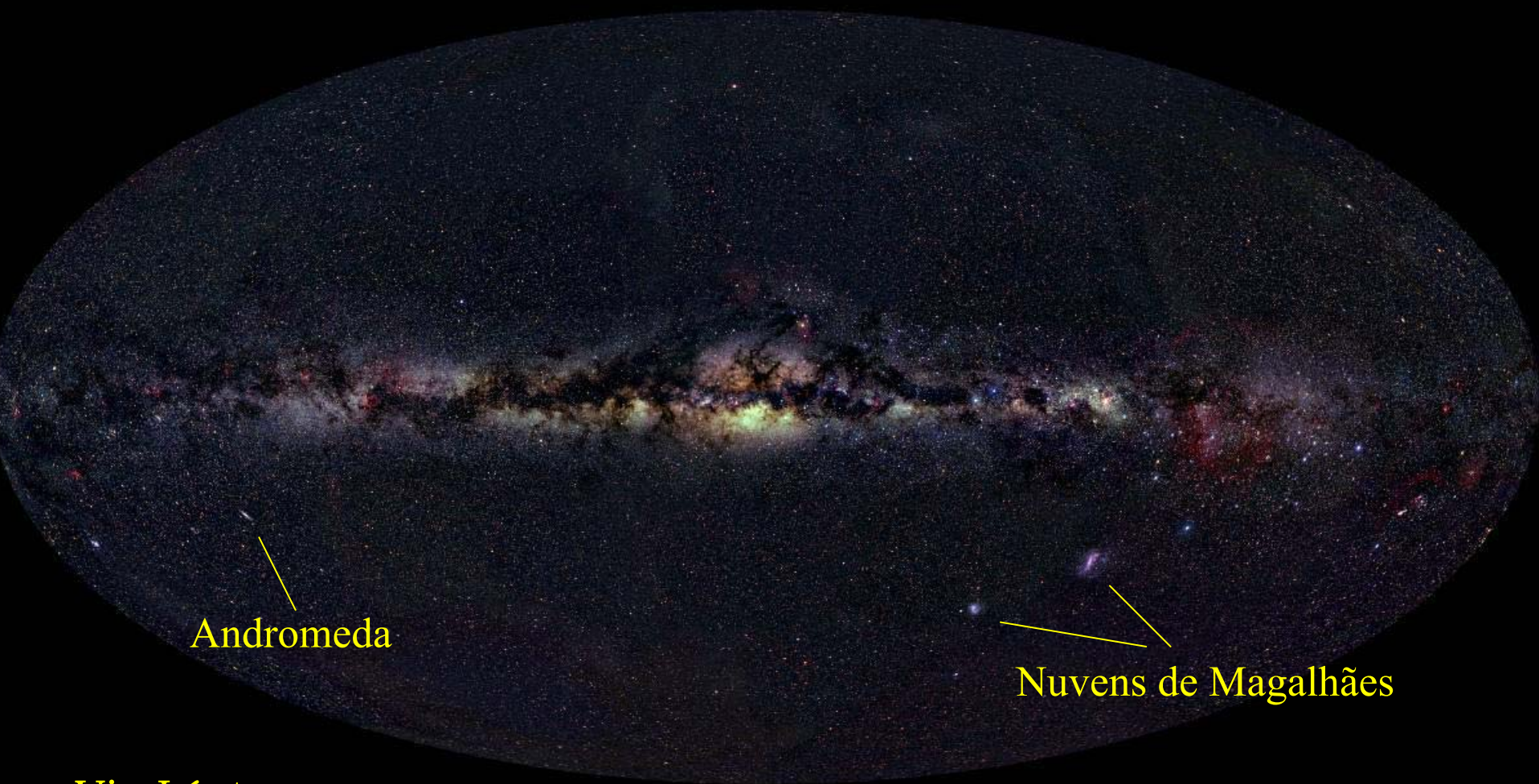
## 2. ESTRUTURA DA GALÁXIA

- A Via Láctea
- Modelos
- Aglomerados globulares
- Estrutura espiral
- Outras galáxias

Cerro Tololo



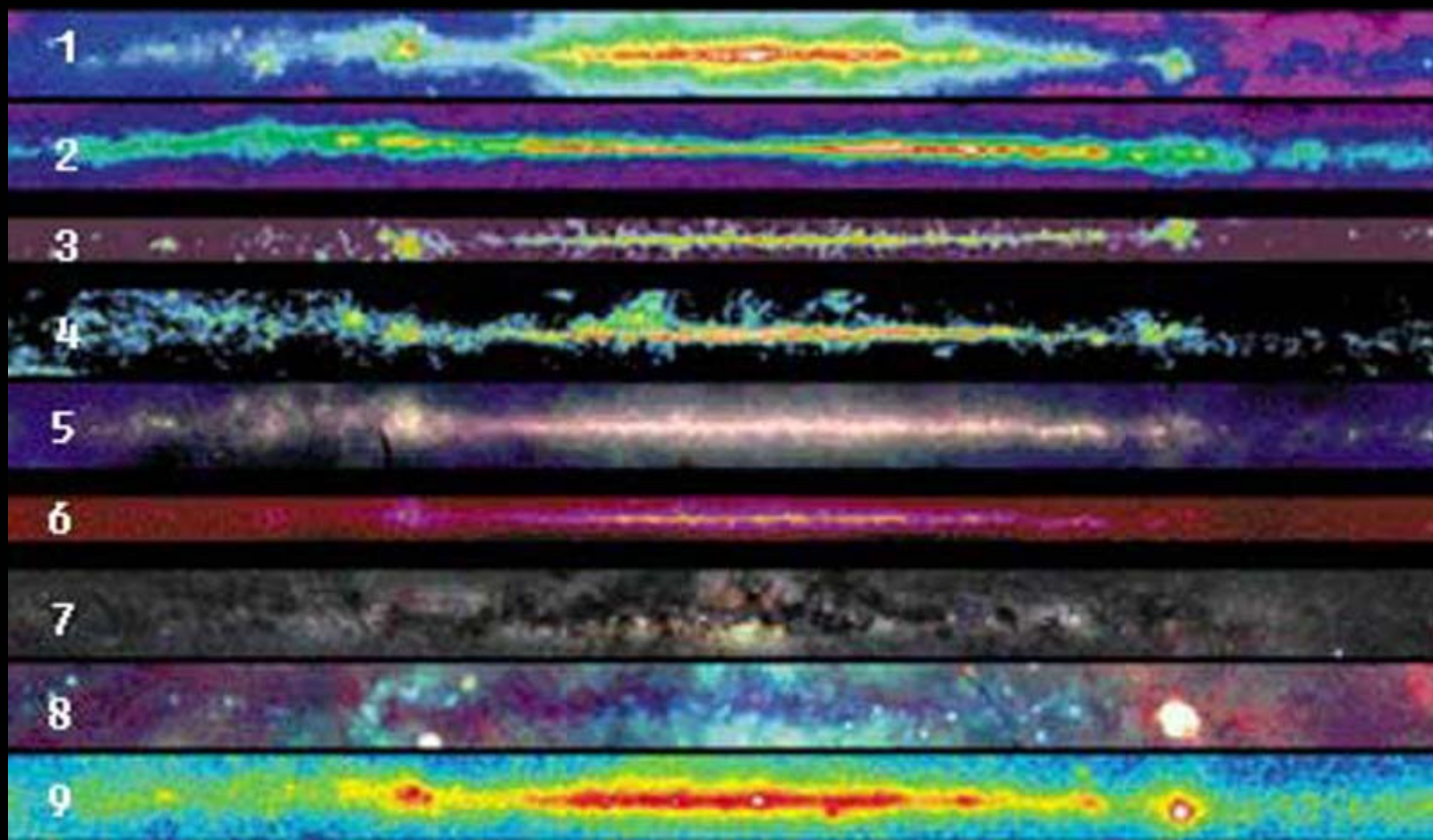




Andromeda

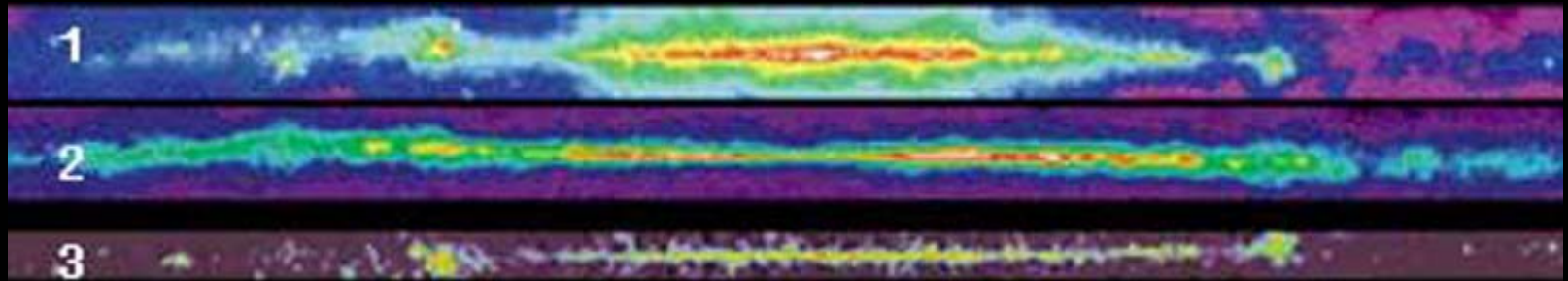
Nuvens de Magalhães

Via Láctea



Via Láctea

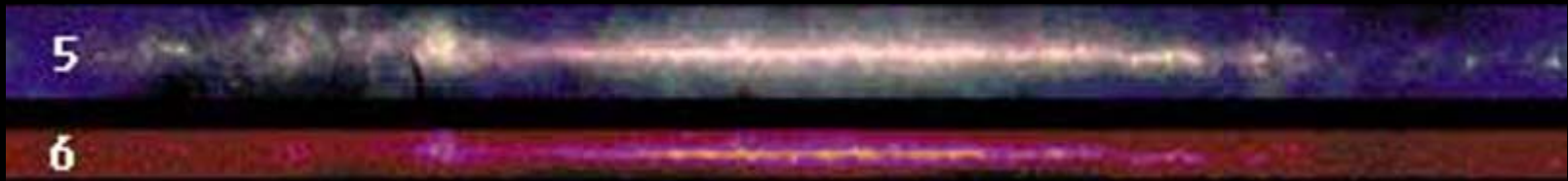




1. Contínuo em rádio, frequência 408 MHz, comprimento de onda 73 cm. Fonte: Elétrons de alta energia, especialmente em restos de supernovas. A emissão é mais intensa no plano galáctico (vermelho), pelos elétrons relativísticos que giram em torno das linhas do campo magnético interestelar (processo síncrotron). Estende-se também para latitudes galácticas mais altas (amarelo e verde), apresentando anéis (loops) e filamentos. Há também emissão difusa isotrópica e a presença de fontes discretas, geralmente extragalácticas.
2. Faixa rádio,  $\lambda = 21$  cm, frequência 1420 MHz. Fonte: Hidrogênio atômico neutro em nuvens interestelares e no gás difuso.
3. Contínuo em rádio, frequência 2.4 a 2.7 GHz. Fonte: Gás ionizado quente e elétrons de alta energia.



4. Região milimétrica, frequência 115 GHz. Fonte: Nuvens frias de CO revelando a presença de hidrogênio molecular.

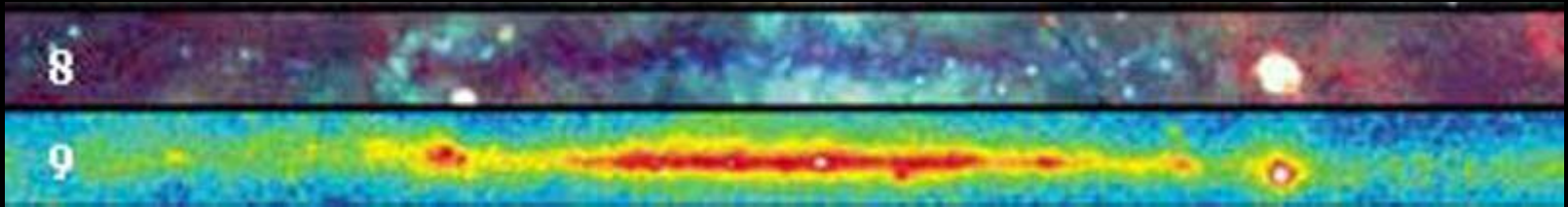


5. Infravermelho distante, comprimento de onda 12 a 100 microns. Fonte: Poeira interestelar, em particular grãos aquecidos pela radiação estelar em regiões de formação de estrelas.
6. Infravermelho próximo, comprimento de onda 6.8 a 10.8 microns. Fonte: Estrelas frias e avermelhadas, moléculas complexas em nuvens interestelares.



7

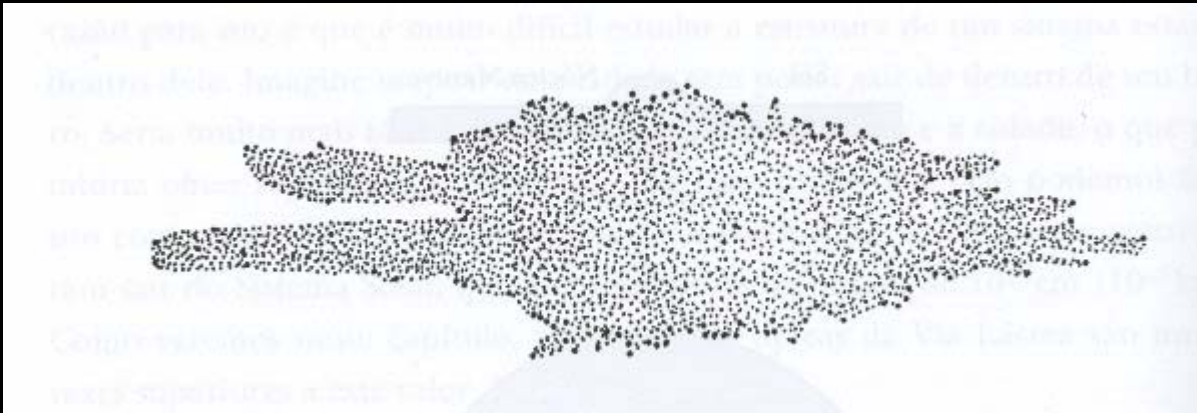
7. Luz visível, comprimento de onda 4000 a 6000 A. Fonte: estrelas próximas, gás ionizado interestelar e nuvens escuras de poeira e gás.



8. Raios X, energias de 0.25 a 1.5 keV. Fonte: Gás quente, produto de choques em explosões de supernovas.
9. Raios gama, energias acima de 300 MeV. Fonte: fenômenos de alta energia, como pulsares e colisões de raios cósmicos. A emissão associada ao plano galáctico é produzida pelo gás interestelar difuso, possivelmente devida ao decaimento de píons gerados em colisões entre raios cósmicos e o gás interestelar. Fontes discretas como pulsares e quasares são também observadas.

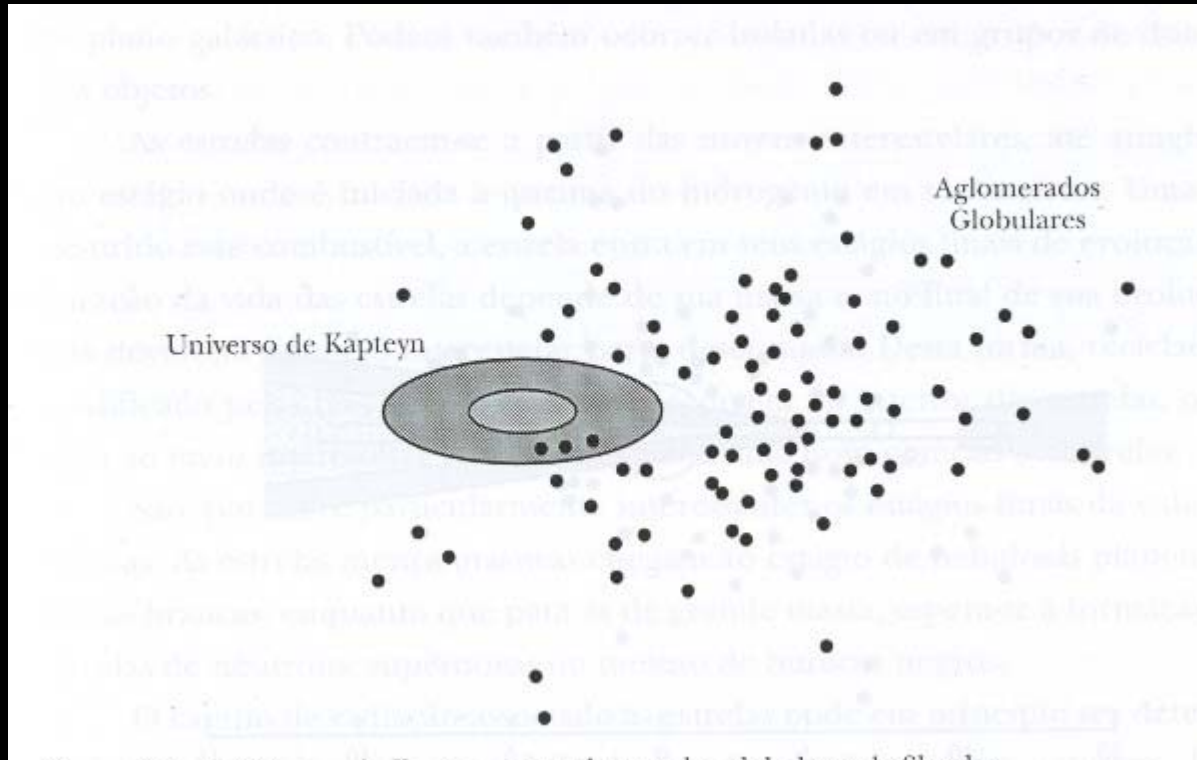


F. W. Herschel (1785)



Via Láctea

# Universo de Kapteyn

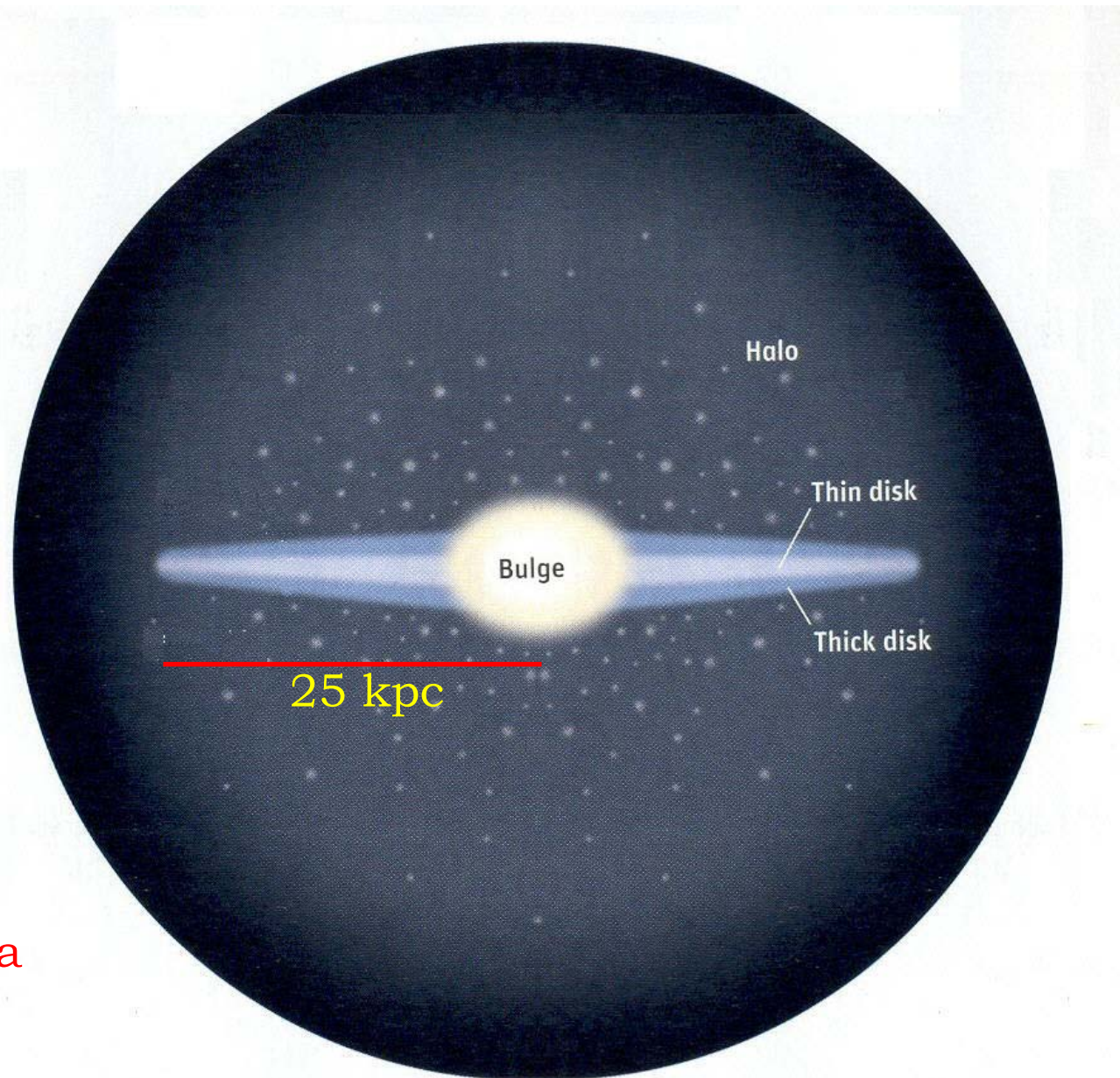


Via Láctea



47 Tuc

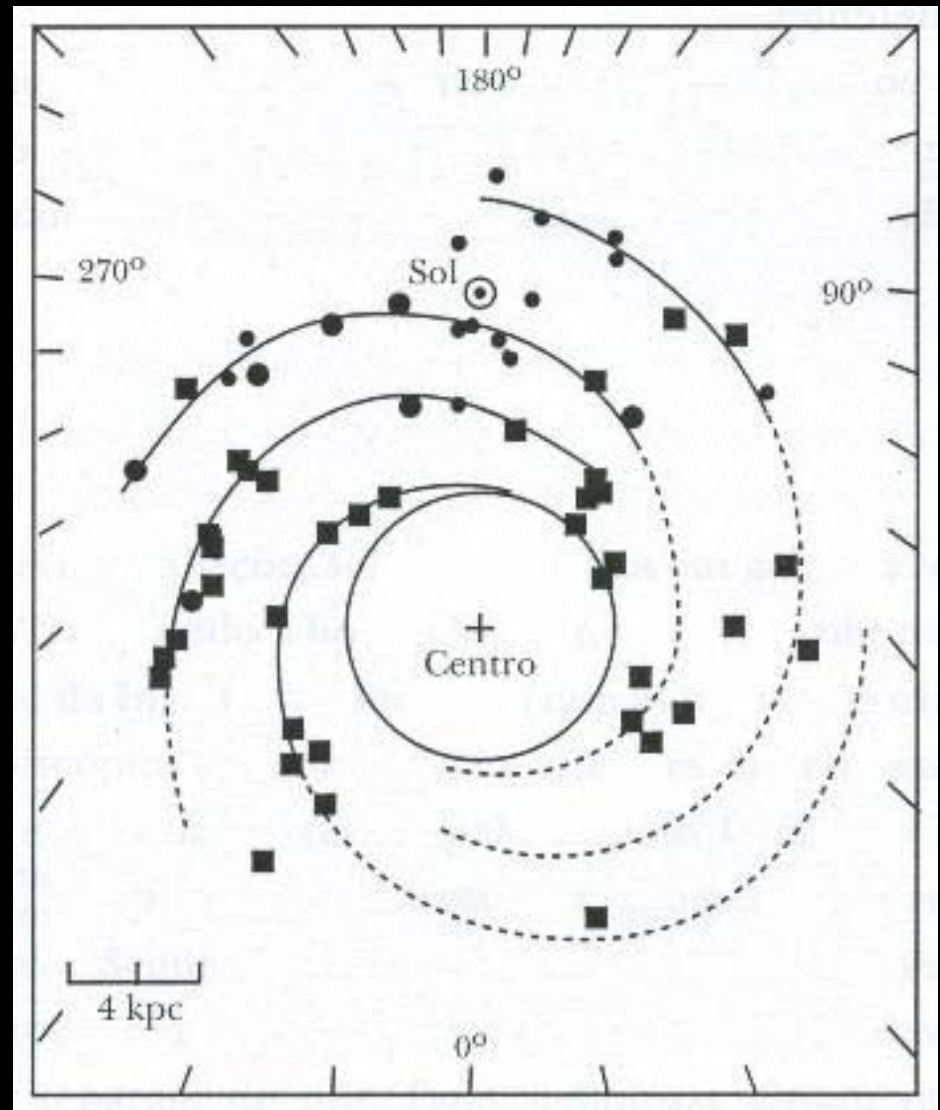
# Estrutura atual



Via Láctea



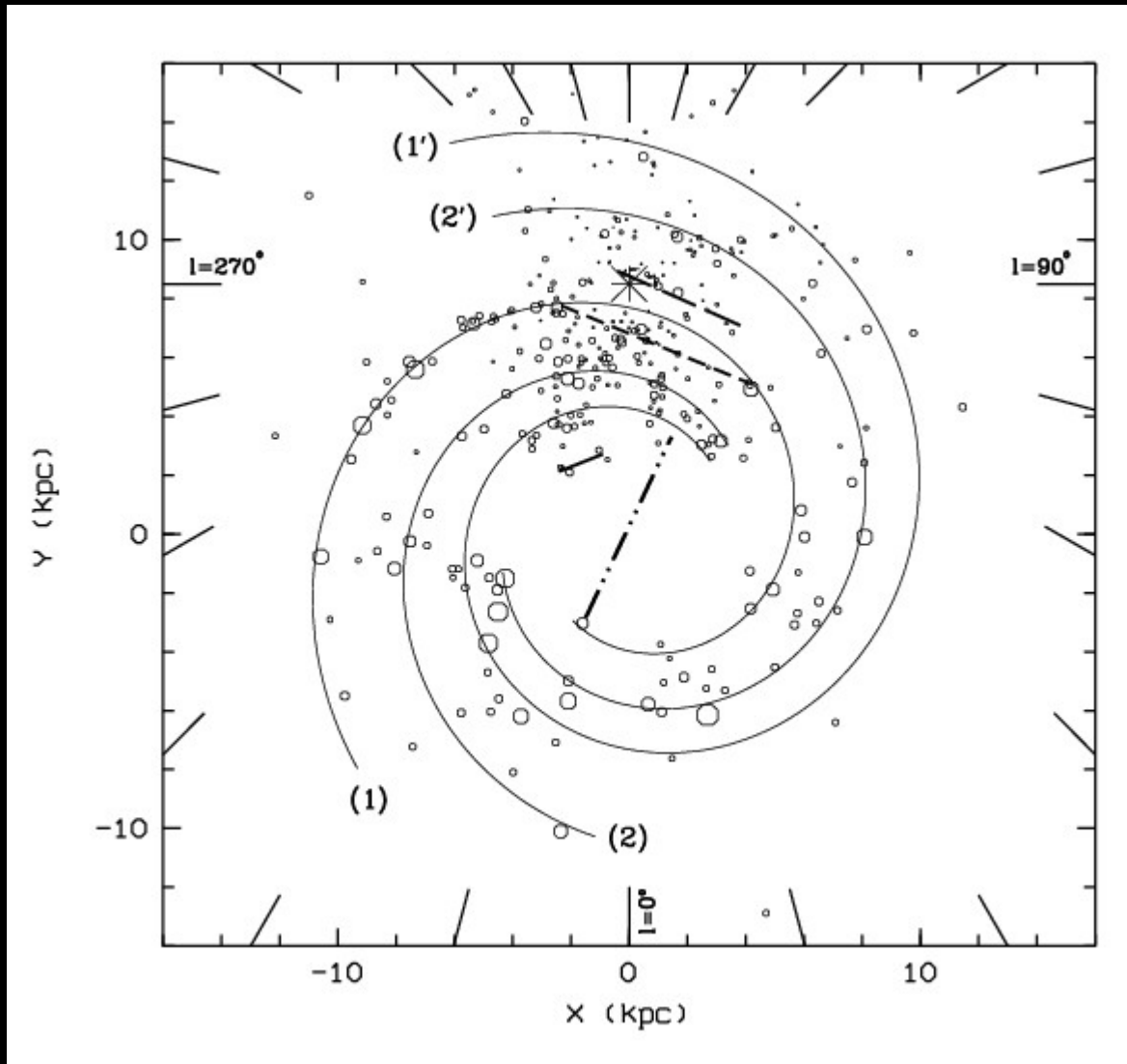
Estrutura espiral  
Georgelin & Georgelin





# Estrutura espiral

Delphine Russeil (2003)

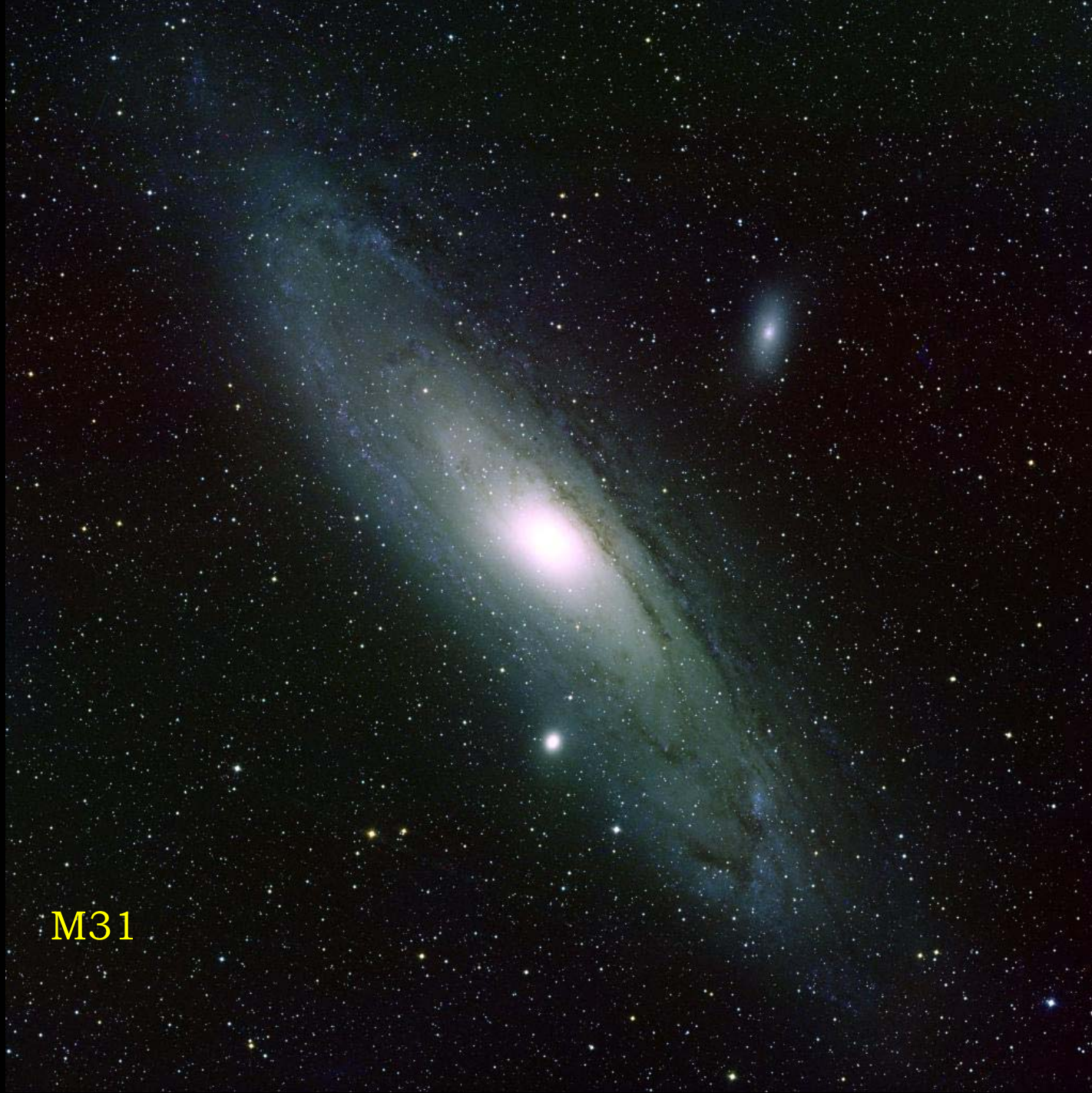




NGC 628

This image shows the galaxy NGC 628, also known as the 'Circlet' galaxy. It features a bright, yellowish-white central core surrounded by a complex, multi-colored spiral structure. The spiral arms are composed of numerous stars, with colors ranging from blue and green to red and orange. The overall appearance is that of a highly active or star-forming galaxy.





M31



M51

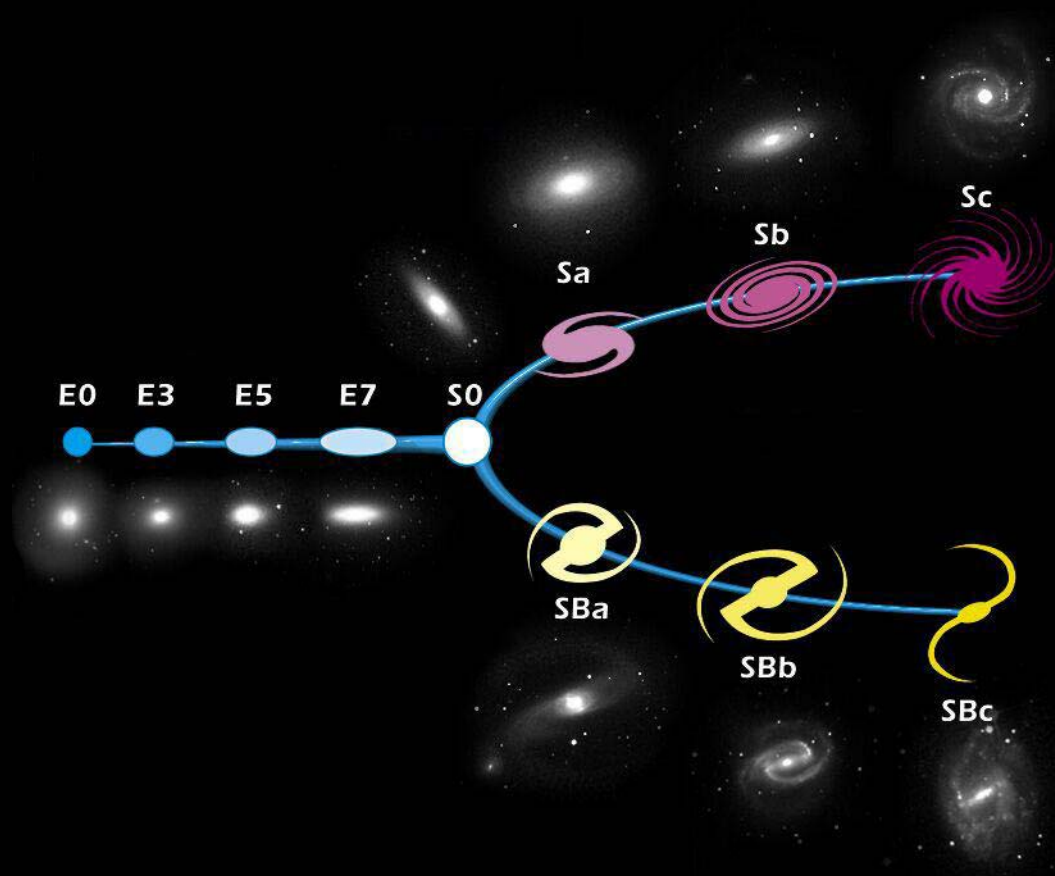




NGC 4594



# Classificação de galáxias





M87



# Nuvens de Magalhães

LMC

SMC



### 3. DENSIDADE DO MEIO INTERESTELAR

- Regiões interestelares densas
- Regiões interestelares difusas
- Meio internuvens

Região	$n$ (cm <sup>-3</sup> )	partículas/copo
Interior solar	$7 \times 10^{26}$	$1 \times 10^{29}$
Água	$3 \times 10^{22}$	$8 \times 10^{24}$
Ar	$2 \times 10^{19}$	$6 \times 10^{21}$
Fotosfera solar	$1 \times 10^{17}$	$3 \times 10^{19}$
Atmosfera (M5 III)	$2 \times 10^{15}$	$6 \times 10^{17}$
Envelope circunstelar (M)	$1 \times 10^8$	$2 \times 10^{10}$
Região IS densa	$1 \times 10^4$	$2 \times 10^6$
Região IS difusa	10	$2 \times 10^3$
Meio internuvem	0,1	20
Gás coronal/MIG	$10^{-4}$	$2 \times 10^{-2}$

Astrofísica do meio interestelar  
W. J. Maciel, Edusp (2002)



## 4. A FAUNA INTERESTELAR

- Campo de radiação
- Grãos e nebulosas escuras
- Nebulosas de reflexão
- Nebulosas difusas – regiões HII
- Nebulosas planetárias
- Restos de supernovas
- Nuvens moleculares - SFR
- Nuvens de H neutro
- Campo magnético
- Gás coronal, meio internuvens
- Raios cósmicos

- Campo de radiação



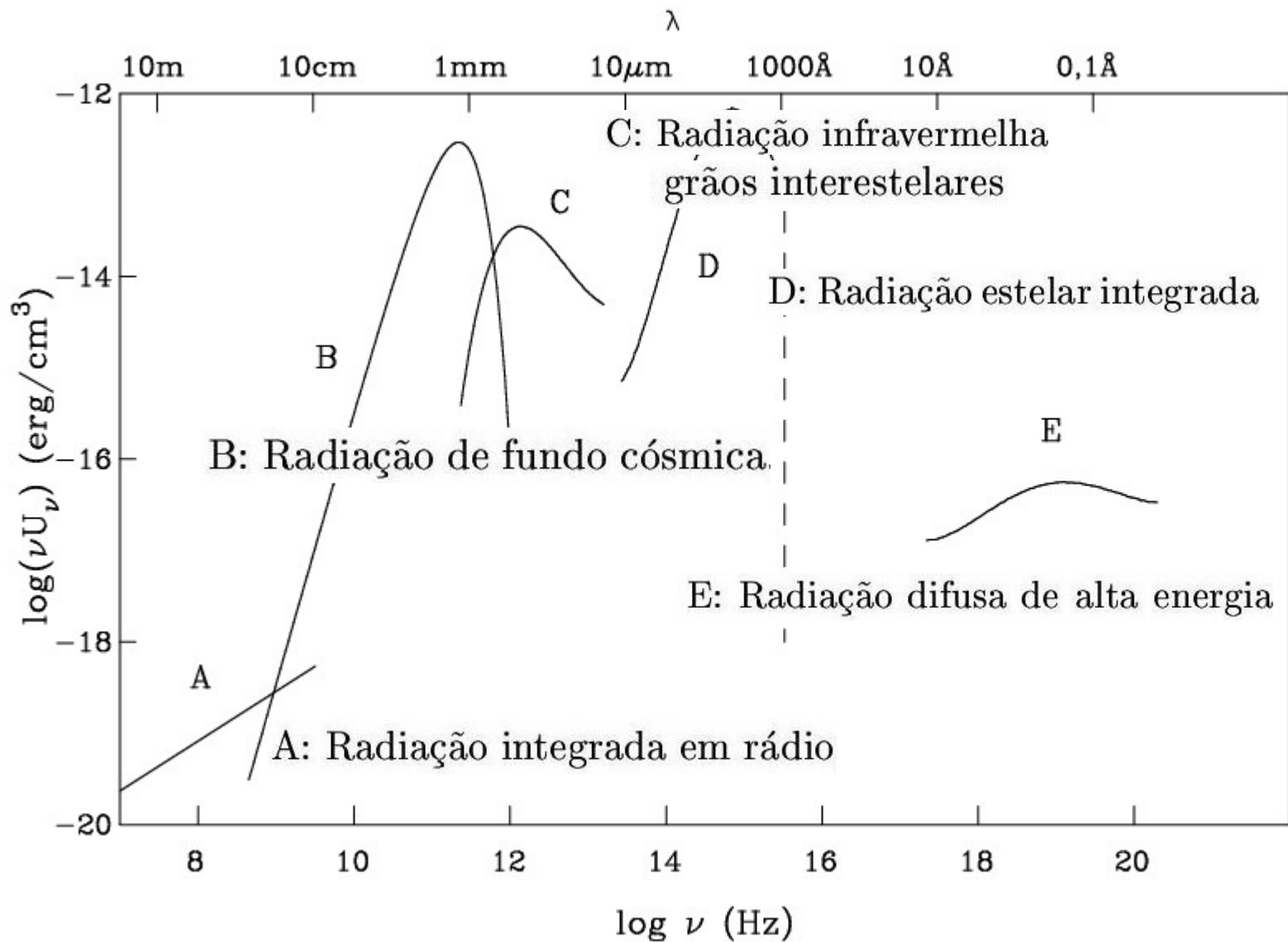
M103



7

7. Luz visível, comprimento de onda 4000 a 6000 A. Fonte: estrelas próximas, gás ionizado interestelar e nuvens escuras de poeira e gás.

# Campo de radiação

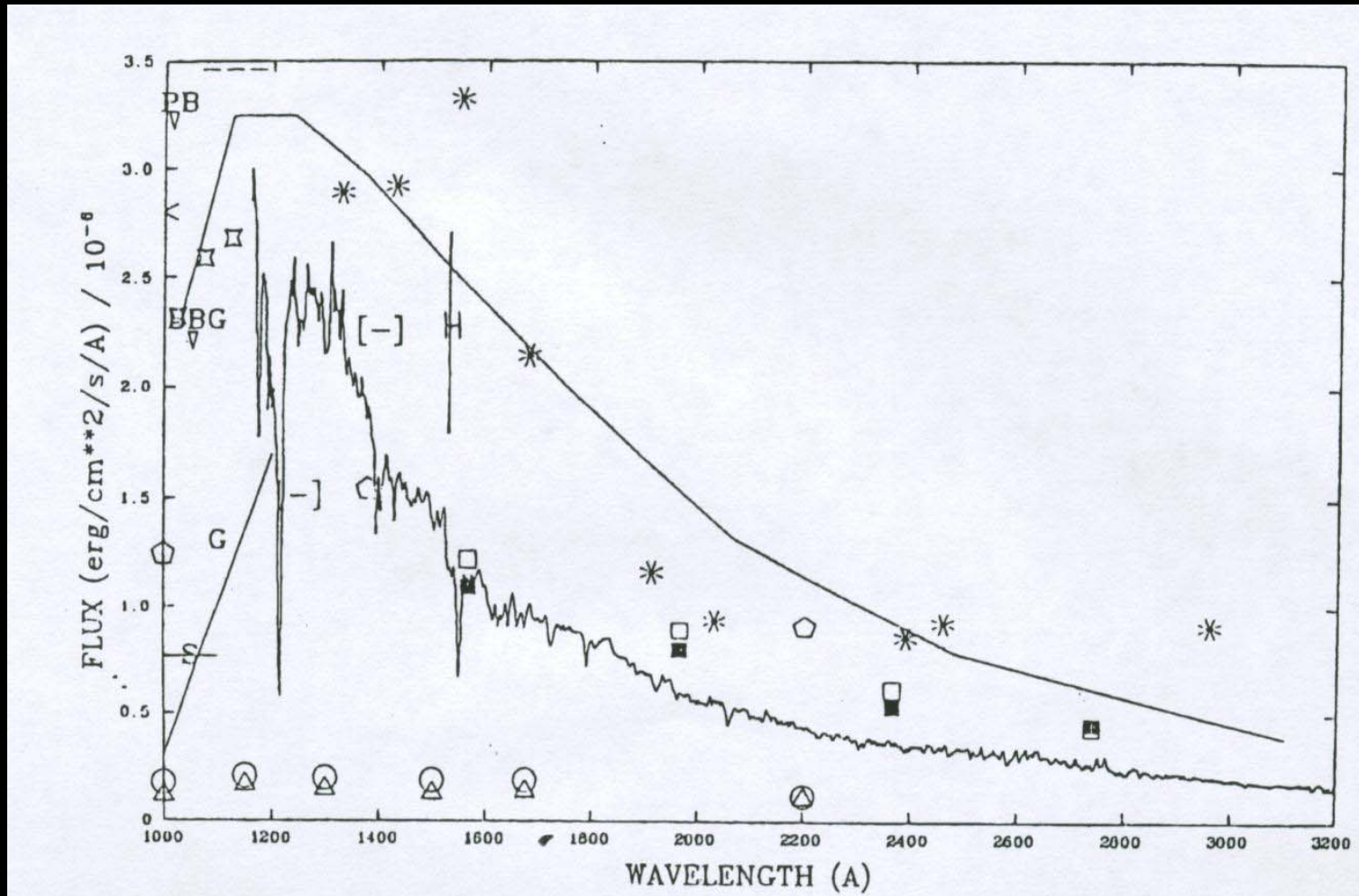




## Campo de radiação

- A: Radiação integrada em rádio;
- B: Radiação de fundo cósmica, característica de uma temperatura de 2,7 K;
- C: Radiação infravermelha, incluindo contribuições galácticas e extragalácticas, com uma forte componente devida à emissão térmica dos grãos interestelares (capítulo 9);
- D: Radiação estelar integrada, na faixa do ultravioleta, que é o principal tema deste capítulo, apresentando um corte em  $\nu = 3,29 \times 10^{15}$  Hz, ou  $\lambda = 912$  Å.
- E: Radiação difusa de alta energia, compreendendo a radiação X e  $\gamma$  de origem galáctica e extragaláctica.

# Campo de radiação



Gondhalekar (1980)

## O CAMPO DE RADIAÇÃO

$$F_\lambda \simeq \sum_1^4 W_i B_\lambda(T_i) .$$

---

$T_i$ (K)	14 500	7 500	4 000	2,7
-----------	--------	-------	-------	-----

---

$W_i$	$4 \times 10^{-16}$	$1,5 \times 10^{-14}$	$1,5 \times 10^{-13}$	1
-------	---------------------	-----------------------	-----------------------	---

---

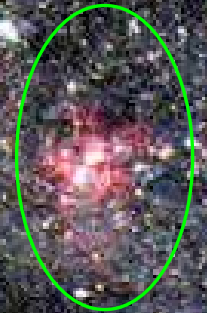
Werner e Salpeter (1969)

- Grãos e nebulosas escuras

Cruzeiro do Sul



Eta Carinae



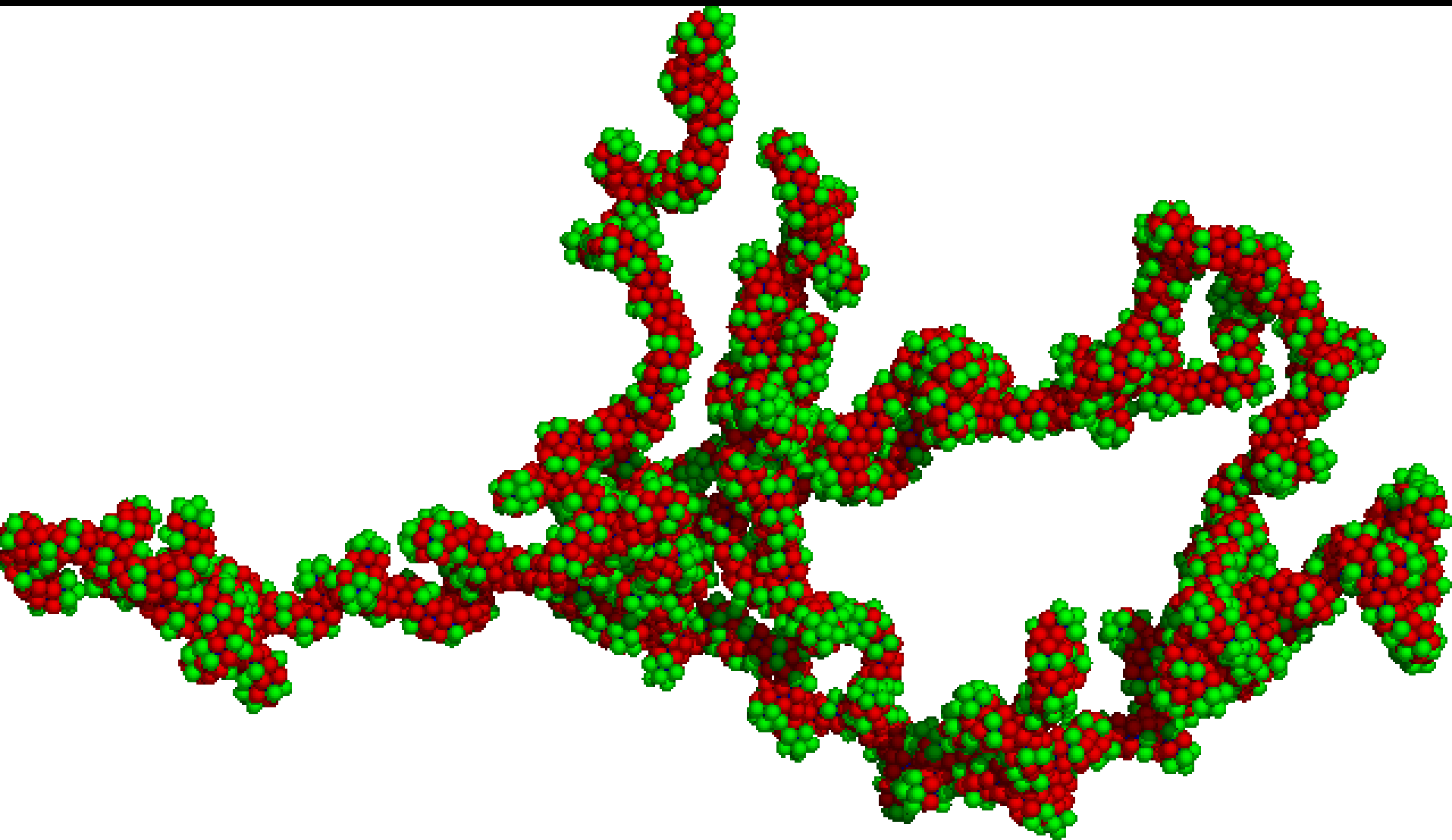


Saco de Carvão



A photograph of the Horse Head Nebula (NGC 2343) in the constellation Orion. The nebula is a dark, silhouetted structure against a vibrant, reddish-pink and purple background of interstellar dust and gas. The shape of the nebula resembles the head of a horse, with a prominent snout and a mane-like structure. Numerous bright stars are scattered throughout the field of view, some appearing as sharp points of light and others as larger, more diffuse spots. The overall color palette is dominated by deep reds, purples, and blues, with the dark silhouette of the nebula providing a stark contrast.

Nebulosa Cabeça  
de Cavalo (Orion)



Grãos interestelares

## EXTINÇÃO INTERESTELAR

Sem extinção:

$$m - M = 5 \log d - 5$$

Com extinção:

$$m - M = 5 \log d - 5 + A_v$$

Avermelhamento interestelar:

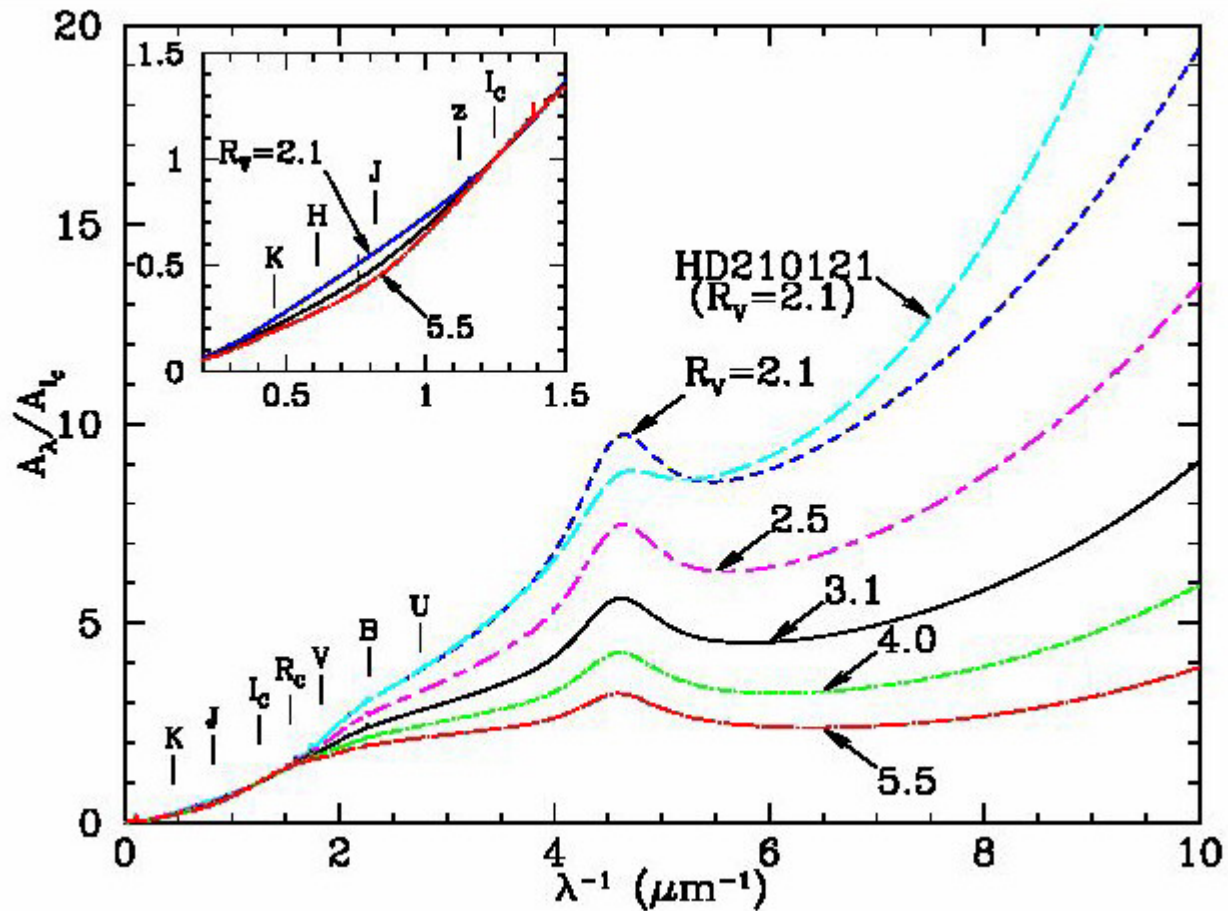
$$A_v = 3 E(B - V)$$

Relação gás-poeira:

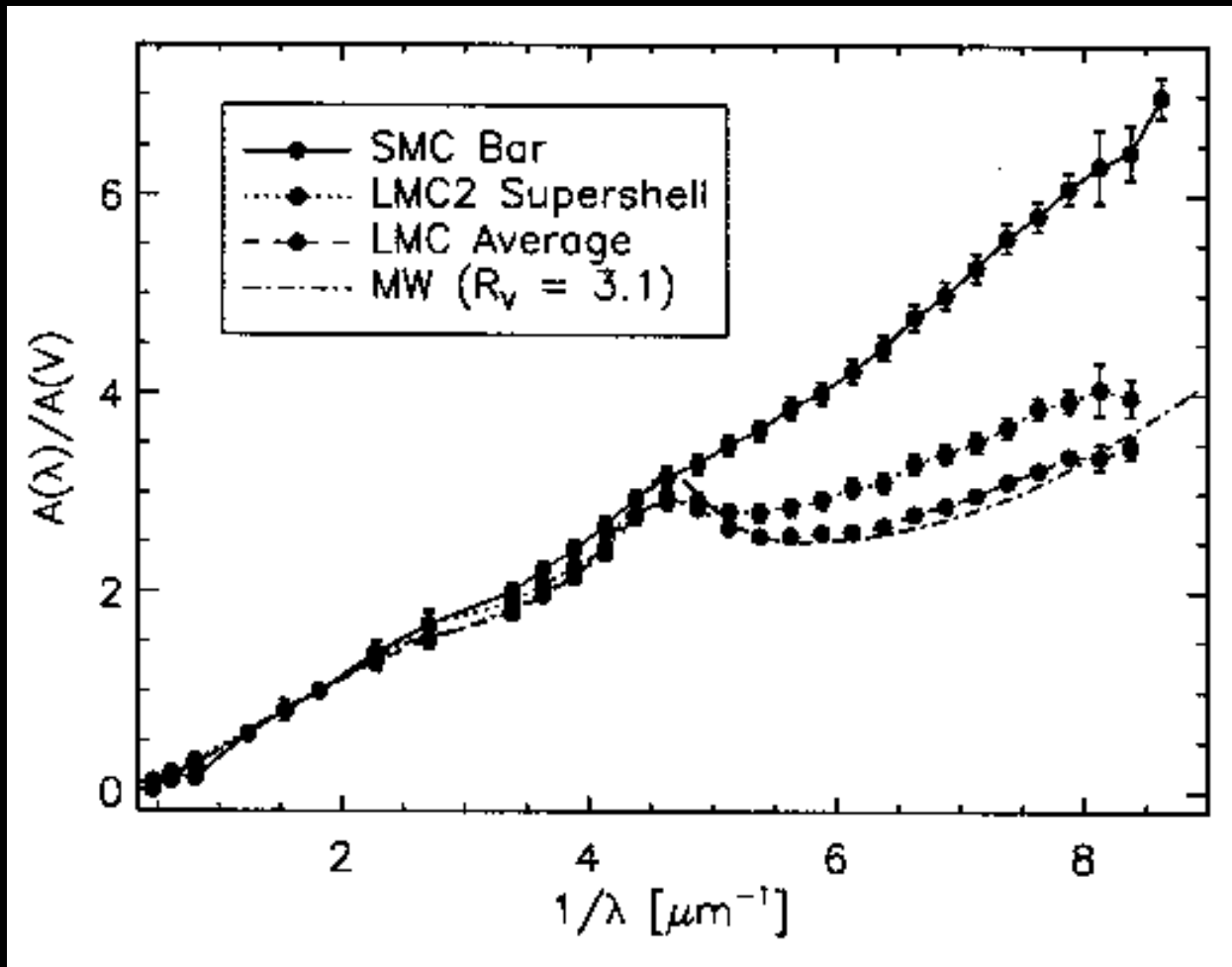
$$N(\text{H} + \text{H}_2) = 5.8 \times 10^{21} E(B - V)$$



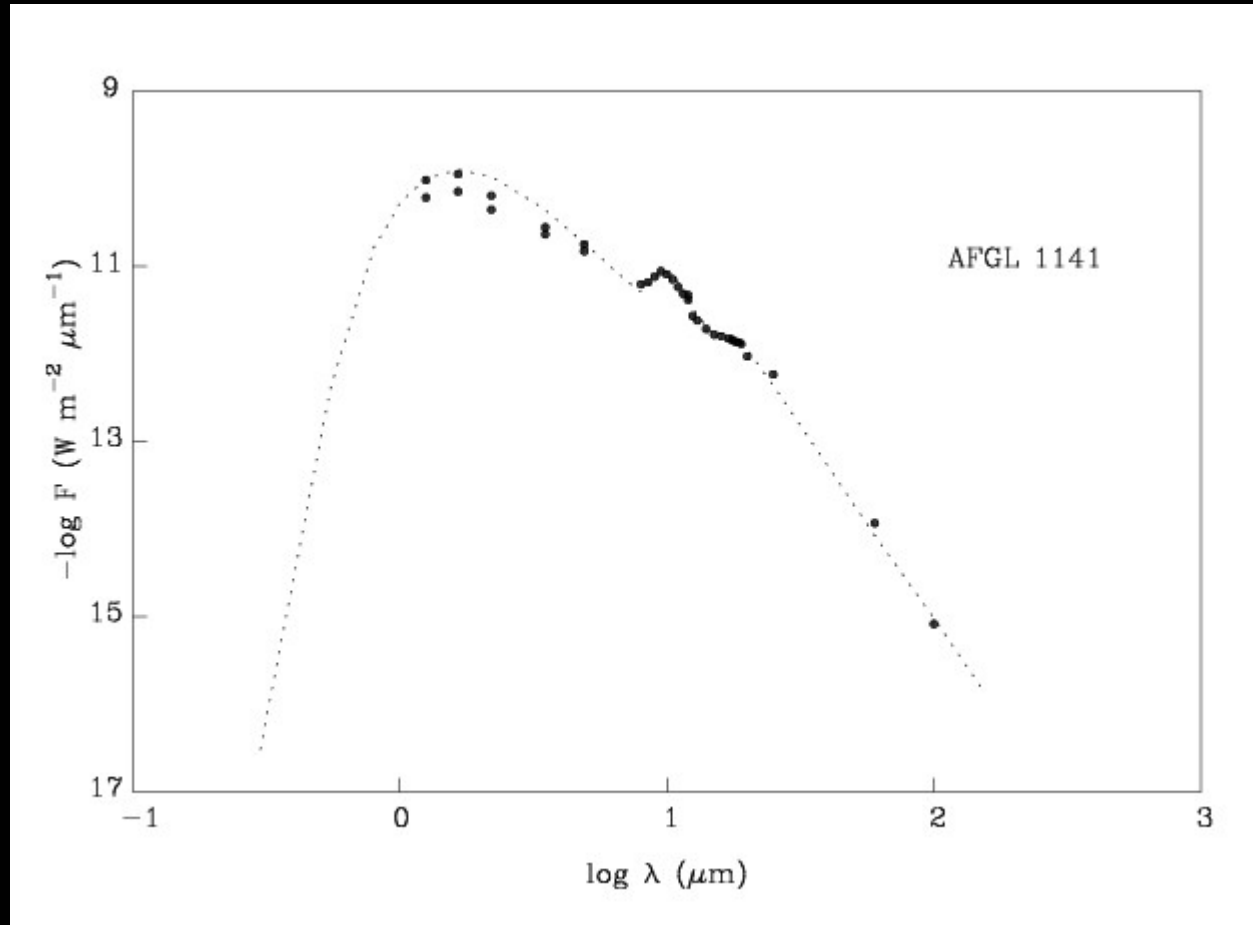
# Extinção interestelar



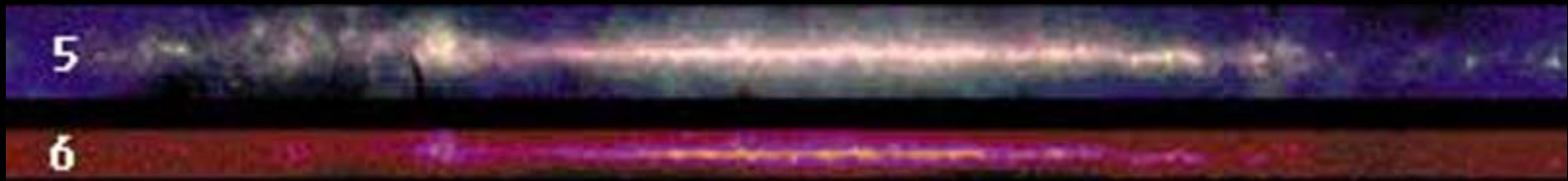
# Extinção interestelar



# Emissão infravermelha

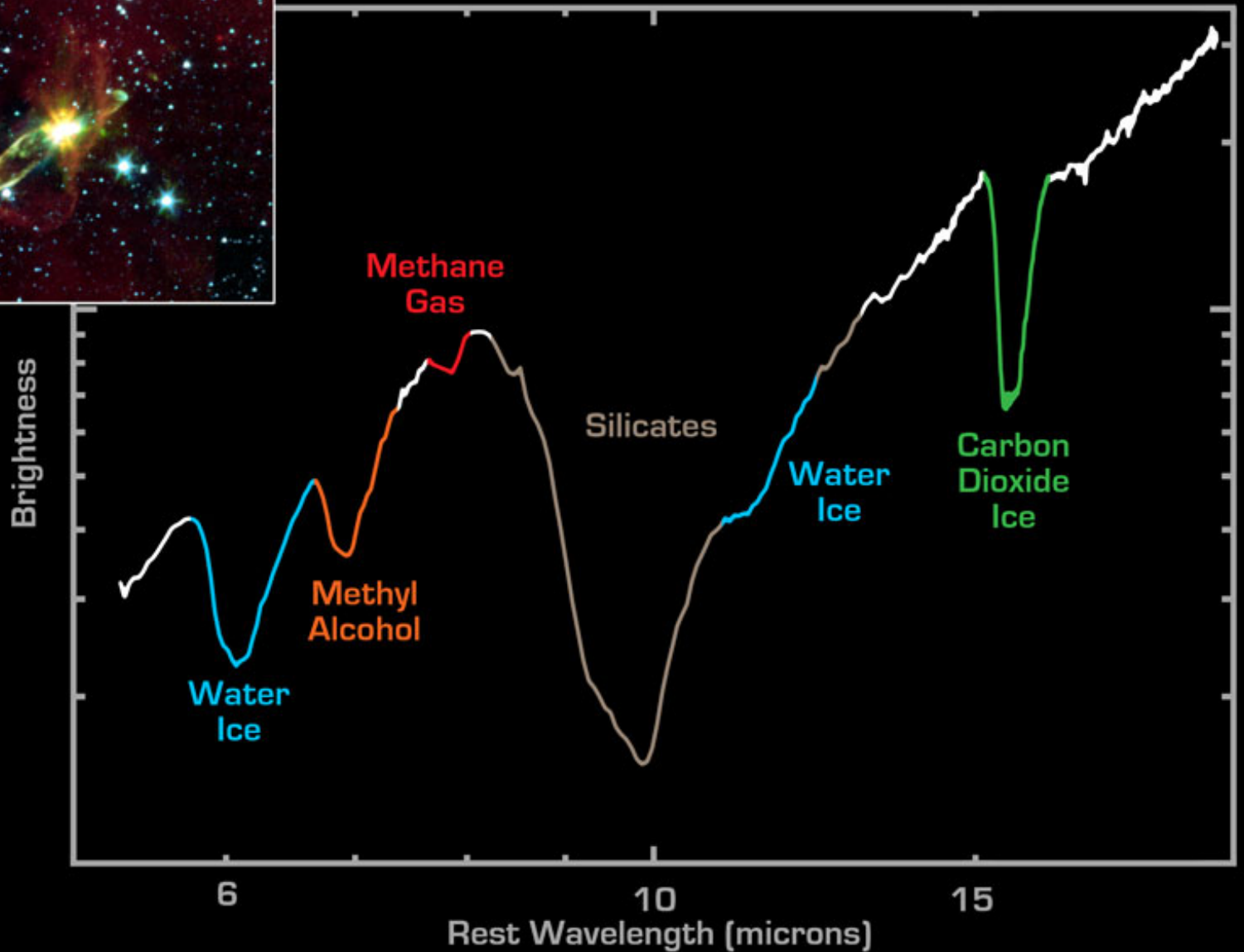


S. Lorenz



5. Infravermelho distante, comprimento de onda 12 a 100 microns. Fonte: Poeira interestelar, em particular grãos aquecidos pela radiação estelar em regiões de formação de estrelas.
6. Infravermelho próximo, comprimento de onda 6.8 a 10.8 microns. Fonte: Estrelas frias e avermelhadas, moléculas complexas em nuvens interestelares.





Embedded Outflow in HH 46/47

Spitzer Space Telescope • IRS • IRAC

- Nebulosas de reflexão



Pleiades

Witch Head  
Nebula (Orion)





# Emissão: PAH

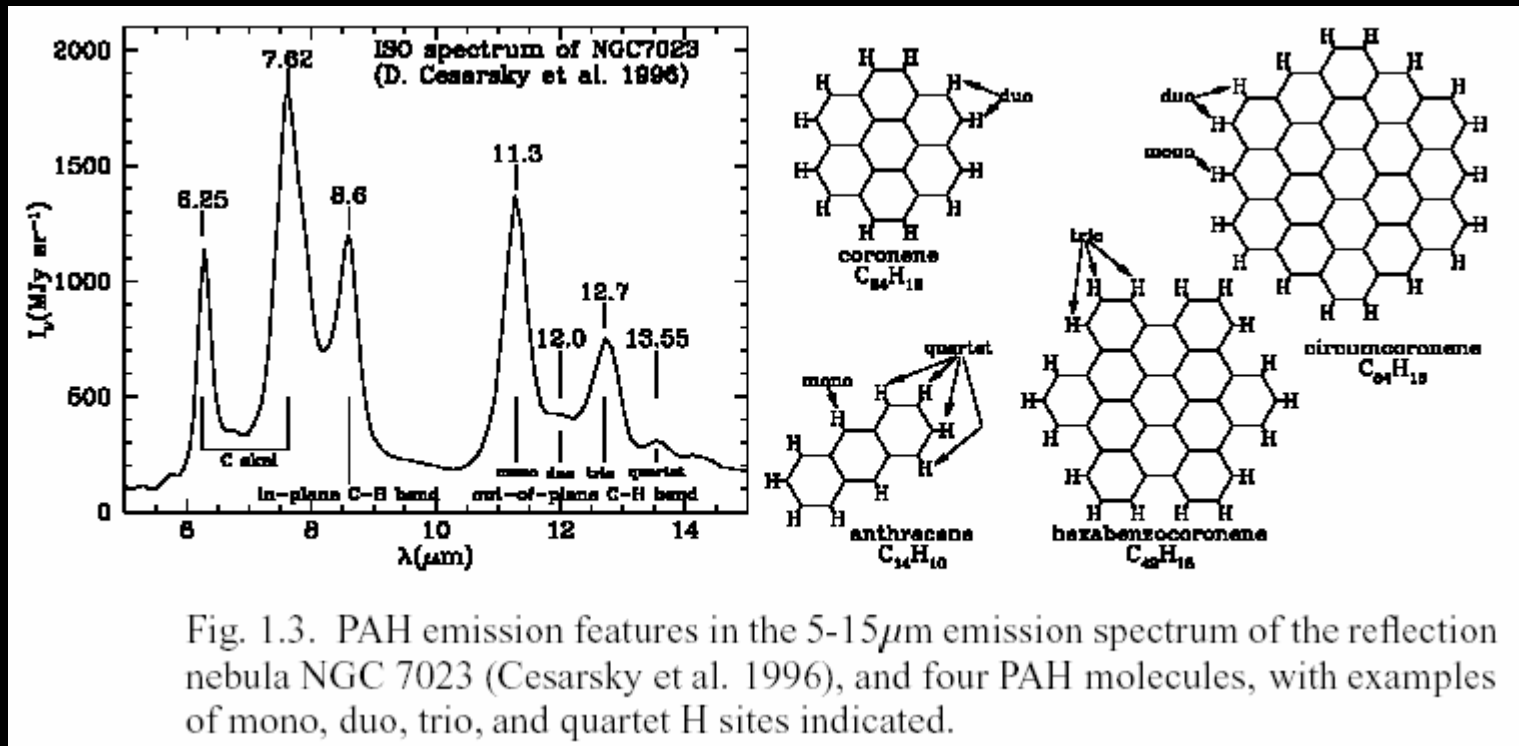
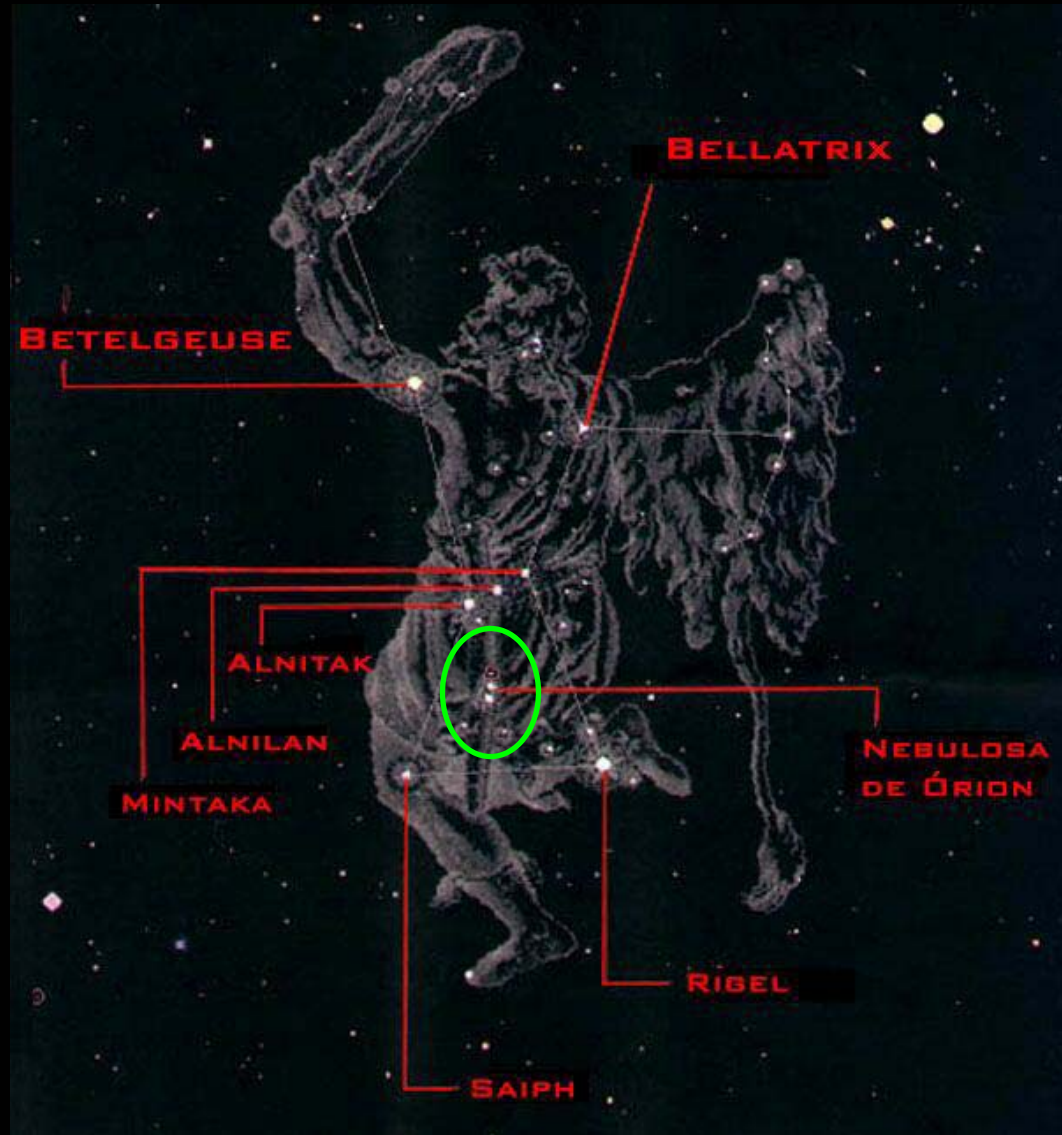
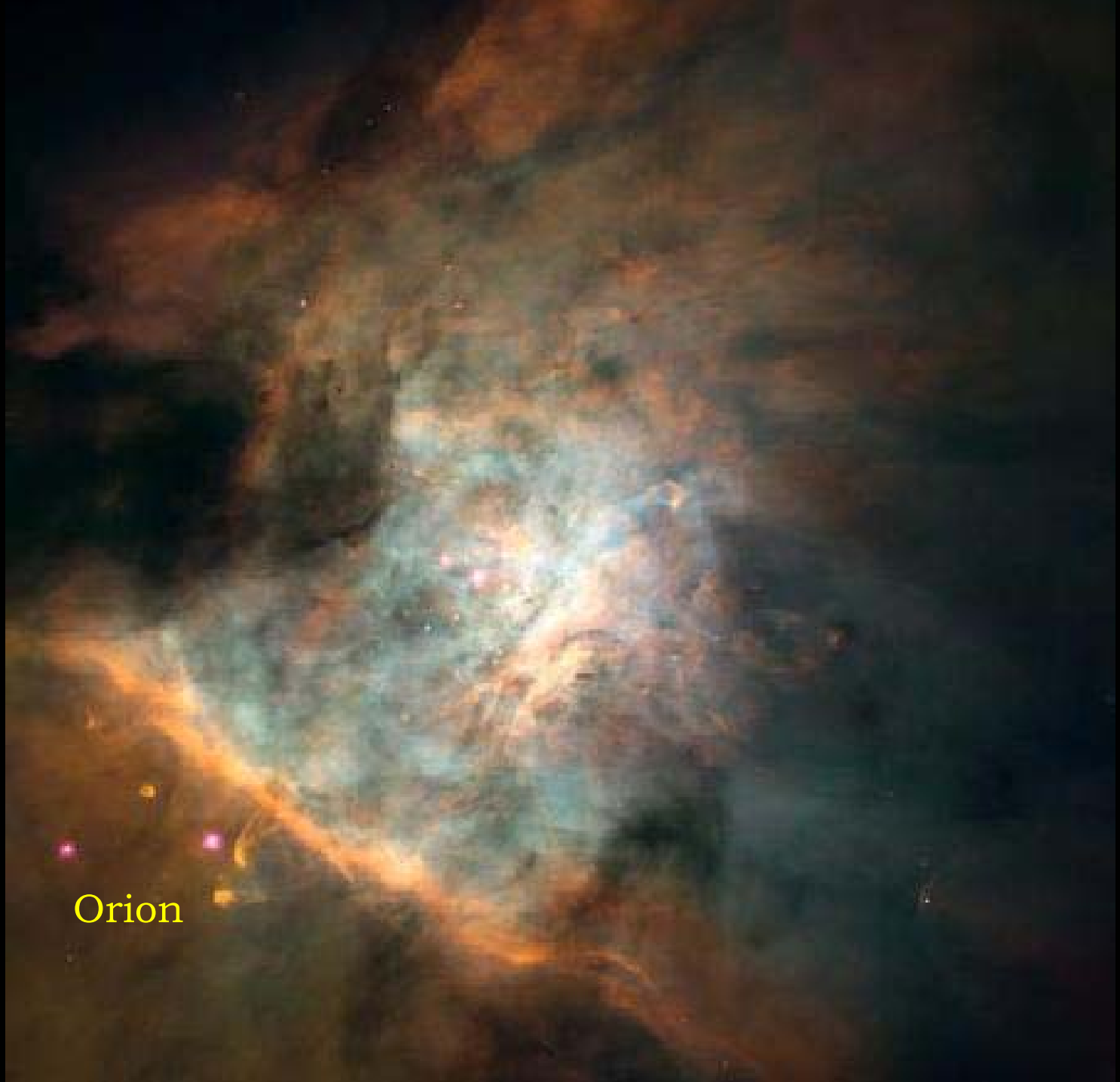


Fig. 1.3. PAH emission features in the 5-15  $\mu\text{m}$  emission spectrum of the reflection nebula NGC 7023 (Cesarsky et al. 1996), and four PAH molecules, with examples of mono, duo, trio, and quartet H sites indicated.

- Nebulosas difusas – regiões HII

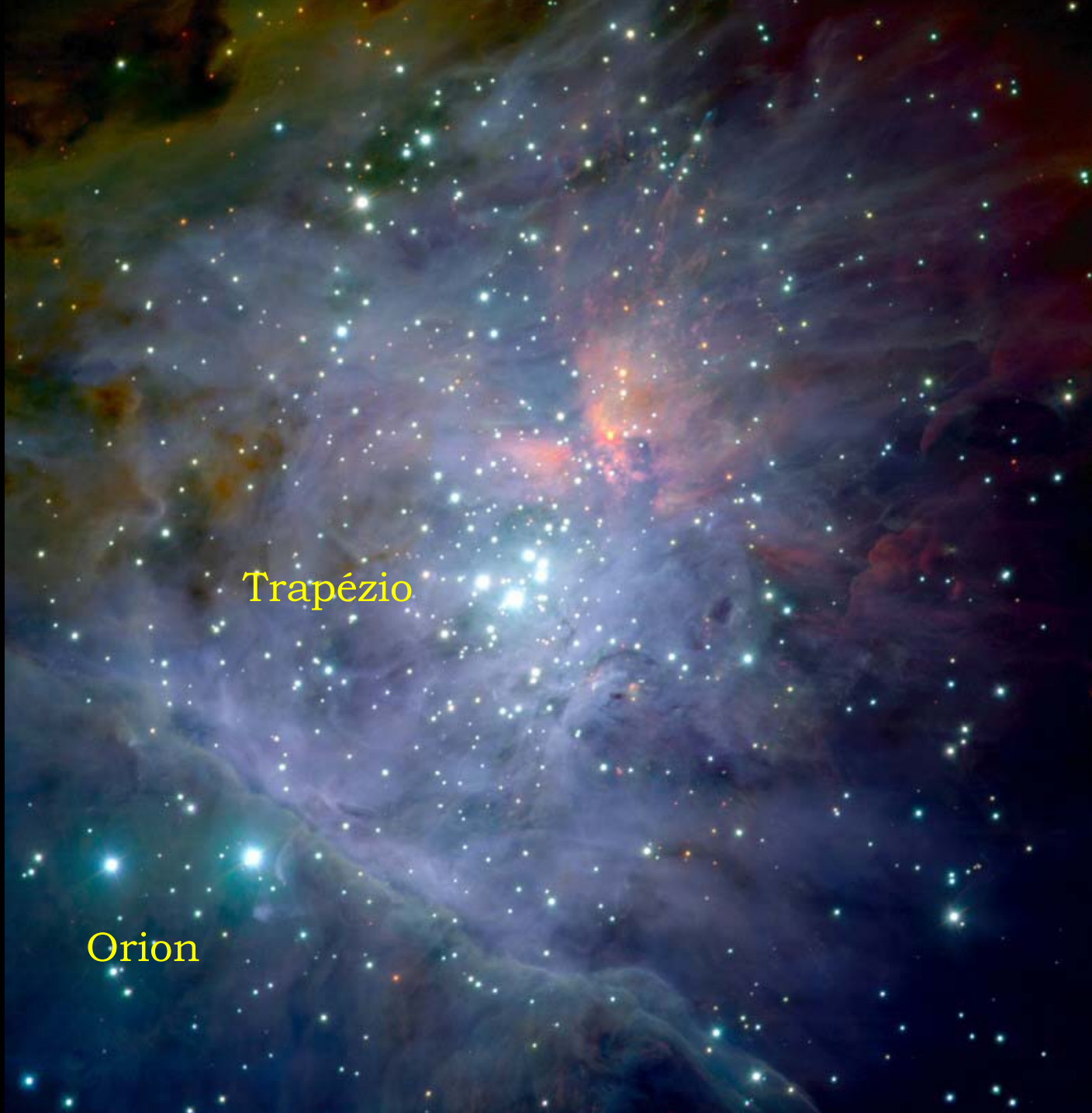


Orion



Orion





Trapézio

Orion



Orion

ET

$$\frac{n_k}{n_j} = \frac{g_k}{g_j} \exp(-h\nu_{jk}/kT) \quad \text{equação de Boltzmann}$$

## EQUILÍBRIO ESTATÍSTICO

$$\frac{dn_j}{dt} = -n_j \sum_y \sum_k (R_{jk})_y + \sum_y \sum_k n_k (R_{kj})_y = 0 .$$

$$n_j \left[ \sum_k (R_{jk})_c + \sum_k B_{jk} U_\nu + \sum_{k < j} A_{jk} \right] =$$

$$\sum_k n_k (R_{kj})_c + \sum_k n_k B_{kj} U_\nu + \sum_{k > j} n_k A_{kj}$$

## EQUILÍBRIO DE IONIZAÇÃO

$$\frac{dn_j}{dt} = -n_j \sum_Y \sum_k (R_{jk})_Y + \sum_Y \sum_k n_k (R_{kj})_Y = 0$$

$$\sum_j n_j (X^r) \beta_{jf} = \sum_j n (X^{r+1}) n_e \alpha_j$$

- Nebulosas planetárias



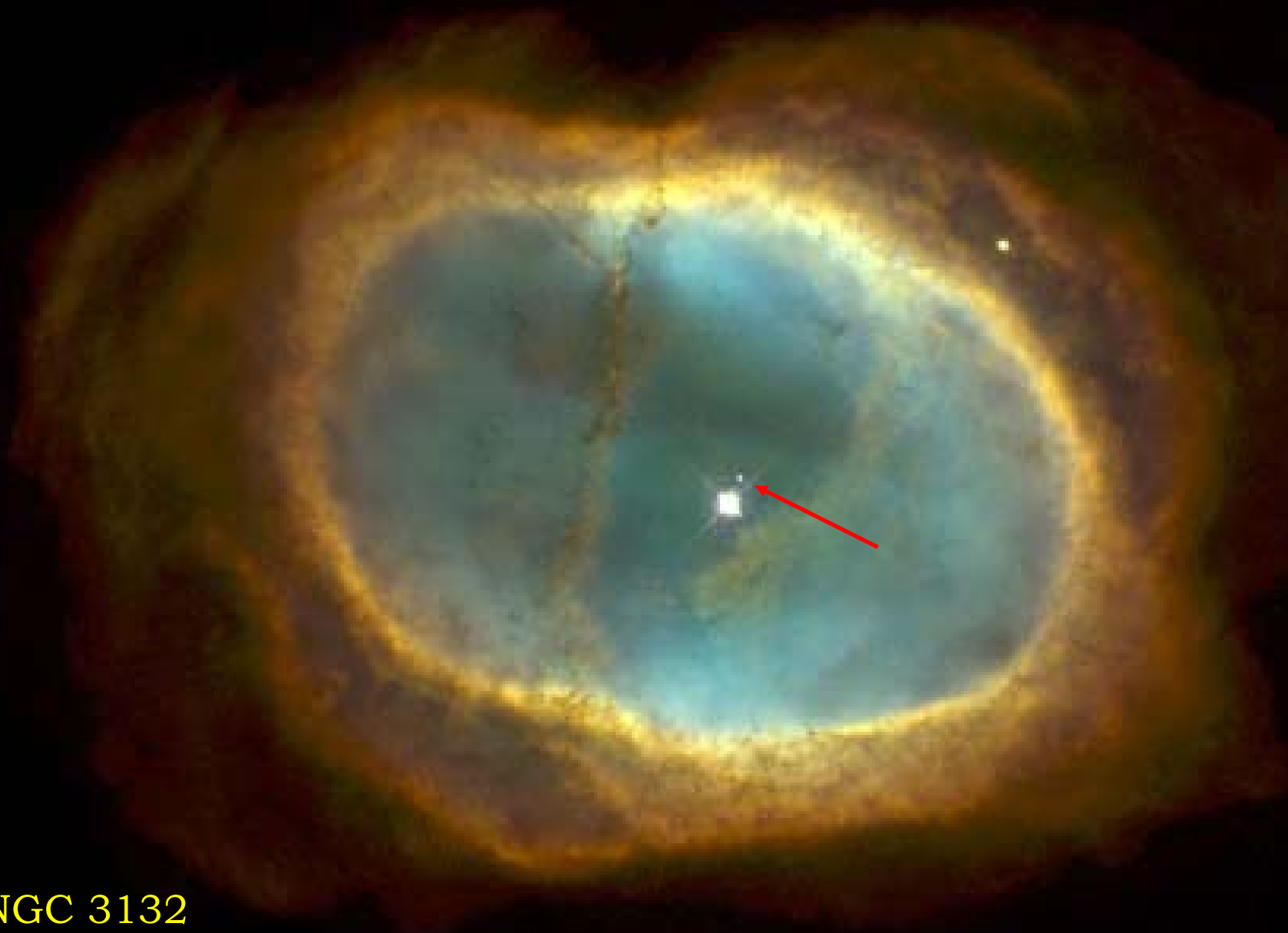
NGC 6853





NGC 6543

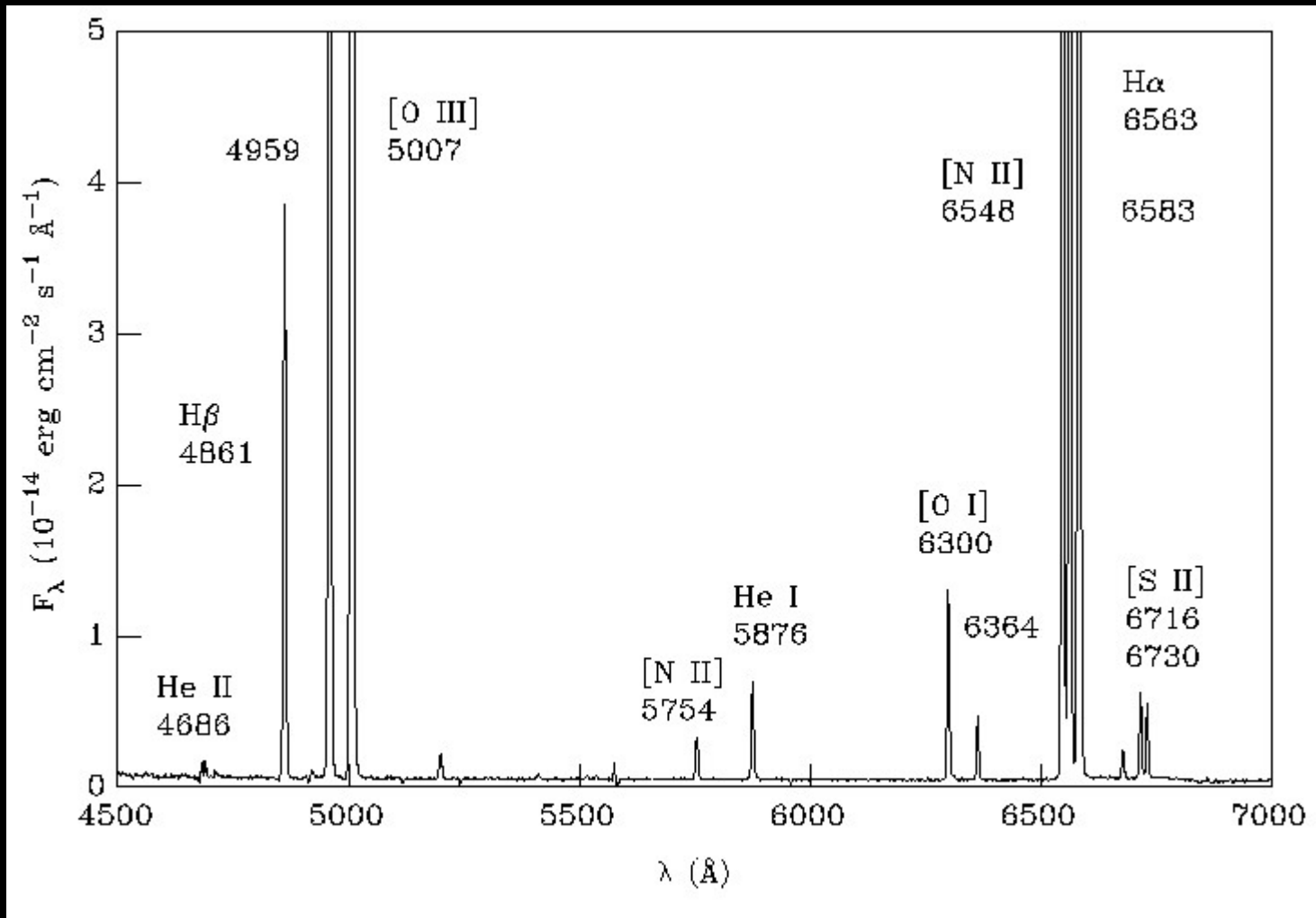
NGC 3132





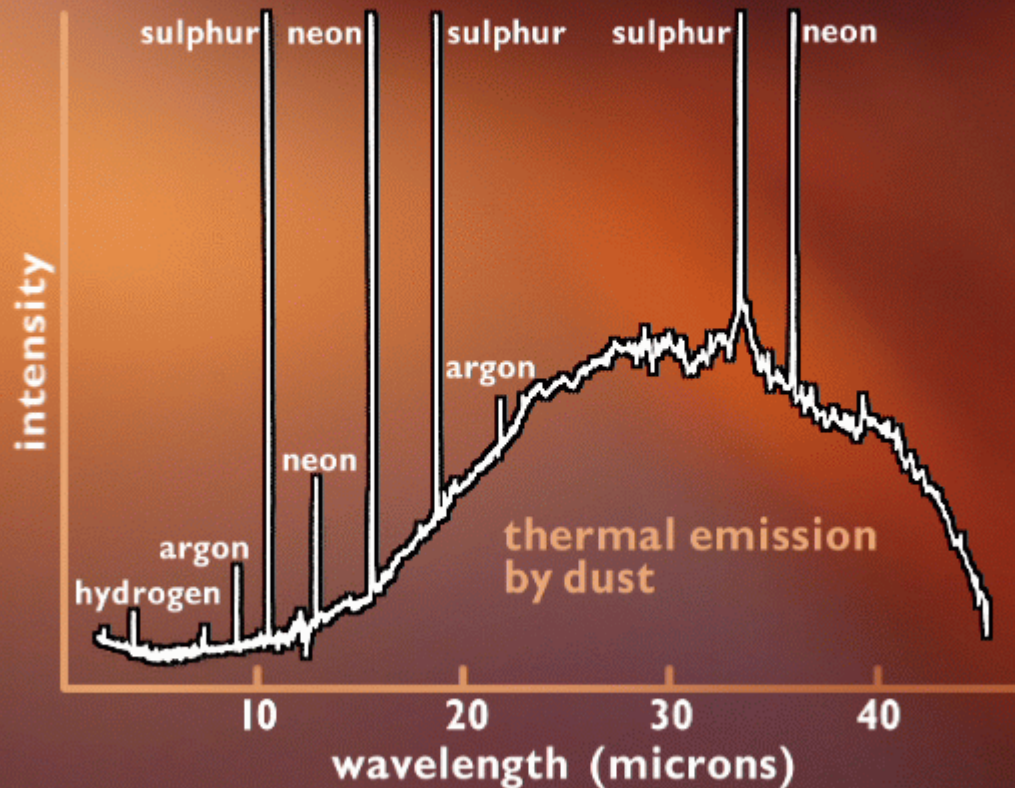
NGC 7293

# ESPECTRO: NGC 2346



R. Costa

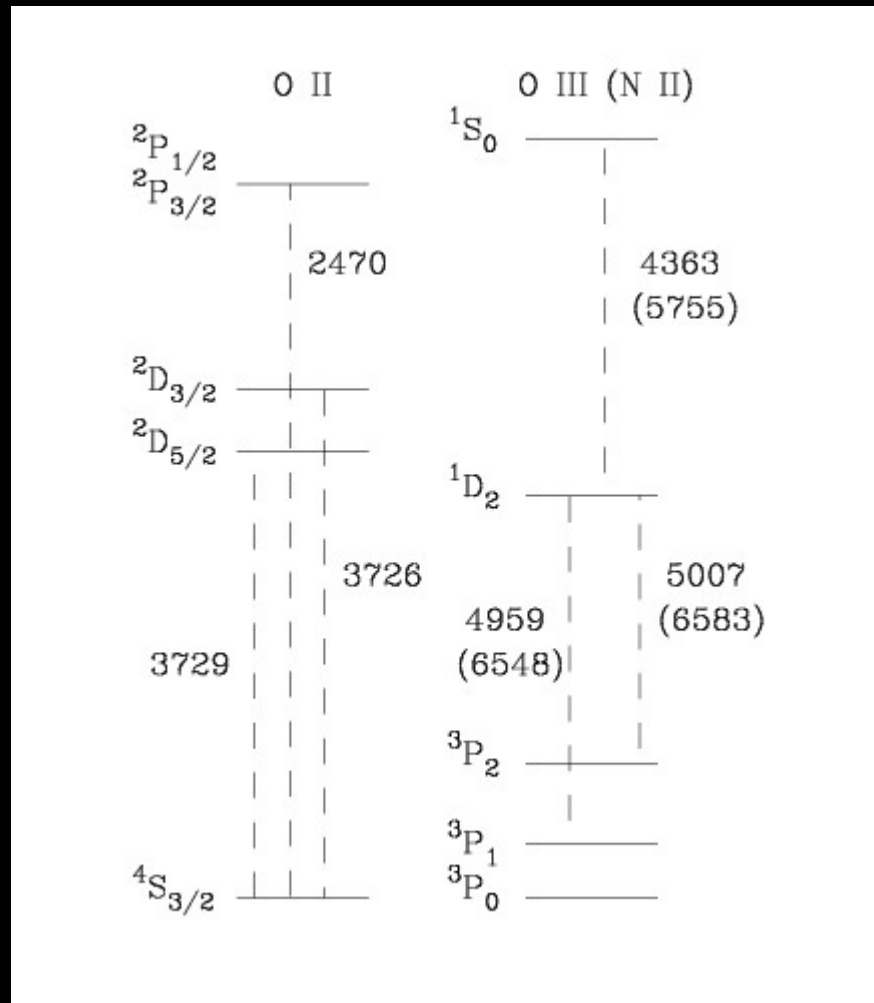
# Short-Wavelength Spectrometer (2.5 to 45 microns) **NGC6543**



ESA/ISO and SWS Consortium

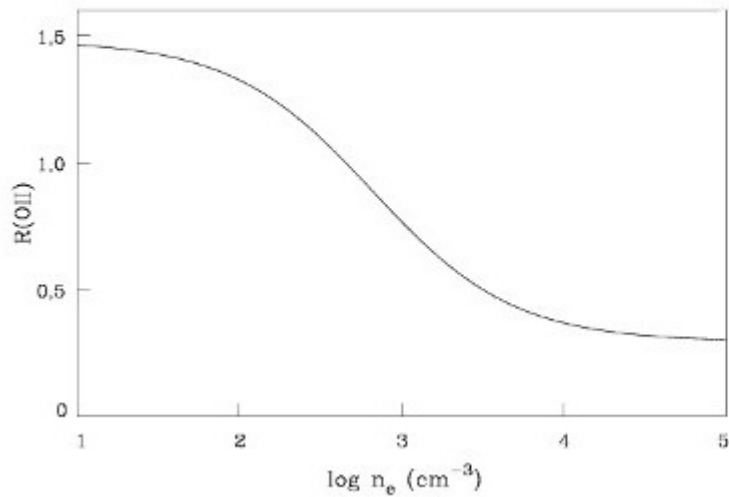


# NIVEIS DE ENERGIA: OII, OIII

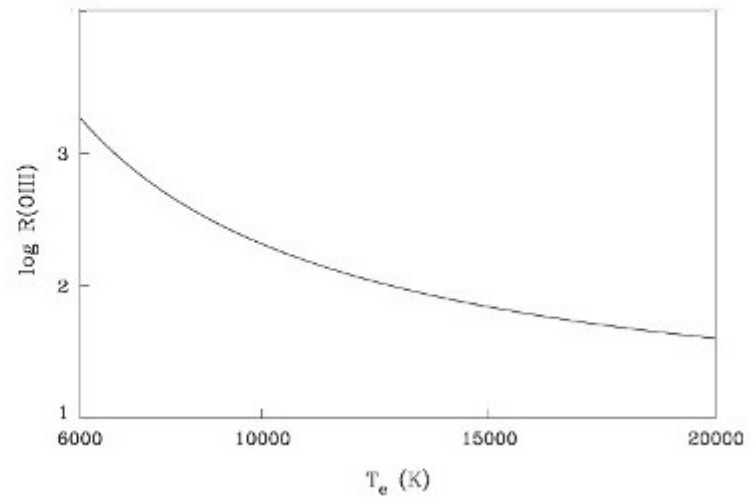


# DENSIDADE E TEMPERATURA ELETRÔNICA

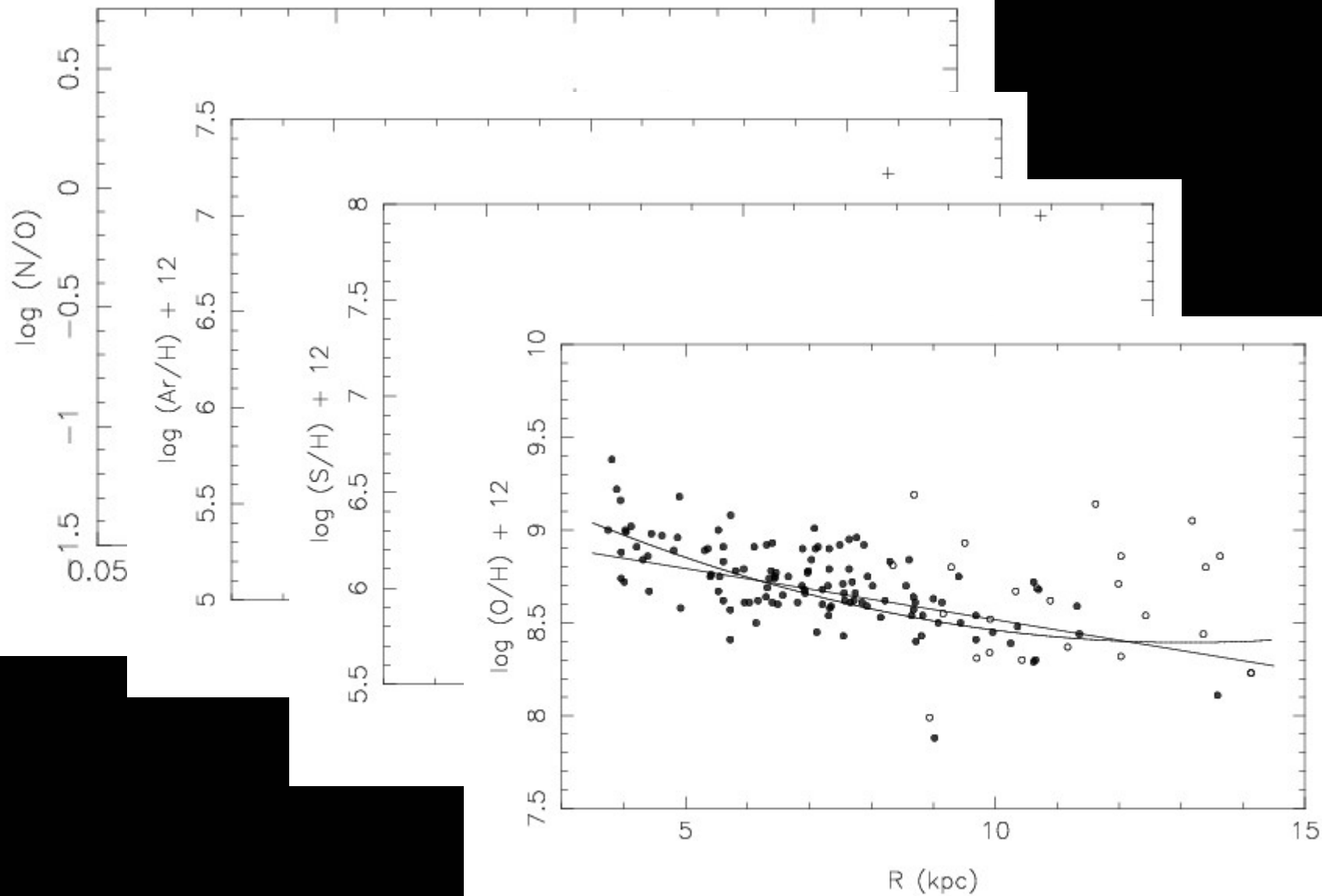
$$R(\text{OII}) = \frac{I_{3729}}{I_{3726}}$$



$$R(\text{OIII}) = \frac{I_{4959} + I_{5007}}{I_{4363}}$$



# ABUNDÂNCIAS



- Restos de supernovas



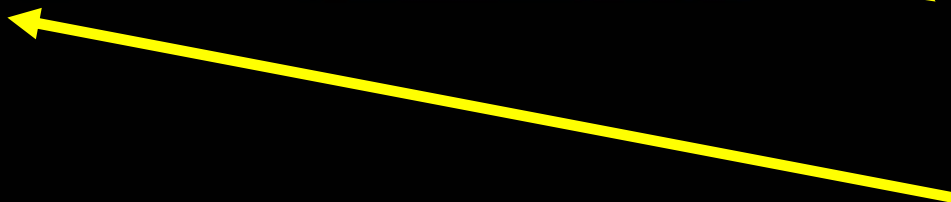
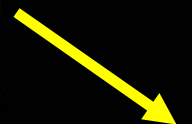
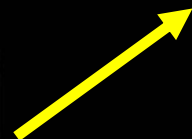
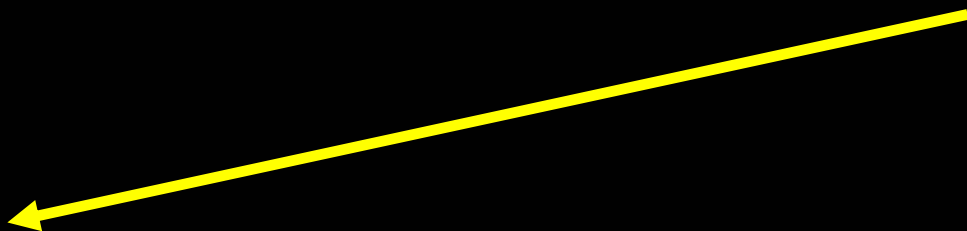
Nebulosa do Caranguejo

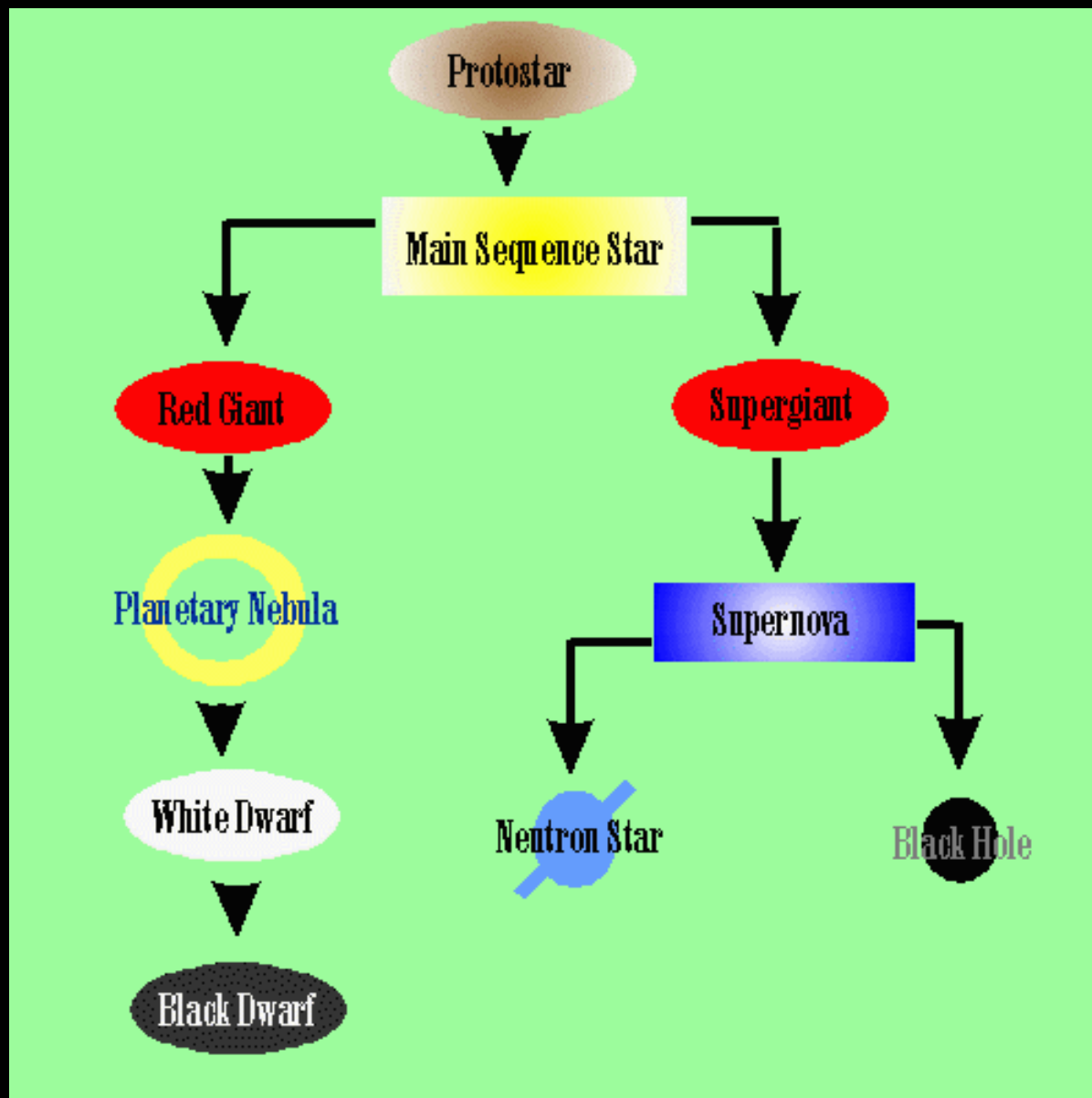


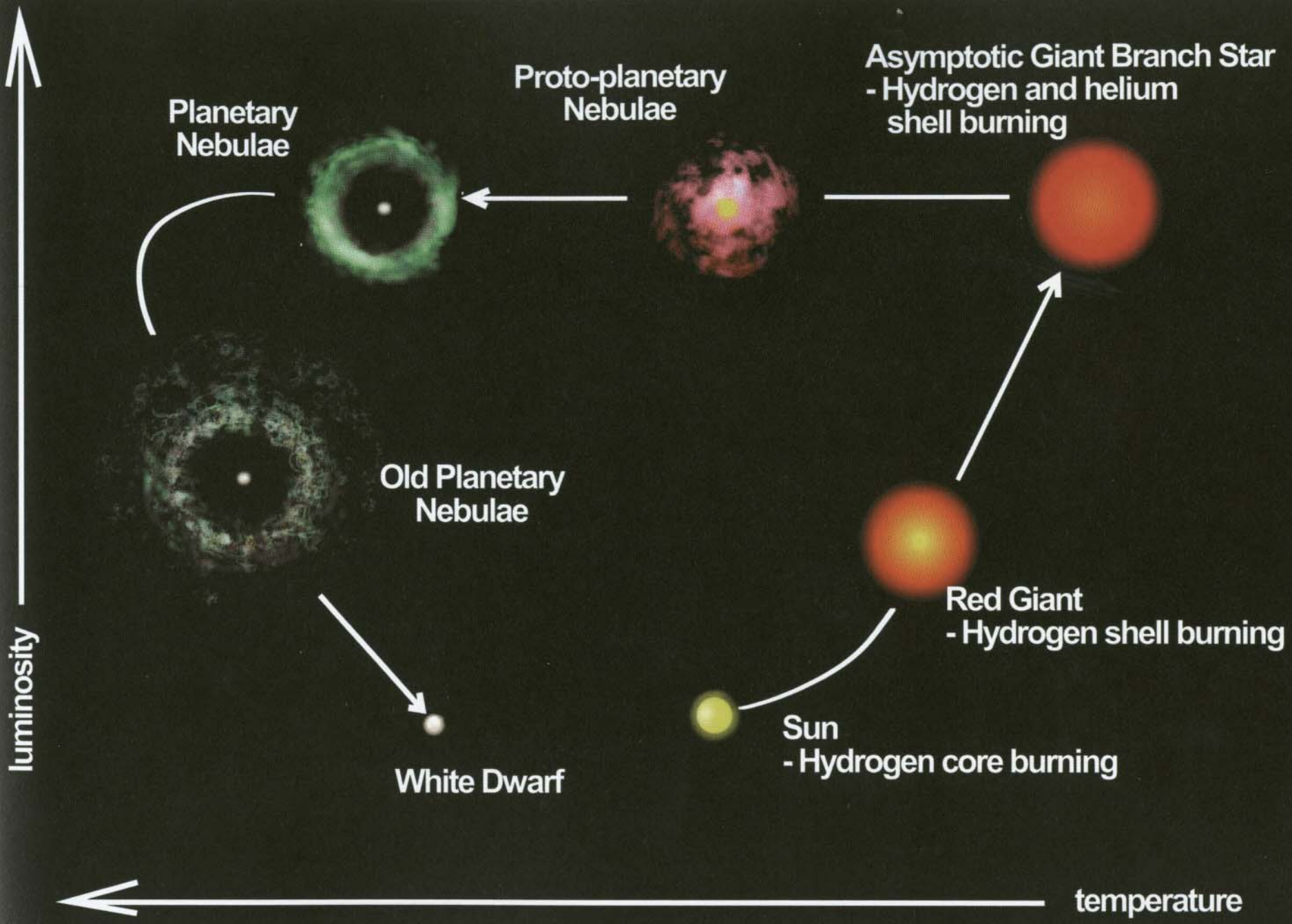
Gás

Estrelas

Restos

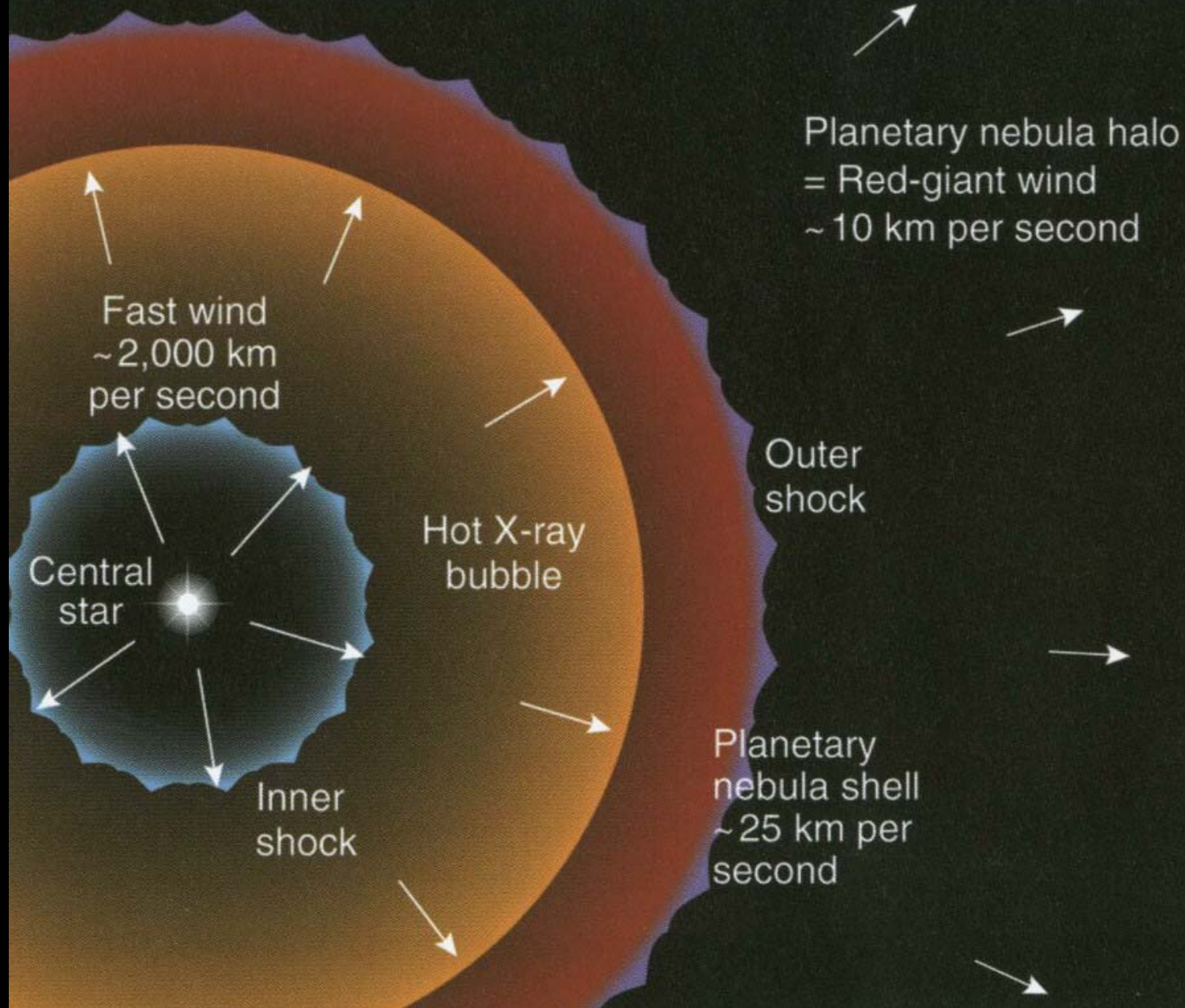








# Interacting-Winds Theory



# EQUAÇÕES DOS FLUIDOS

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

equação de continuidade

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{\rho} F$$

equação de Euler

$$\left\{ \begin{array}{l} T = \text{constante} \\ \frac{d \ln P}{d \ln \rho} = \gamma \end{array} \right.$$

equação de energia

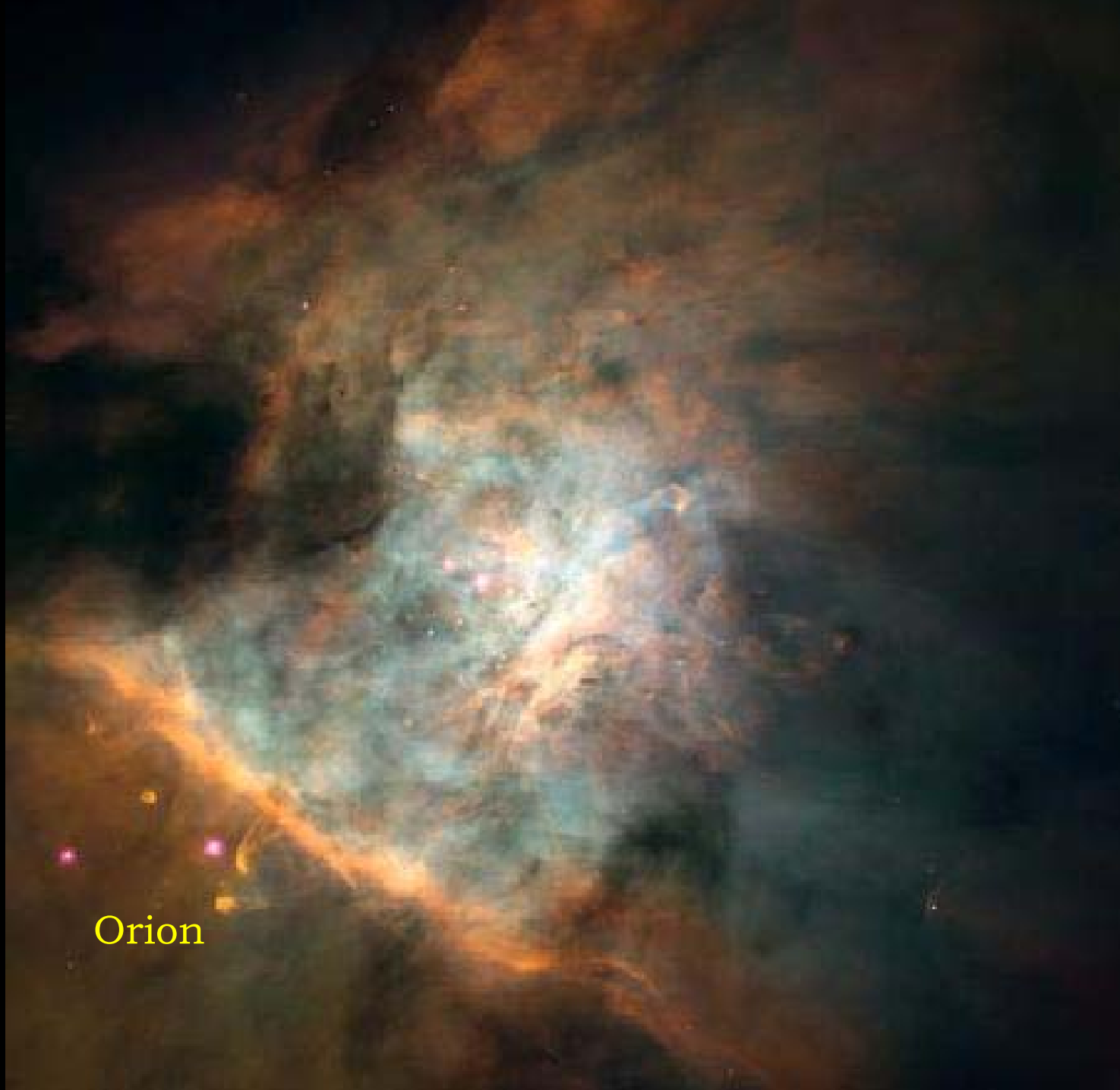
$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial [\rho(v^2/2 + e)]}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot [\rho \vec{v}(v^2/2 + e + P/\rho) + \vec{q}_c] = \vec{v} \cdot \vec{F} + Q_A + Q_R \end{array} \right.$$



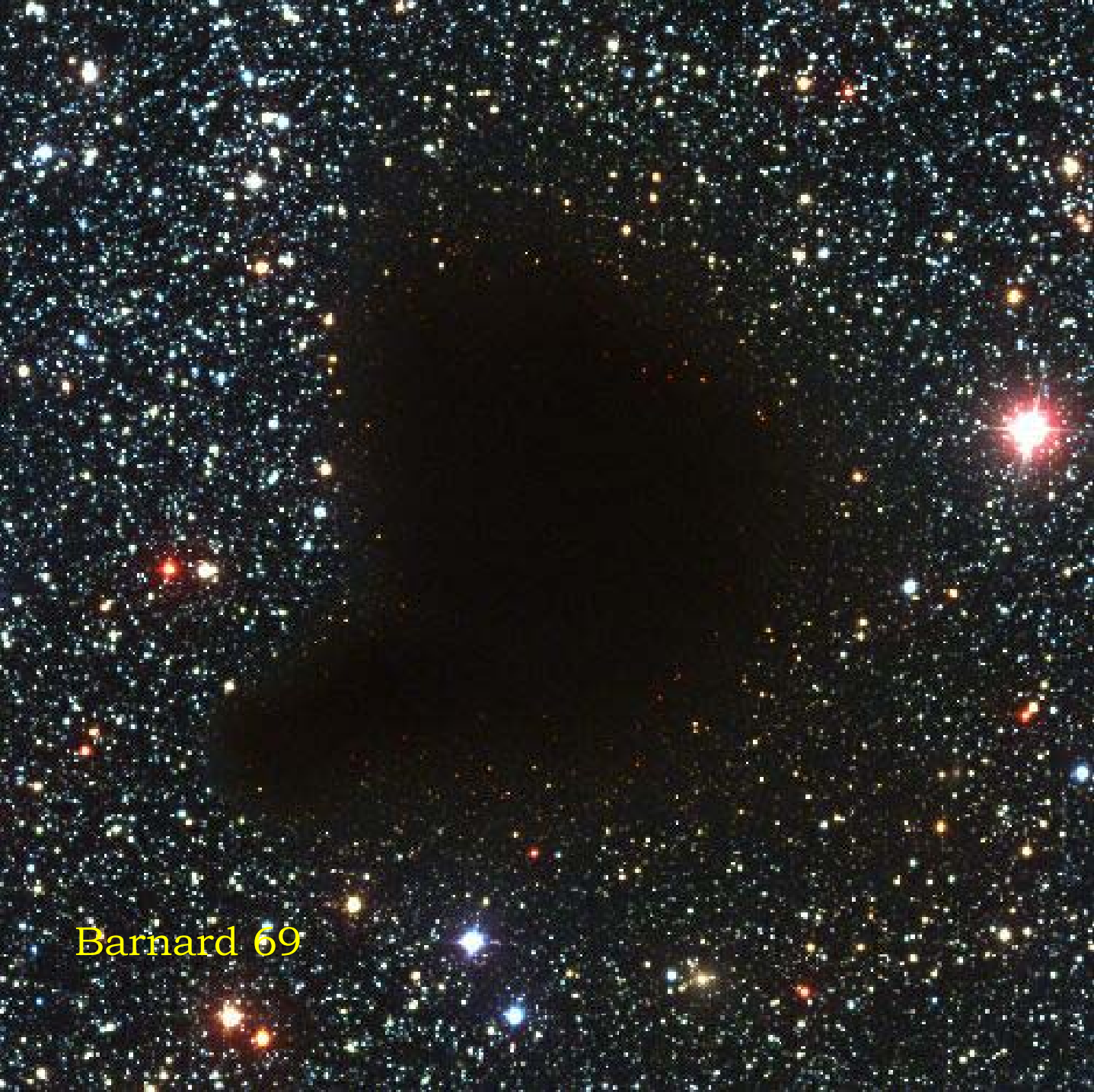
- Nuvens moleculares - SFR



4. Região milimétrica, frequência 115 GHz. Fonte:  
Nuvens frias de CO revelando a presença de  
hidrogênio molecular.



Orion



Barnard 69

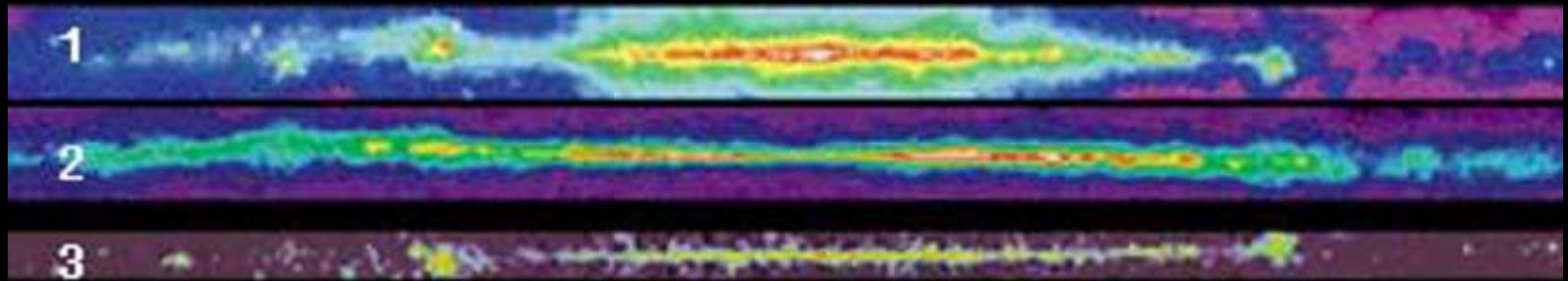
## COLAPSO GRAVITACIONAL FORMAÇÃO DE ESTRELAS

A MASSA DE JEANS

$$M_J \simeq 1,4 \times 10^{-10} \frac{T^{3/2}}{\mu^{3/2} \rho^{1/2}} ,$$



- Nuvens de H neutro

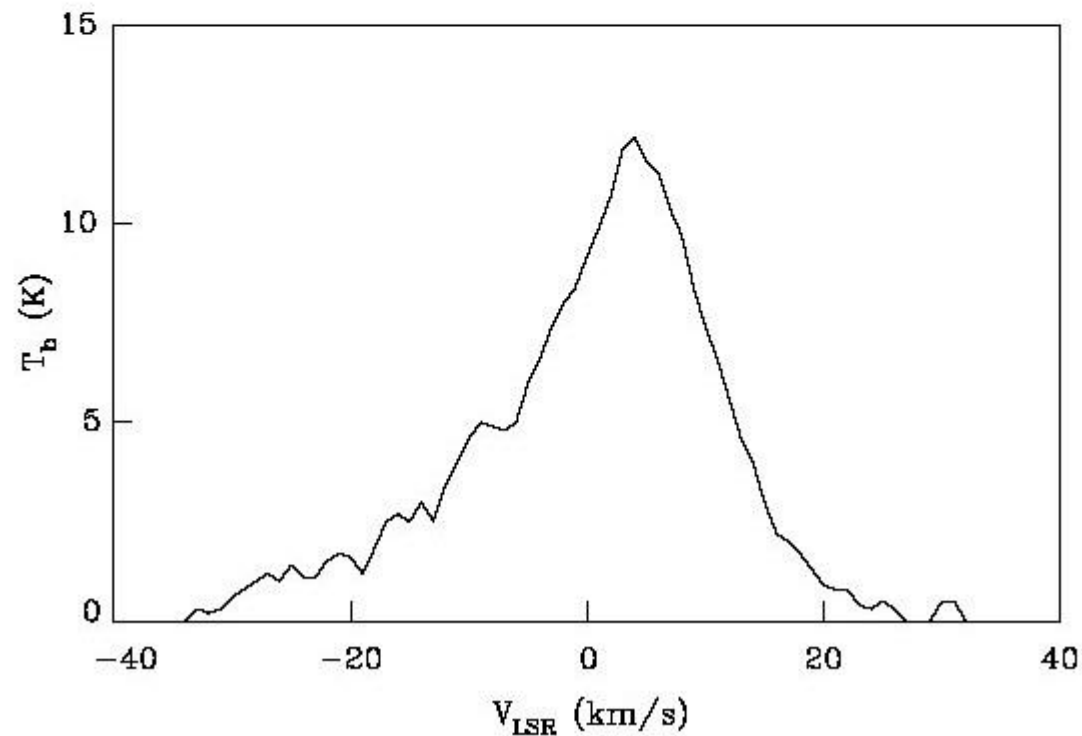


1. Contínuo em rádio, frequência 408 MHz, comprimento de onda 73 cm. Fonte: Elétrons de alta energia, especialmente em restos de supernovas. A emissão é mais intensa no plano galáctico (vermelho), pelos elétrons relativísticos que giram em torno das linhas do campo magnético interestelar (processo síncrotron). Estende-se também para latitudes galácticas mais altas (amarelo e verde), apresentando anéis (loops) e filamentos. Há também emissão difusa isotrópica e a presença de fontes discretas, geralmente extragalácticas.
2. Faixa rádio,  $\lambda = 21$  cm, frequência 1420 MHz. Fonte: Hidrogênio atômico neutro em nuvens interestelares e no gás difuso.
3. Contínuo em rádio, frequência 2.4 a 2.7 GHz. Fonte: Gás ionizado quente e elétrons de alta energia.

## A LINHA DE 21 CM DO H EM EMISSÃO

$$N(\text{HI}) = 1,8 \times 10^{18} \int T_b(v) \left[ \frac{\tau_{\nu r}}{1 - e^{-\tau_{\nu r}}} \right] dv$$

$$N(\text{HI}) = 1,8 \times 10^{18} \int T_b(v) dv$$



## PERFIL DE UMA LINHA ESPECTRAL

### PERFIL DOPPLER

$$\phi(\Delta\nu) = \frac{1}{\sqrt{\pi} \Delta\nu_D} e^{-(\Delta\nu/\Delta\nu_D)^2}$$

$$\Delta\nu_D = b \frac{\nu_{jk}}{c} = \frac{b}{\lambda_{jk}}$$

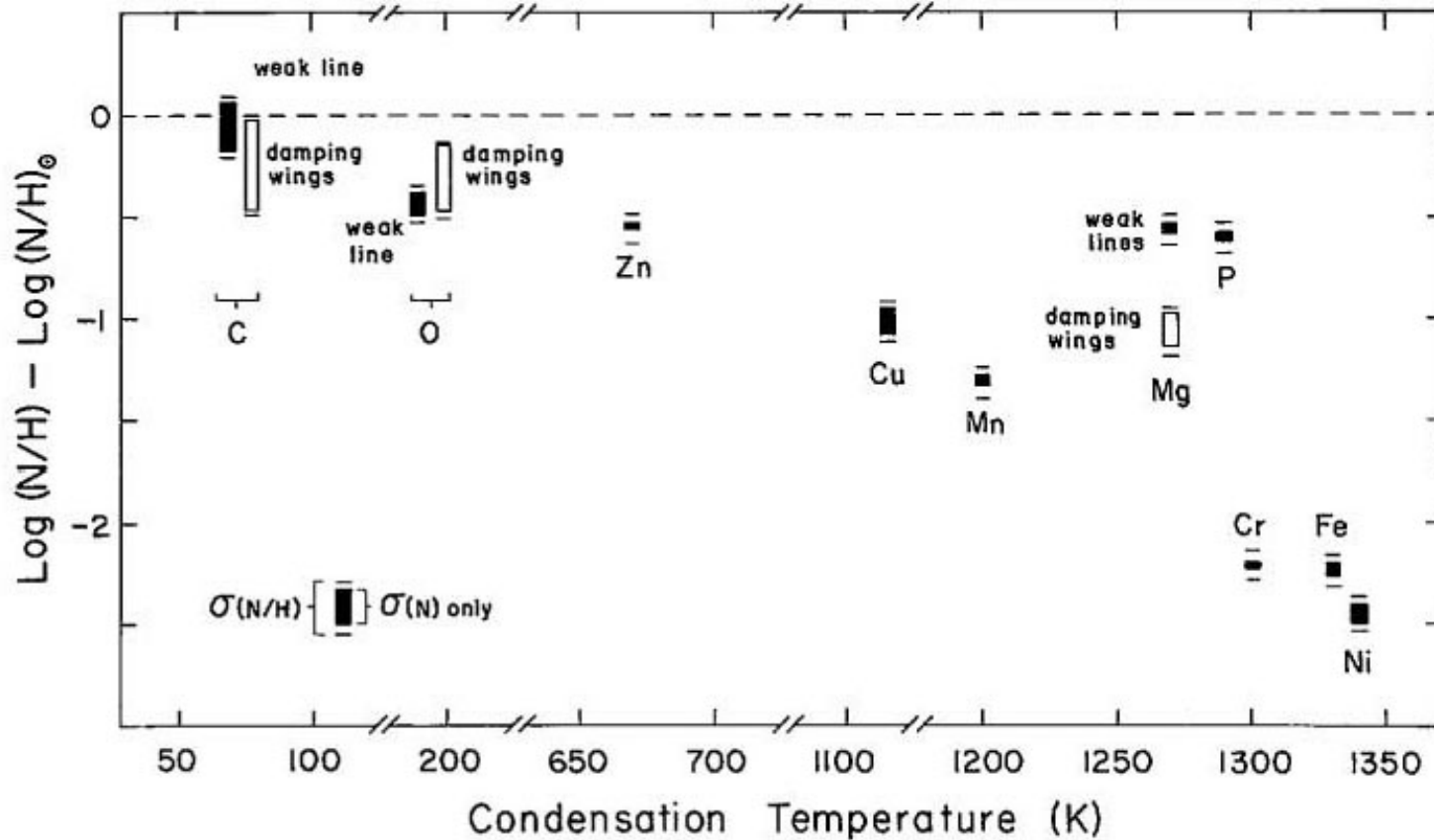
$$b = \left( \frac{2kT}{m} \right)^{1/2}$$

### PERFIL DE LORENTZ

$$\phi(\Delta\nu) = \frac{\Gamma_k/4\pi^2}{(\nu - \nu_{jk})^2 + (\Gamma_k/4\pi)^2}$$

$$\Gamma_k = \sum_j A_{kj}$$

# ABUNDÂNCIAS



Cardelli et al. (1991)



## A TEMPERATURA DE EQUILÍBRIO

A FUNÇÃO AQUECIMENTO

A FUNÇÃO RESFRIAMENTO

$$\Gamma = \sum_{\xi\eta} \Gamma_{\xi\eta}$$

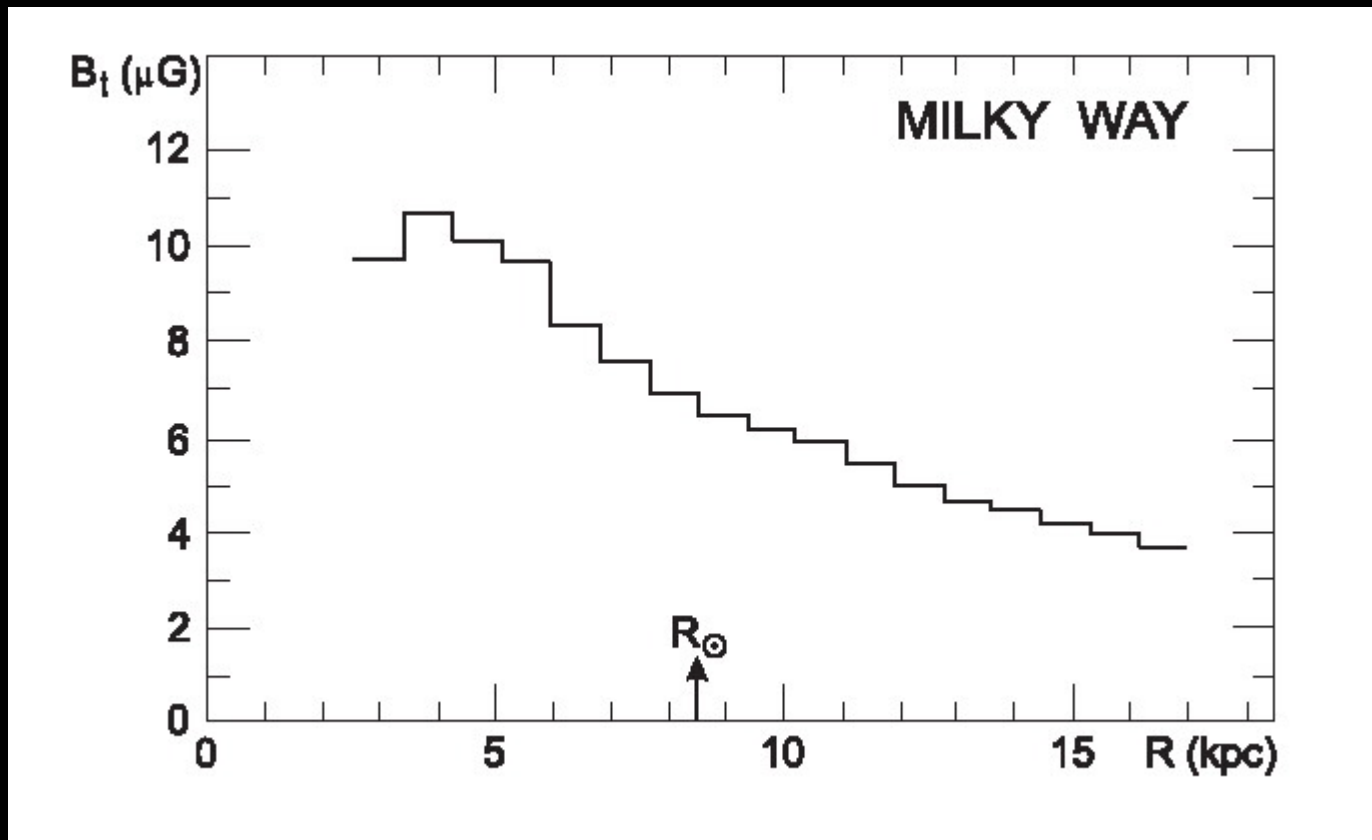
$$\Lambda = \sum_{\xi\eta} \Lambda_{\xi\eta}$$

$$\Delta = \Gamma - \Lambda = \sum_{\xi\eta} (\Gamma_{\xi\eta} - \Lambda_{\xi\eta})$$

$$\Delta = 0 \quad \text{ou} \quad \Gamma = \Lambda$$

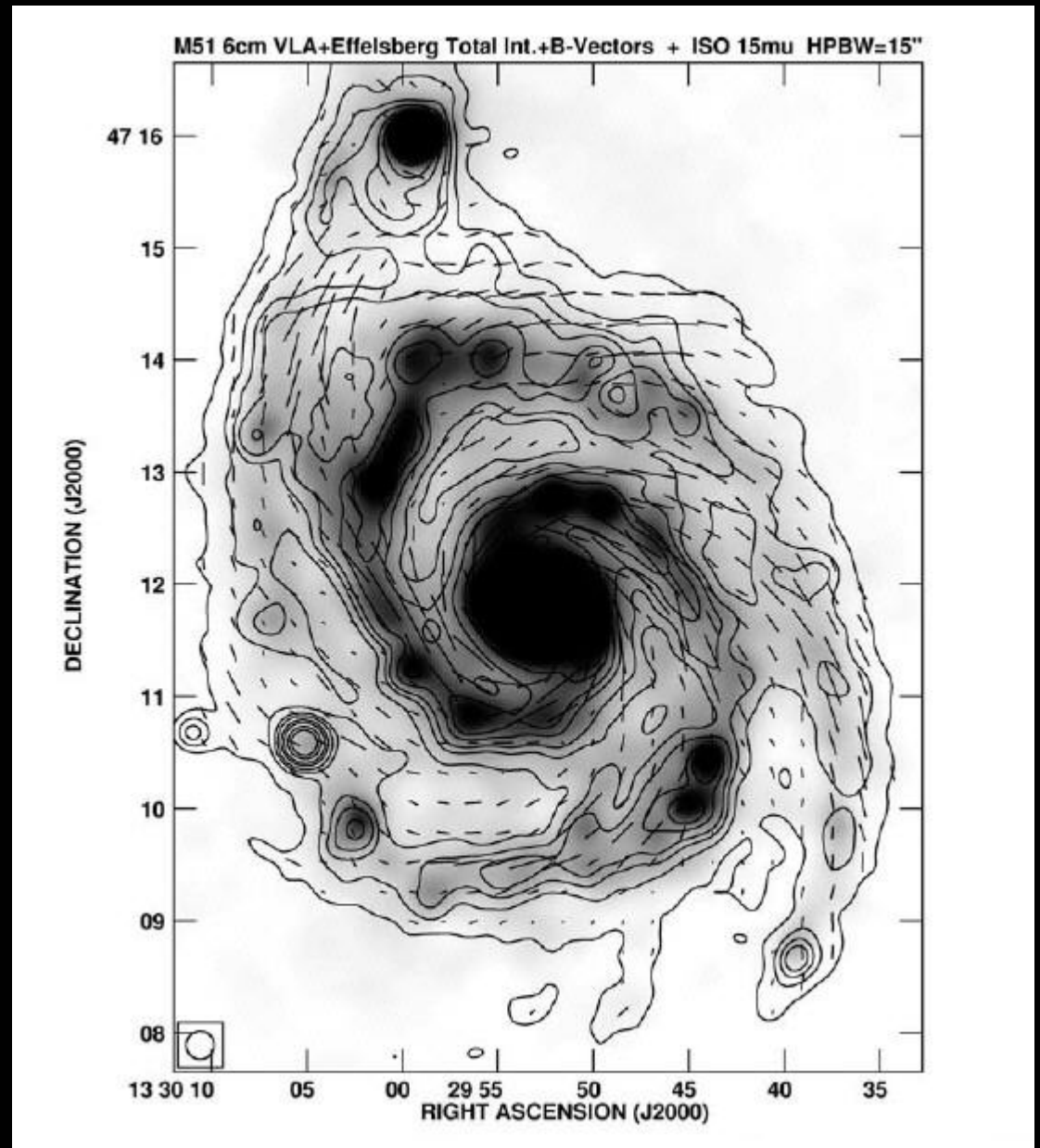
- Campo magnético

# Galáxia: Campo magnético



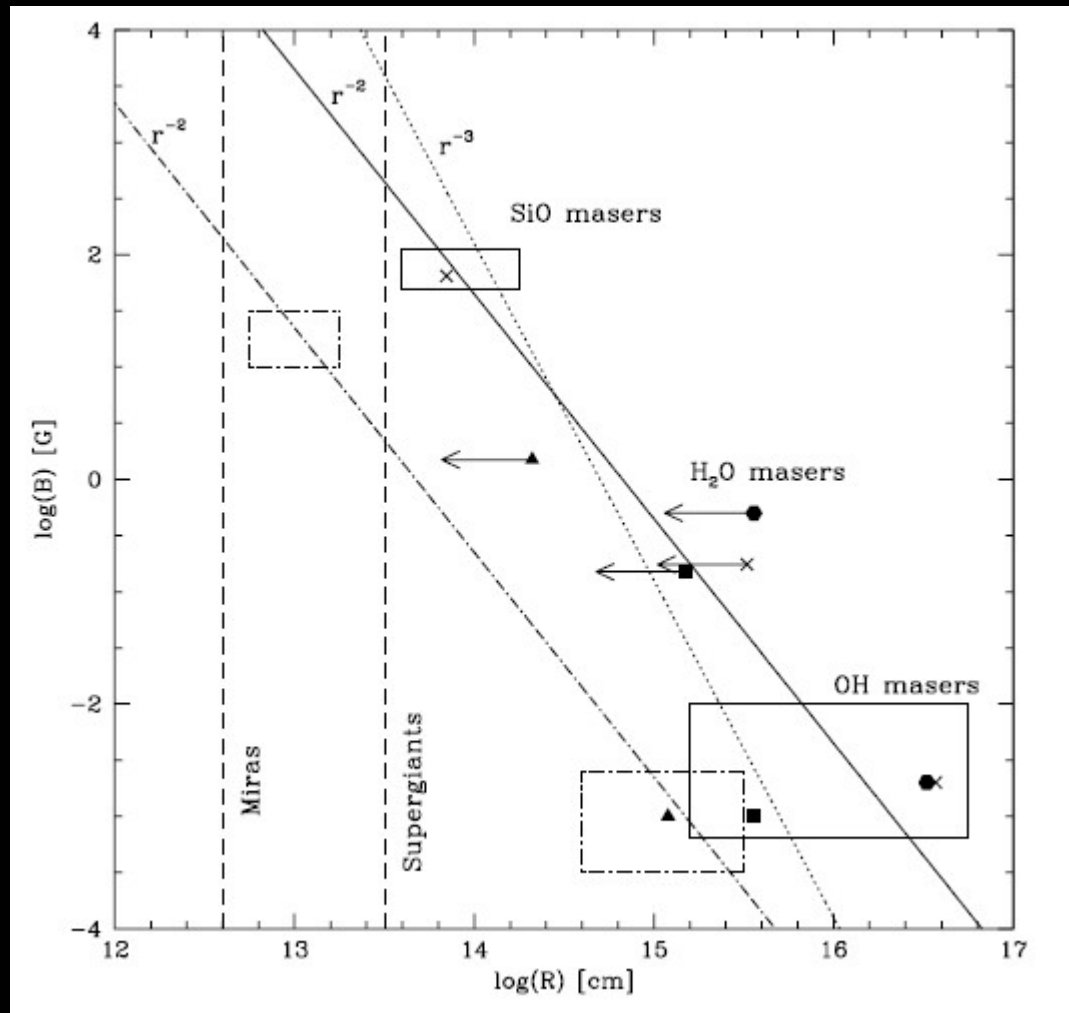
# M51

## Campo magnético



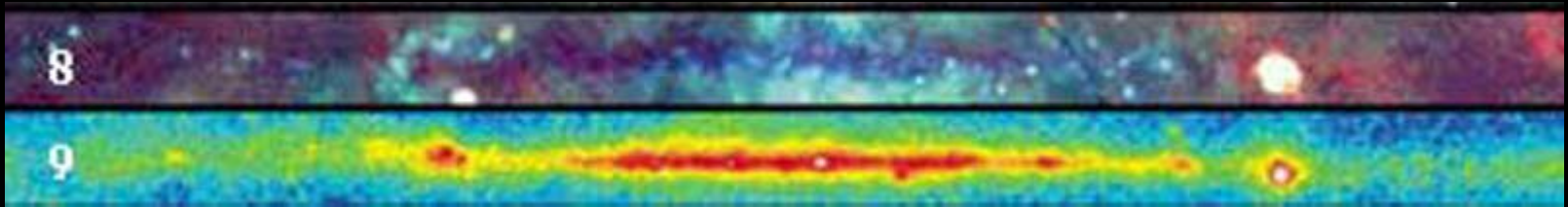
Campo  
magnético

Vlemmings





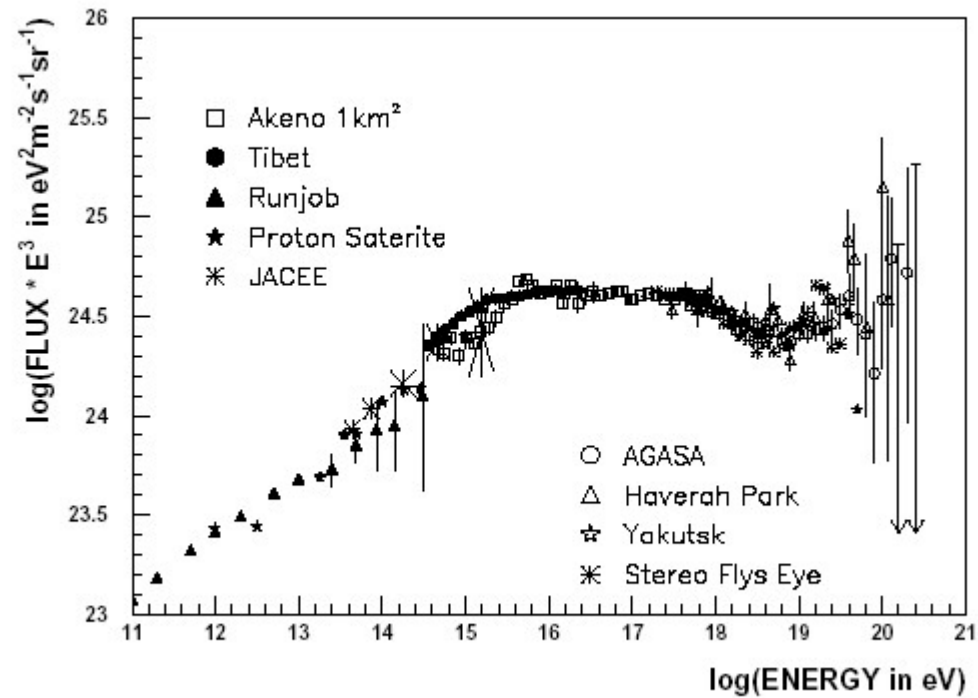
- Gás coronal, meio internuvens



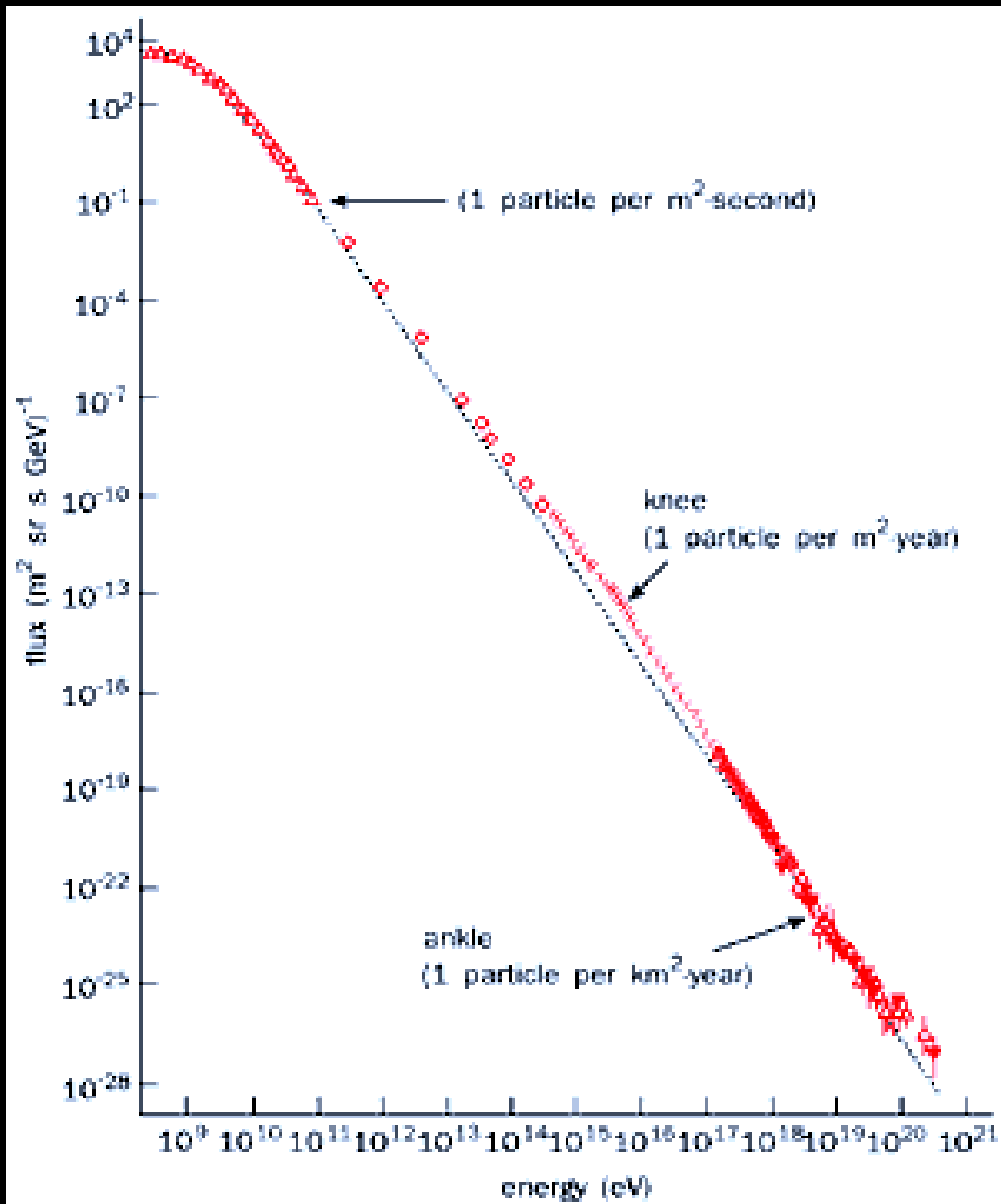
8. Raios X, energias de 0.25 a 1.5 keV. Fonte: Gás quente, produto de choques em explosões de supernovas.
9. Raios gama, energias acima de 300 MeV. Fonte: fenômenos de alta energia, como pulsares e colisões de raios cósmicos. A emissão associada ao plano galáctico é produzida pelo gás interestelar difuso, possivelmente devida ao decaimento de píons gerados em colisões entre raios cósmicos e o gás interestelar. Fontes discretas como pulsares e quasares são também observadas.

- Raios cósmicos









## 5. LIMITE DE OORT

## O LIMITE DE OORT

A determinação da aceleração gravitacional  $g_z$  na direção  $z$ , perpendicular ao disco, fornece uma estimativa da massa total na vizinhança solar.

A determinação de  $g_z$  é feita utilizando-se medidas da velocidade  $v_z$  e do gradiente de densidade na direção  $z$  de grupos de estrelas homogêneos e suficientemente brilhantes.

Vamos considerar um disco galáctico unidimensional, ficando apenas com os movimentos na direção  $z$ , perpendicular ao plano.

No estacionário, podemos definir uma função de distribuição  $f(z, p_z) dp_z dV$ , ou seja, o número de estrelas no volume  $dV$  com quantidades de movimento entre  $p_z$  e  $p_z + dp_z$ .

Aplicando o *teorema de Liouville*, em um conjunto de massas pontuais movendo-se sem dissipação em um campo de potencial, a densidade  $f$  dos pontos no espaço de fase é constante ao longo de uma trajetória dinâmica.

## O LIMITE DE OORT

$$g_z = -\frac{d\phi}{dz}$$

$$n = \int_{-\infty}^{\infty} f(z, p_z) dp_z$$

$$\frac{1}{n} \frac{d(n\langle v_z^2 \rangle)}{dz} = g_z$$

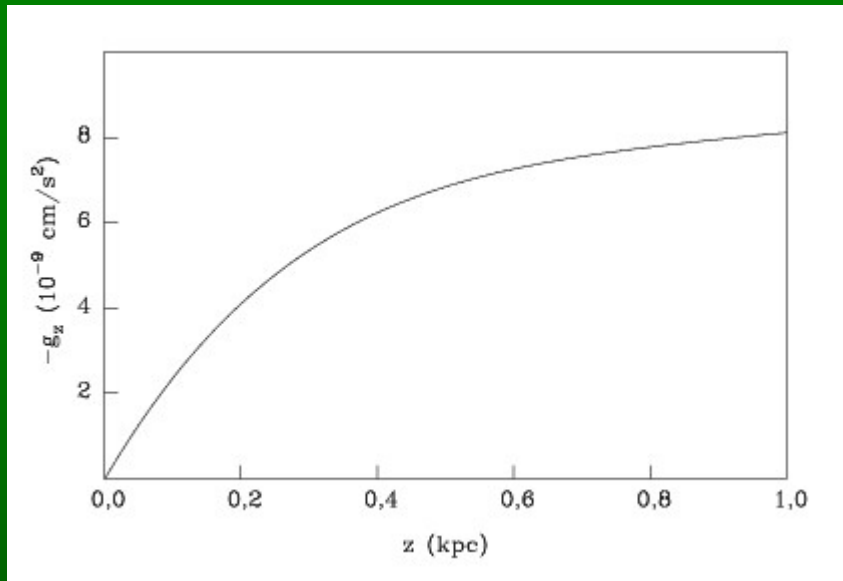
$$\nabla^2 \phi = \frac{d^2 \phi}{dz^2} = 4\pi G \rho(z)$$

$$\rho(z) = -\frac{1}{4\pi G} \frac{dg_z}{dz}$$

Por meio das observações das velocidades  $v_z$  e densidades  $n$  de grupos homogêneos de estrelas, admitidas com a mesma massa, podemos determinar  $g_z$  em função de  $z$  por (1.9) e a densidade de massa total  $\rho(z)$  por (1.11). Isto foi feito por Oort para um grupo de gigantes de tipo espectral K. As primeiras análises de Oort datam de 1932, mas o trabalho na forma final é de 1960. A função  $g_z$  obtida por Oort para a vizinhança solar está mostrada na figura 1.2.

Para o plano galáctico,  $z = 0$  e a densidade de massa total é  $\rho_t \simeq 10 \times 10^{-24} \text{ g/cm}^3 = 0,15 M_\odot/\text{pc}^3$ , onde  $M_\odot = 1,99 \times 10^{33} \text{ g}$  é a massa solar. A parte deste material relativa às estrelas é conhecida independentemente, sendo  $\rho_* \simeq 4 \times 10^{-24} \text{ g/cm}^3 = 0,06 M_\odot/\text{pc}^3$ . Portanto, a densidade total da matéria interestelar na vizinhança solar deve ser  $\rho_{mi} \lesssim 6 \times 10^{-24} \text{ g/cm}^3 = 0,09 M_\odot/\text{pc}^3$ . Isto corresponde a 2,6 átomos de H por centímetro cúbico, adotando-se uma abundância He/H = 0,1 por número de átomos. Este limite é conhecido como o *limite de Oort*. Naturalmente, este valor está sujeito a incertezas, não só devido a deficiências observacionais como também a aproximações no processo de cálculo. Entretanto, trabalhos mais recentes produzem essencialmente os mesmos resultados.





plano galáctico

$$\rho_t \simeq 10 \times 10^{-24} \text{ g/cm}^3 = 0,15 M_\odot/\text{pc}^3$$

estrelas

$$\rho_* \simeq 4 \times 10^{-24} \text{ g/cm}^3 = 0,06 M_\odot/\text{pc}^3$$

interestelar

$$\begin{aligned} \rho_{mi} &\lesssim 6 \times 10^{-24} \text{ g/cm}^3 = 0,09 M_\odot/\text{pc}^3 \\ &= 2,6 \text{ átomos de H/cm}^3 \end{aligned}$$

# 6. EQUILÍBRIO NO MEIO INTERESTELAR

## EQUILÍBRIO NO MEIO INTERESTELAR

Região	$n$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$T$ (K)	$P$ ( $\text{dina}/\text{cm}^2$ )
nuvens difusas	10	100	$10^{-13}$
nuvens moleculares densas	$10^4$	$<100$	$10^{-11}$
meio internuvens	$10^{-1}$	$10^4$	$10^{-13}$
regiões de H ionizado	$10^2$	$10^4$	$10^{-10}$
gás coronal	$10^{-2}$	$10^5$	$10^{-13}$

## 7. PARA SABER MAIS

CURSO:  
MEIO INTERESTELAR  
AGA 5714

homepage:

<http://www.astro.iag.usp.br/~maciel/aga5714>



## **PROGRAMA DO CURSO**

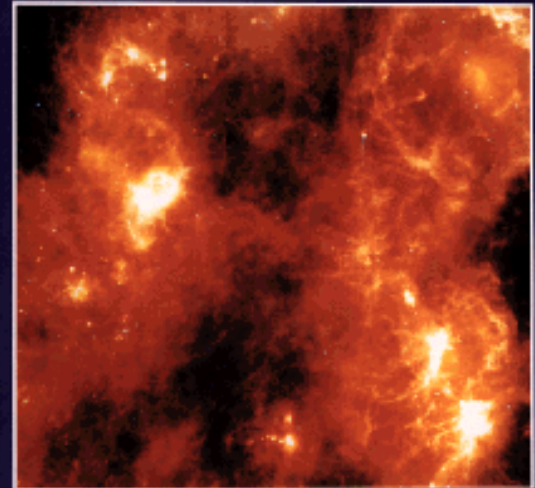
1. VISÃO GERAL DO MEIO INTERESTELAR
2. O CAMPO DE RADIAÇÃO INTERESTELAR
3. FORMAÇÃO DE LINHAS ESPECTRAIS
4. LINHAS DE EMISSÃO E ABSORÇÃO INTERESTELARES
5. EXCITAÇÃO NO MEIO INTERESTELAR
6. IONIZAÇÃO NO MEIO INTERESTELAR
7. AQUECIMENTO DO GÁS INTERESTELAR
8. NEBULOSAS IONIZADAS INTERESTELARES
9. GRÃOS INTERESTELARES
10. MOLÉCULAS INTERESTELARES
11. DINÂMICA E EQUILÍBRIO NO MEIO INTERESTELAR

# BIBLIOGRAFIA

The fulness of space  
Gareth Wynn-Williams  
CUP, 1992

# The Fullness of Space

nebulae, stardust, and the interstellar medium

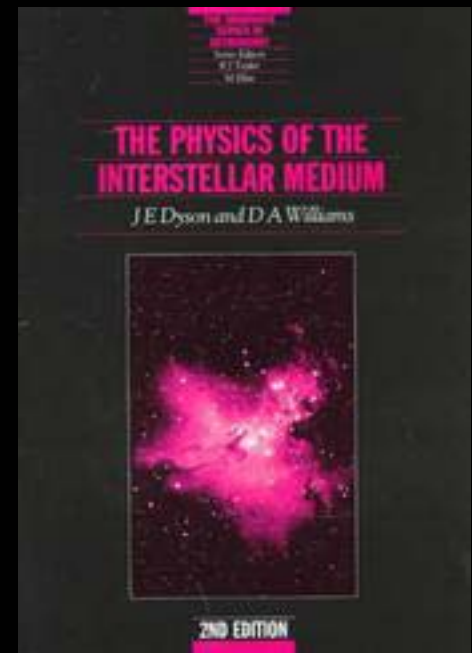
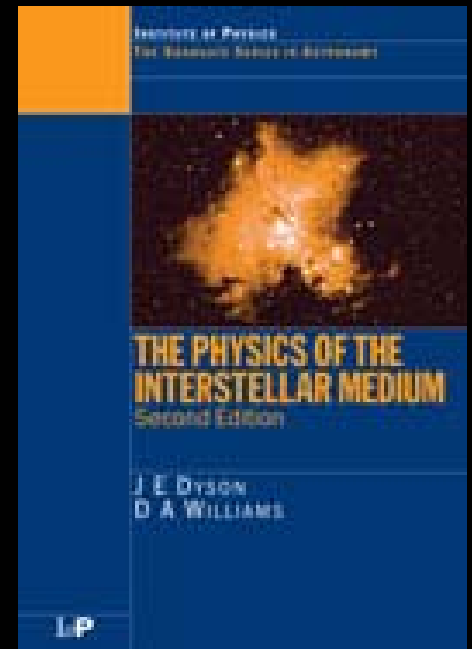


Gareth Wynn-Williams

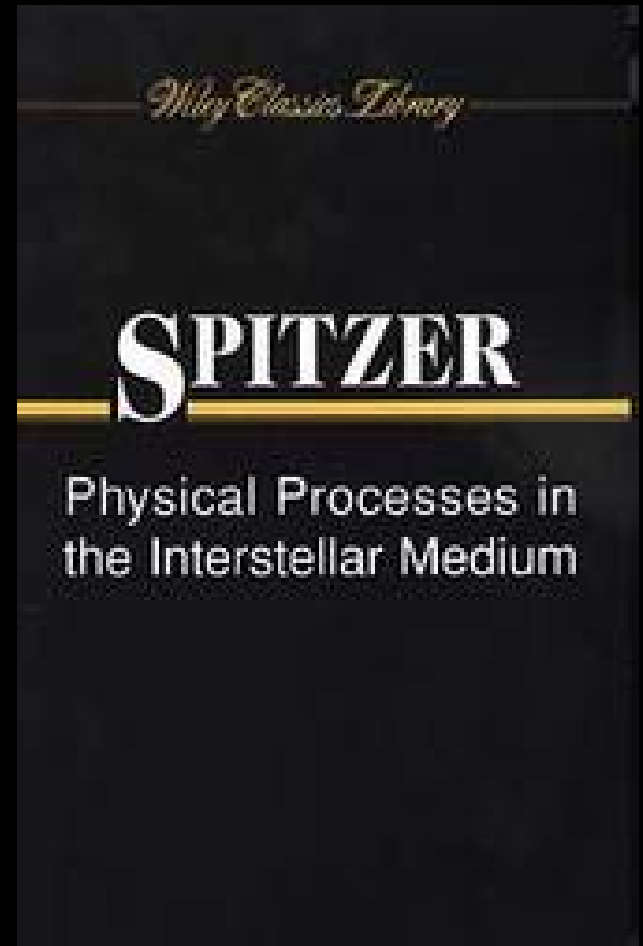
# The physics of the interstellar medium

J. E. Dyson, D. A. Williams

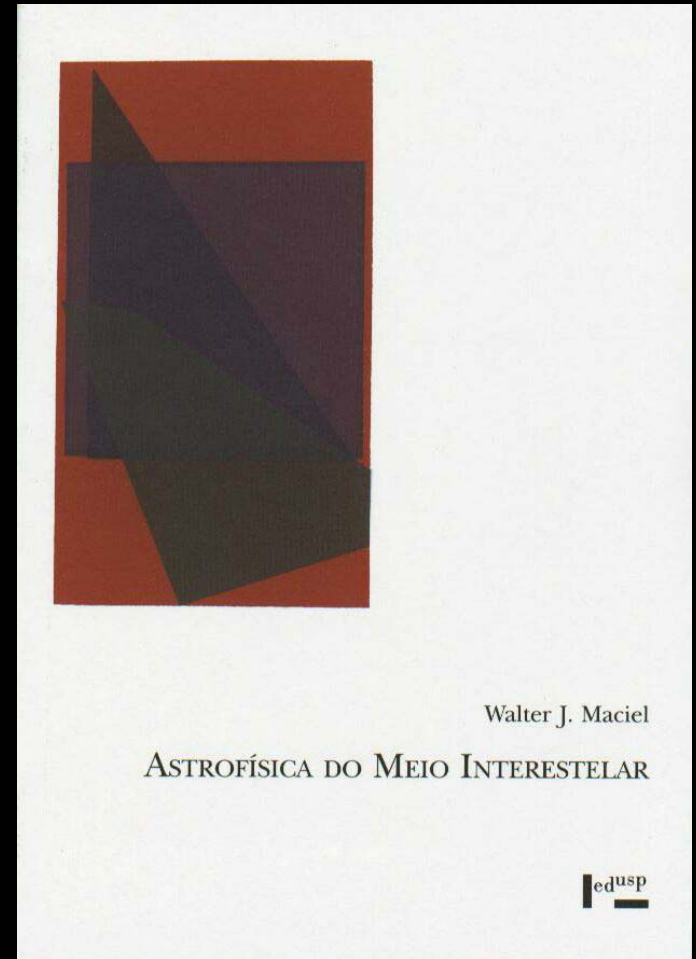
IOP, 1997



Physical processes in the  
interstellar medium  
Lyman Spitzer Jr.  
Wiley, 1978 [student edition 1998]



Astrofísica do Meio Interestelar  
Walter J. Maciel  
Edusp, 2003

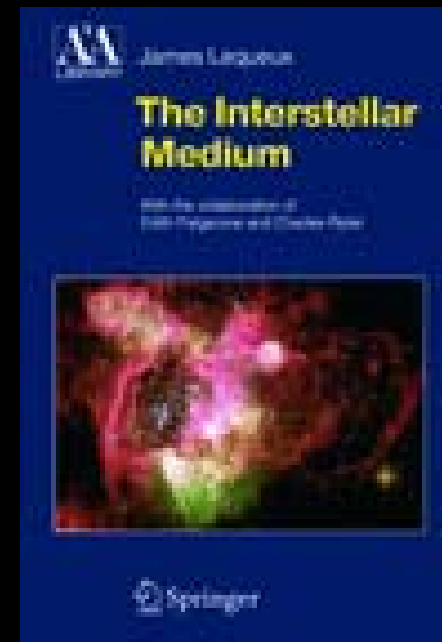




Le milieu interstellaire  
J. Lequeux  
EDP, 2002



The interstellar medium  
J. Lequeux  
Springer, 2004



Astrophysics of the diffuse  
universe

Michael A. Dopita,  
Ralph S. Sutherland  
Springer, 2003



Michael A. Dopita  
Ralph S. Sutherland

**Astrophysics  
of the  
Diffuse Universe**



Springer

# Annual Review of Astronomy and Astrophysics

Ver lista de artigos em:

<http://www.astro.iag.usp.br/~maciel/aga5714>





FIM