



Universidade Federal do ABC

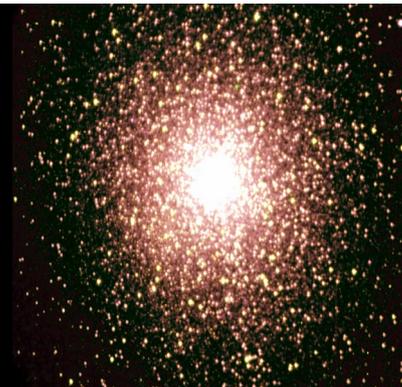
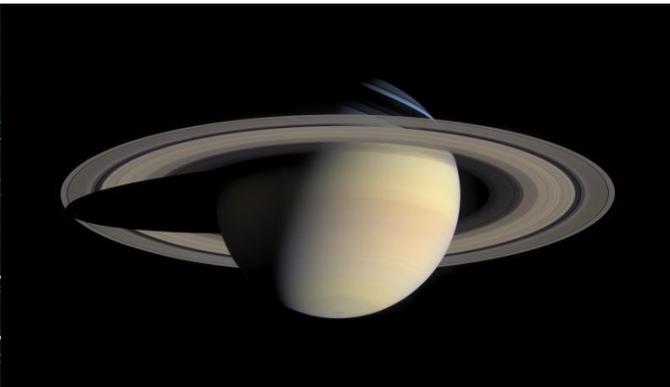
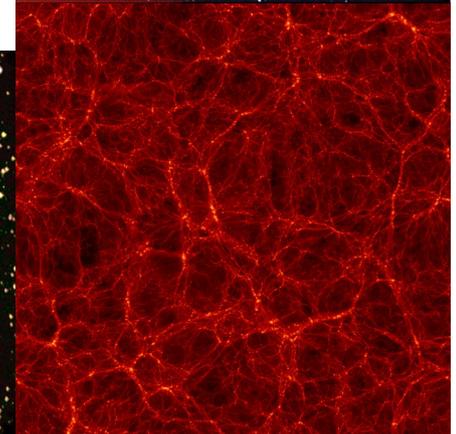
# Noções de Astronomia e Cosmologia

## 11. A Via Láctea.

Prof. Pieter Westera

[pieter.westera@ufabc.edu.br](mailto:pieter.westera@ufabc.edu.br)

<http://professor.ufabc.edu.br/~pieter.westera/Astro.html>



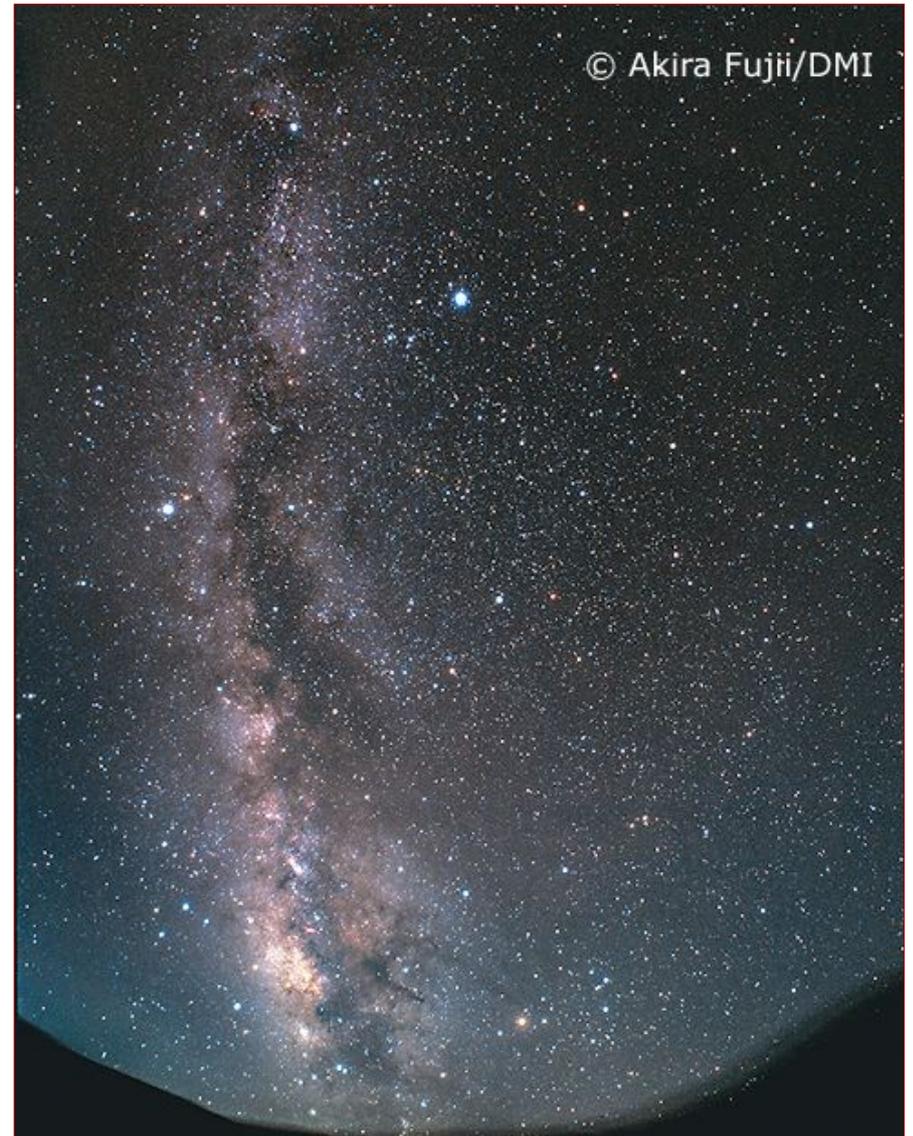
# Via Láctea

Originalmente: Uma **faixa** de luz difusa no céu.

Na mitologia grega leite materna da deusa Hera jorrado no céu, quando esta deu um empurrão ao menino mortal Heracles.

Galileu descobriu em 1610 que ela consiste de **estrelas**.

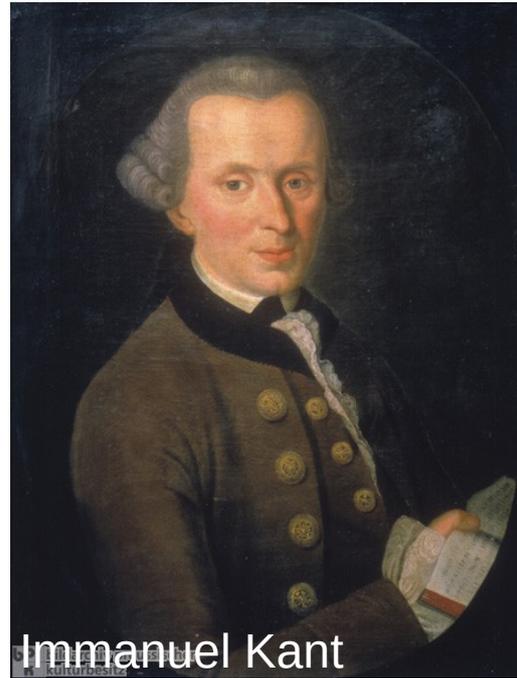
Hoje é a **nossa Galáxia** (com G maiúsculo) e o **Sistema Solar** faz **parte**.



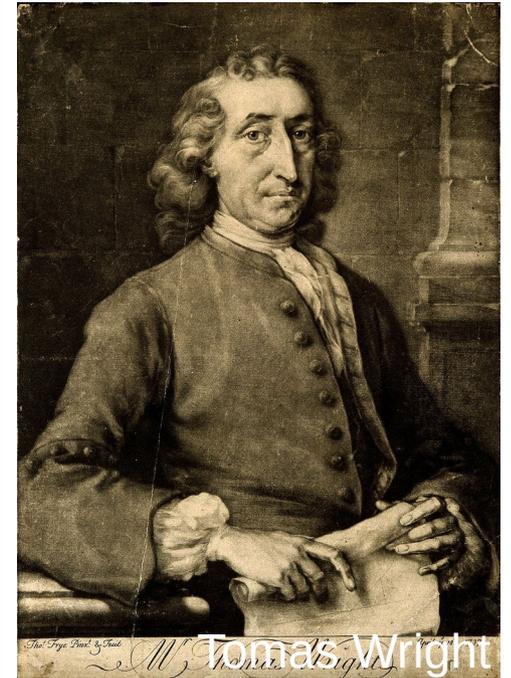
# Via Láctea

Até o começo do XX século, a Via Láctea era considerada o **Universo inteiro** (por muitos).

No **18º século**, **Immanuel Kant** propôs que ela fosse um **disco de estrelas**, e que o **Sistema Solar** fizesse **parte**, e **Tomas Wright** sugeriu que ela fosse uma **casca esférica** de estrelas.

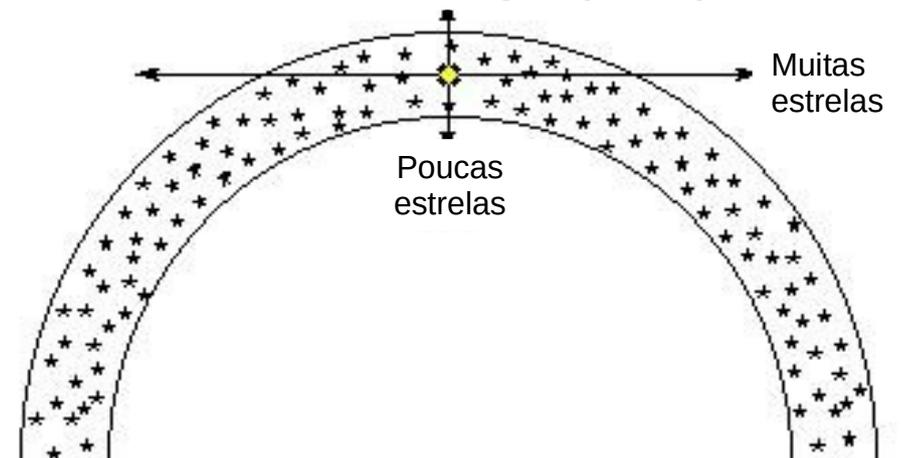


Immanuel Kant



Thomas Wright

Via Láctea de Wright (1750)



# Via Láctea

Nos **anos 1780**, **William Herschel** produziu um **mapa** da Via Láctea baseado em **contagens de estrelas**, e supondo **magnitude absoluta igual** para todas as estrelas, **densidade de estrelas constante**, **nenhuma extinção** interestelar (na verdade, uma suposição demais), e **visão até o limite** da Galáxia.

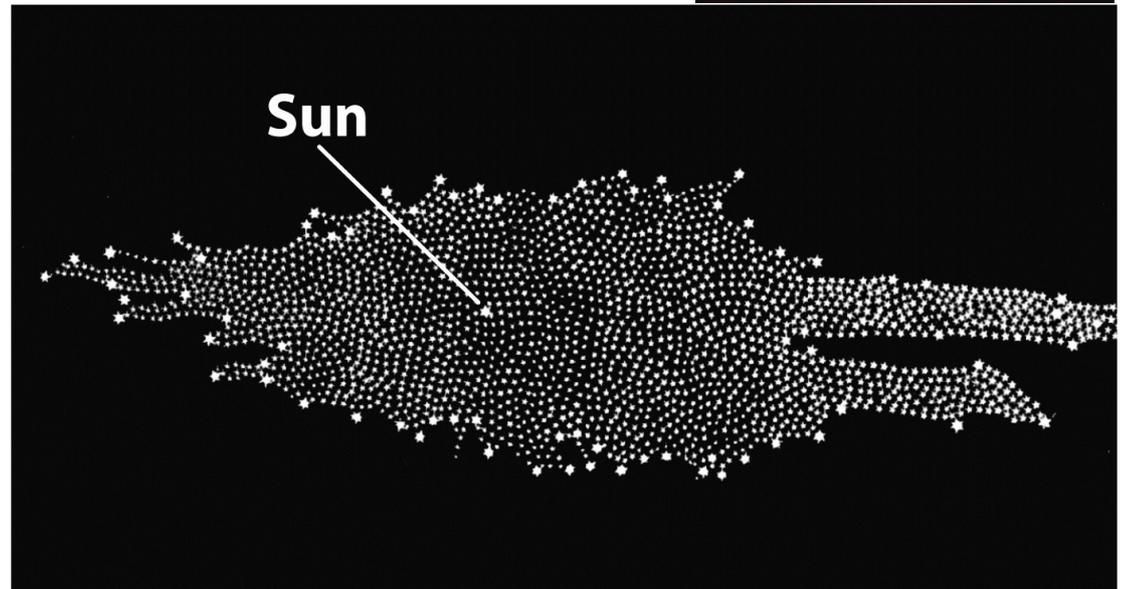


Figure 23-2  
Universe, Eighth Edition  
© 2008 W.H. Freeman and Company

Mapa da Via Láctea de William Herschel

# Via Láctea

Em 1922, **Jacobus Kapteyn**, fazendo suposições mais realistas quanto às magnitudes absolutas, chegou num **modelo** da Via Láctea **similar** àquele do **Herschel**, um **esferóide achatado** com densidade de estrelas diminuindo com a distância do centro.

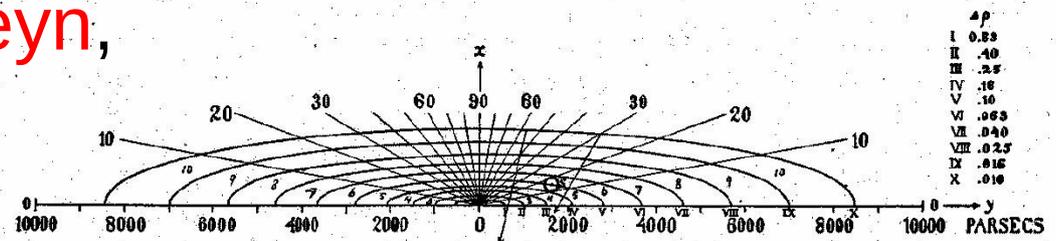


FIG. I  
O Universo de Kapteyn, as elipses são superfícies de densidade estelar constante

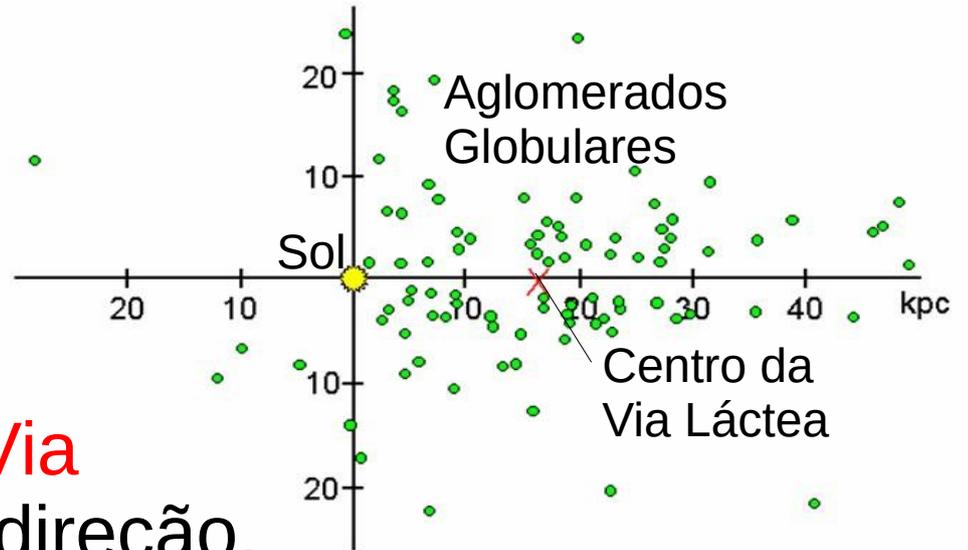
Em ambos os modelos, o **Sol** fica perto do **centro**, por que ambos não levaram em conta a **extinção inter-estelar** (=> aula Matéria Interestelar), que faz que a **distância de vista** é **comparável** em **todas as direções** no **disco**, onde fica a **poeira**.

# Via Láctea

Pouco antes, **Harlow Shapley** tinha encontrado que a **distribuição de Aglomerados Globulares é centrada** na região da constelação **Sagitário**.

Ele concluiu que o **centro da Via Láctea** deveria estar naquela direção, a uns 15 kpc do Sol (quase duas vezes o valor atual), e que o diâmetro deve ser da ordem de 100 kpc (também quase duas vezes o tamanho atual).

Shapley's Globular Cluster Distribution



# Via Láctea

Ambas a subestimação do tamanho da Via Láctea de Kapteyn e a sobreestimação de Shapley eram devidas à **extinção interestelar** (=> aula Matéria Interestelar).

No caso de **Kapteyn**, ela **limitou** a **distância de visão** (observações dentro do disco, onde a extinção é forte).

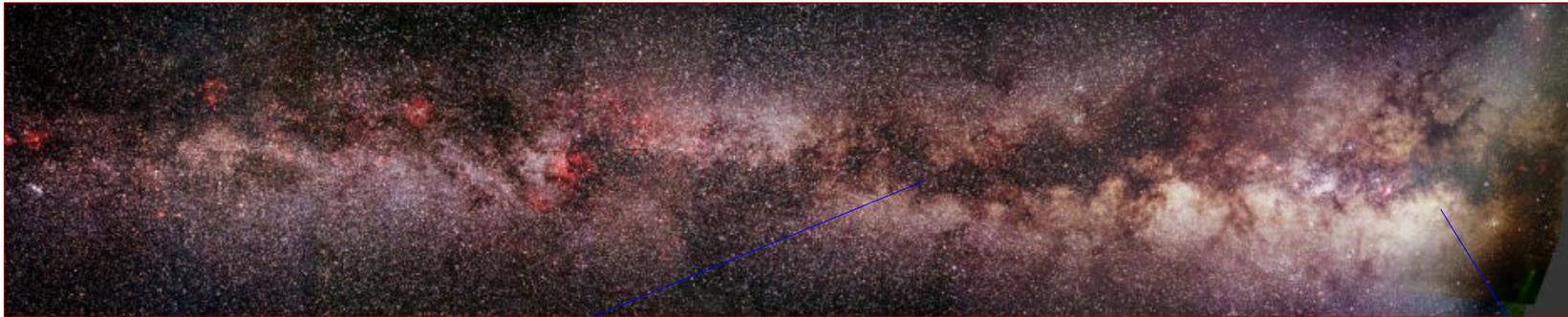
No caso de **Shapley**, ela levou a **erros** na **calibração** período-luminosidade das **estrelas variáveis** usadas como **velas padrão** para determinar a distância aos aglomerados, assim **superestimando** estas distâncias.

O papel da poeira só ficou bem estabelecido no início da década de 1930.

# A Morfologia da Via Láctea

O fato de nos encontrarmos no **Disco** **dificulta** a determinação da estrutura por dois motivos:

- motivos **geométricos** (e difícil determinar a estrutura de um disco, se você está dentro dele)



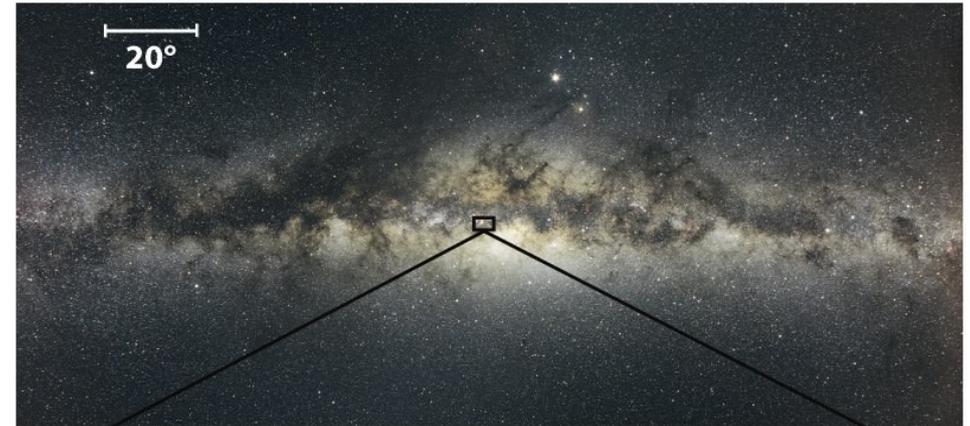
- O disco de **poeira** (=> aula Matéria Interestelar), bloqueando nossa vista em direções dentro do Disco. Isto também afeta outras observações astronômicas (i.e. extragal.) => **Zona vazia** (ingl. *zone of avoidance*) Em algumas regiões tem menos poeira, i. e. *Baade's Window*, permitindo uma observação menos obstruída das regiões centrais da Via Láctea.

# Via Láctea

É melhor observar no **infravermelho**, onde a poeira é **menos opaca**.

Ao lado: O Centro Galáctico no infravermelho.

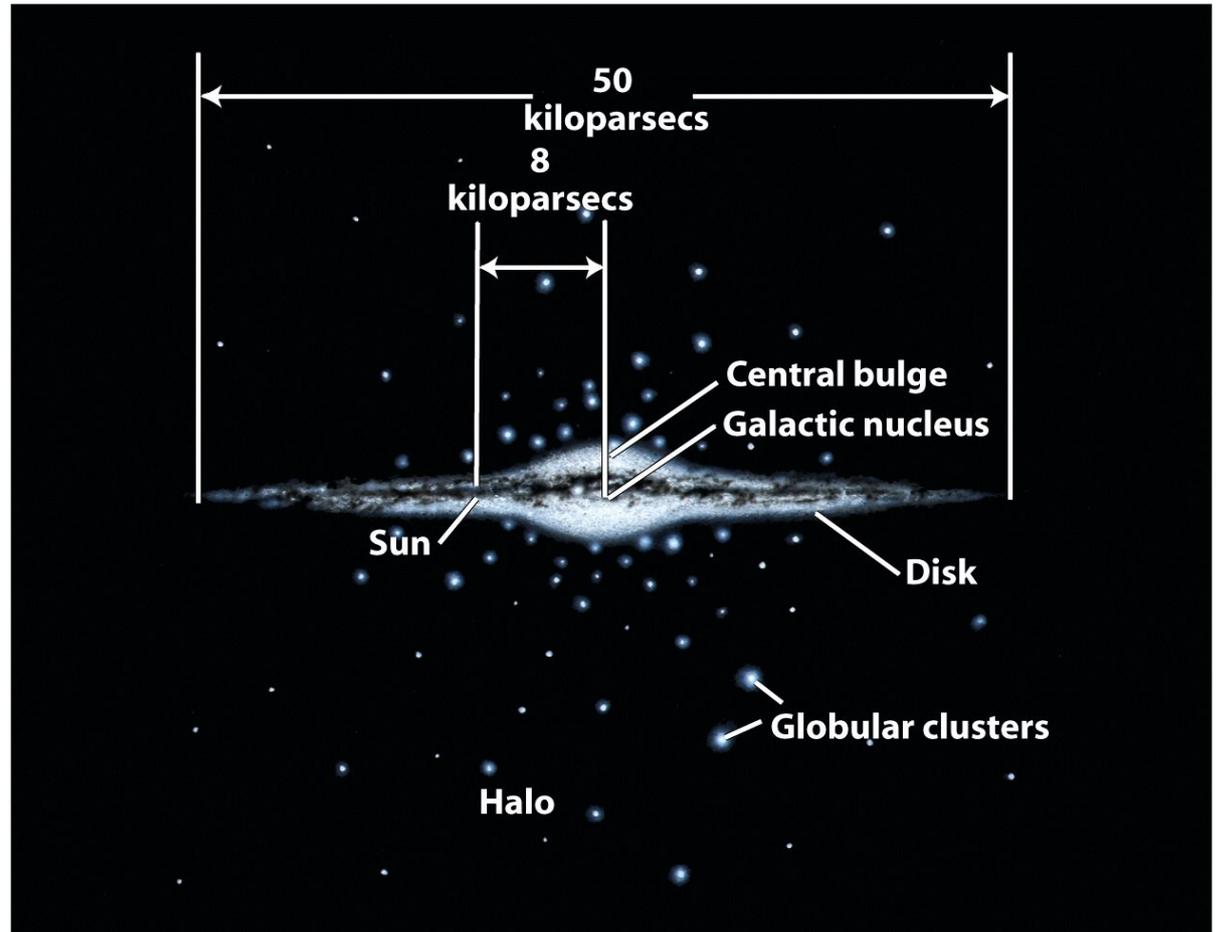
(Outro jeito: esperar 15 mio. anos, quando o Sol estará a 85 pc “em cima” do plano central e, então, fora do disco de poeira)



# A Morfologia da Via Láctea

Usando os dados disponíveis hoje, o **modelo atual** da **Galáxia** afirma que ela consiste de:

- o **Disco**, contendo maioria das **estrelas** (entre elas o Sol), **gás** e **poeira**.
- o **Bojo** (ou bulbo) Central, contendo **estrelas, gás** e **poeira**.
- o **Halo Estelar**, contendo **estrelas**, i. e. os **aglomerados globulares** do Shapley.
- o **Halo** de **Matéria Escura**
- o **Núcleo**, contendo um **Buraco Negro supermaciço**.



# Populações Estelares

Que tipo de **estrelas** tem em **cada componente** da Via Láctea?

É útil introduzir o conceito de **Populações Estelares**, termo inventado por **Walter Baade**.

Em 1944, usando o Telescópio de 2.5 m de Mt. Wilson, ele observou a **Galáxia** e a de **Andrômeda** (M31), e identificou **duas** “**populações**” estelares.



Galáxia de Andrômeda

# Populações Estelares

Ele chamou de **População I** estrelas típicas para a **vizinhança solar** (estrelas "normais"):

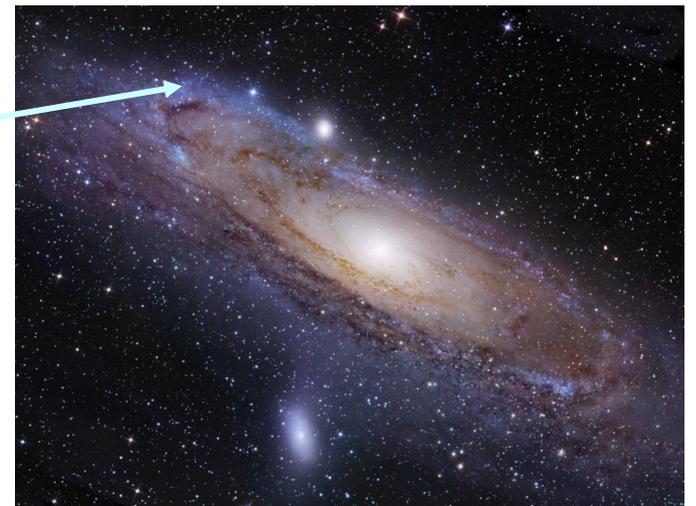
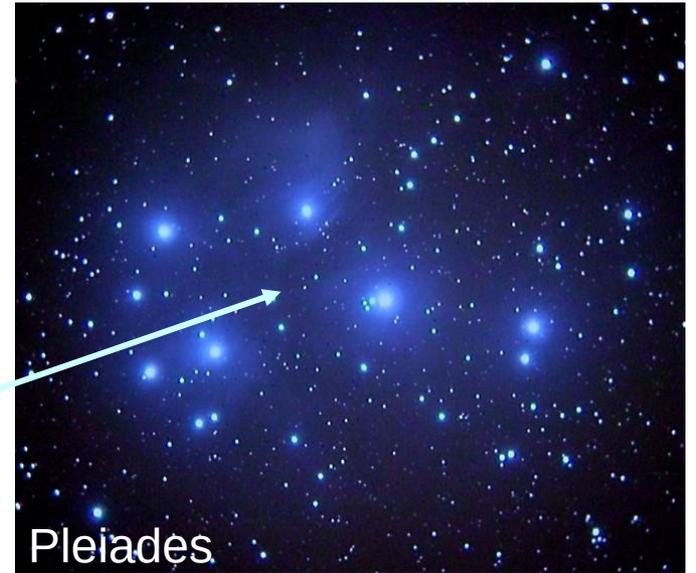
Estrelas **OB azuis**, **Novas**, **Nebolusas Planetárias**.

Estas também se encontram em **Aglomerados Abertas**,

no **Meio Interestelar**

e nos **Braços Espirais** de M31:

Estrelas de **alta metalicidade** ( $Z > \sim 0.003$ , resp.  $[Fe/H] > \sim -0.7$ ) e frequentemente **jovens**.



# Populações Estelares

Ele batizou como **População II**:  
Na **Via Láctea**, as  
“estrelas de alta velocidade” (Halo)

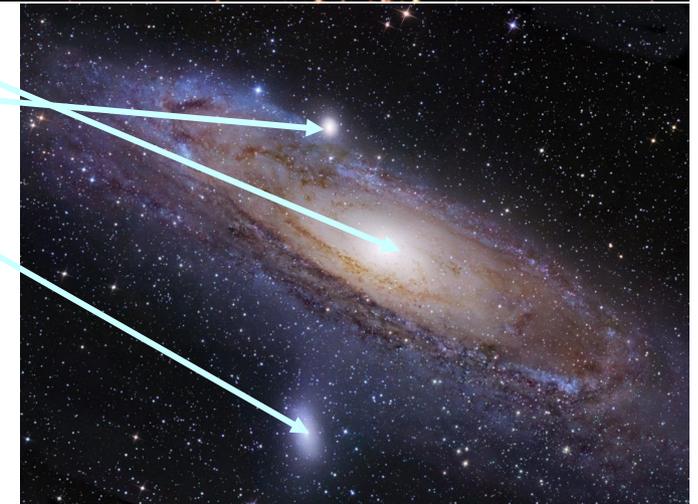
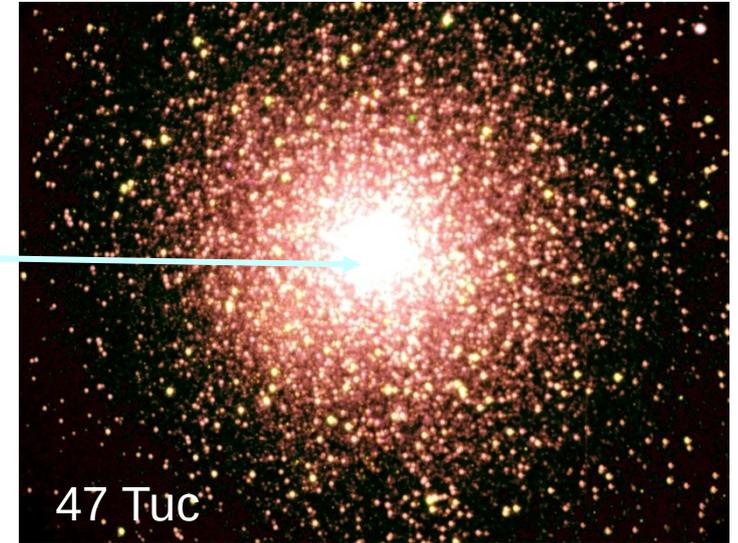
**Aglomerados Globulares**:

**Gigantes Vermelhas, RR Lyras,  
Sub-Anãs**;

e **fora da VL** no **Bojo** de M31,  
em **M32**, e em **NGC 205**:

Estrelas **velhas** de **baixa metalicidade** ( $Z < \sim 0.003$ ,  $[Fe/H] < \sim -0.7$ ).

Deve ter existido a **População III**  
também, com  $Z = 0$  ( $[Fe/H] = “-\infty”$ ),  
que (ainda) não foi encontrada.



# Populações Estelares

Hoje, o termo **População Estelar** é usado também para **conjuntos de estrelas** com **história de formação em comum**.

Uma **População Simples** (SSP, do inglês *Simple Stellar Population*) foi formada no **colapso** de uma **nuvem de gás** (=> aula Formação Estelar)

=> estrelas com

- **mesma idade**
- **mesma metalicidade**

ex. **aglomerados estelares** (=> aula Evolução Estelar)



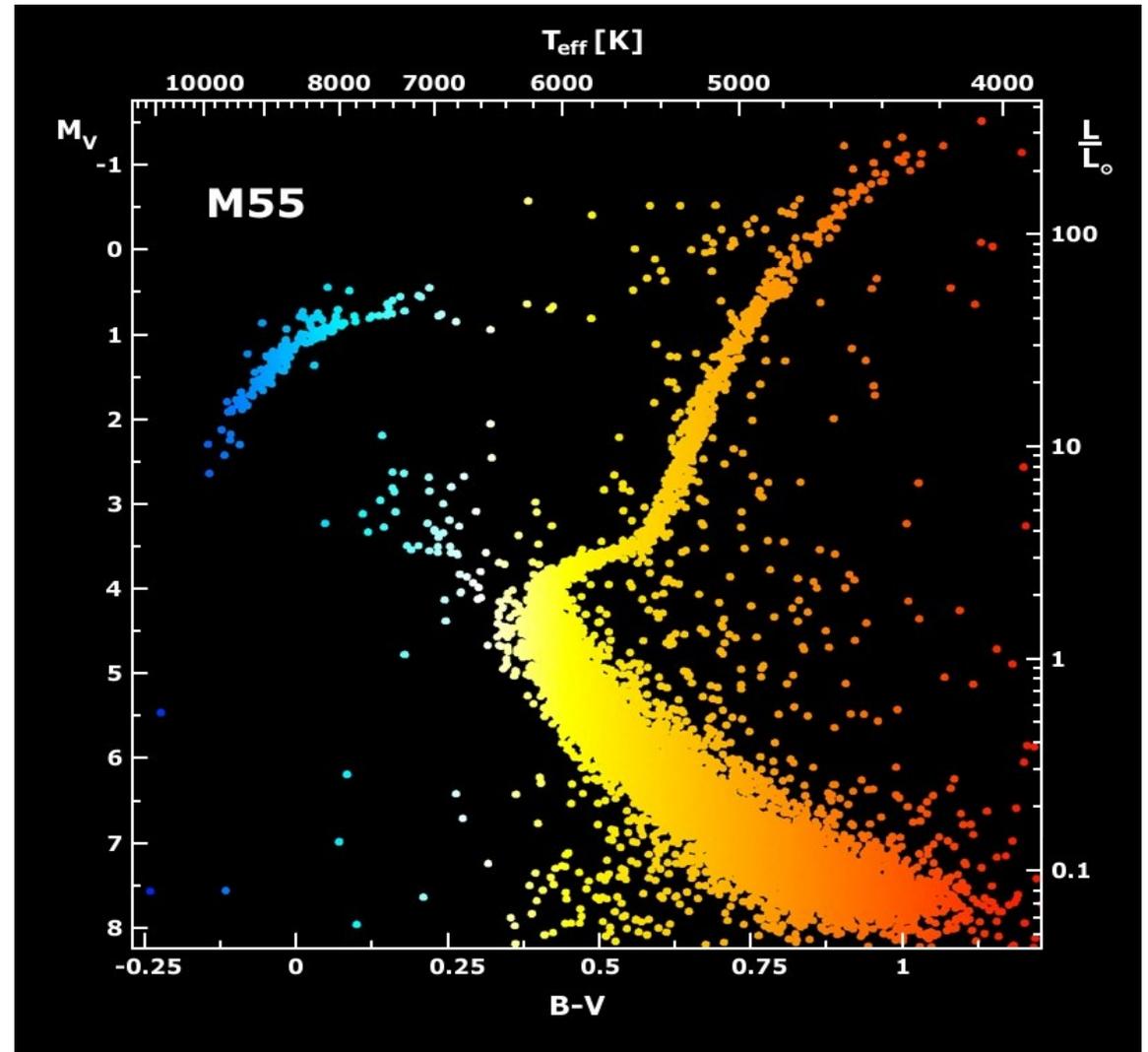
Nebulosa de Orion

# Populações Estelares

Lembrete:

O **Diagrama Cor-Magnitude** de uma **população** (um aglomerado estelar ou a vizinhança solar) dá uma dica sobre suas:

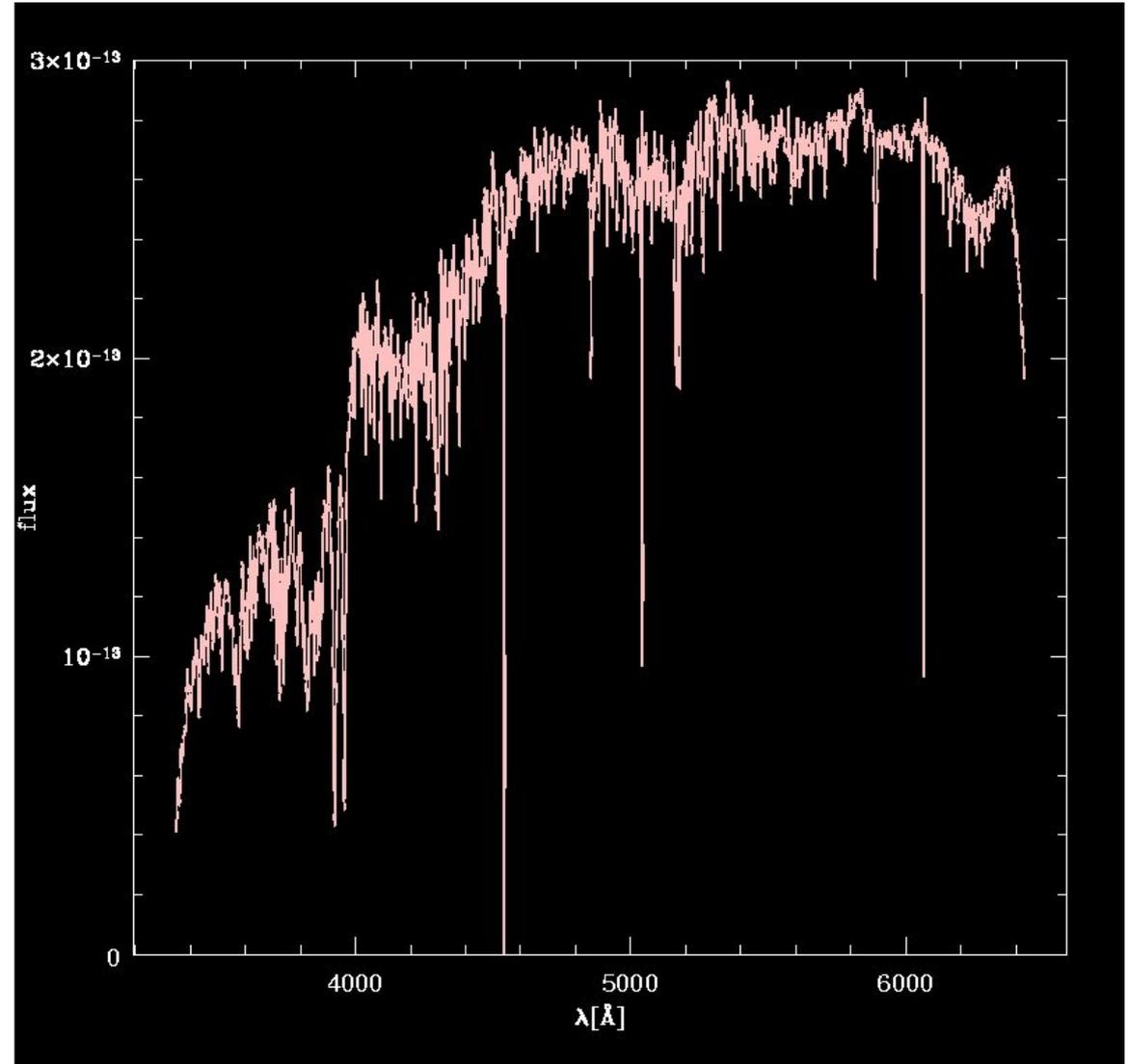
- **Distância**
- **Massa**
- **Idade**
- **Metalicidade**



pelo ajuste do Diagrama Cor-Magnitude.

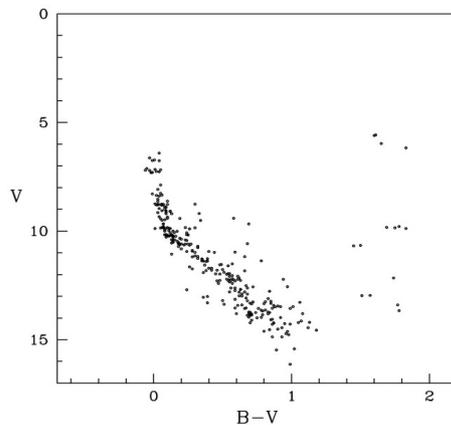
# Populações Estelares

O **espectro** de uma população também dá dicas sobre estes parâmetros.



# Aglomerados Estelares

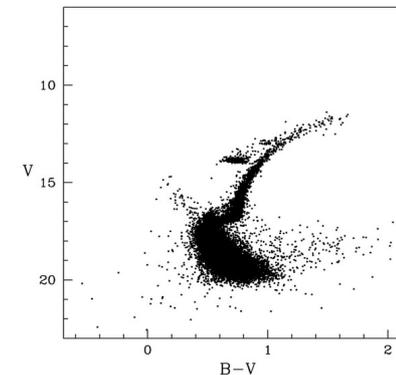
## Aglomerados Abertos



Até **algumas milhares** de estrelas  
**Maioria** ainda na **Sequência Principal**

posição desta indica  $[Fe/H] \sim$  **solar**  
 $\Rightarrow$  **alta metalicidade, jovem**  
 $\Rightarrow$  **População I** de Baade

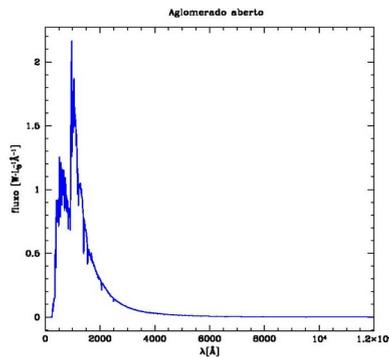
## Aglomerados Globulares



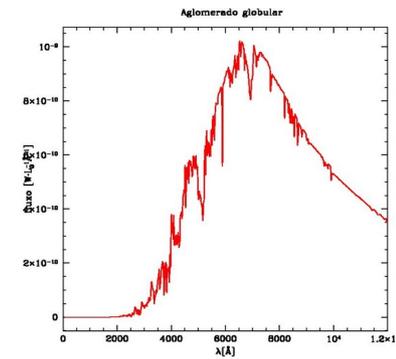
algumas **100 000** de estrelas  
muitas evoluíram para o **ramo** de  
**Gigantes Vermelhos** ou além  
posição da SP  $\Rightarrow [Fe/H] \leq -0.7$   
 $\Rightarrow$  **baixa metalicidade, velho**  
 $\Rightarrow$  **População II** de Baade

# Aglomerados Estelares

## Aglomerados Abertos



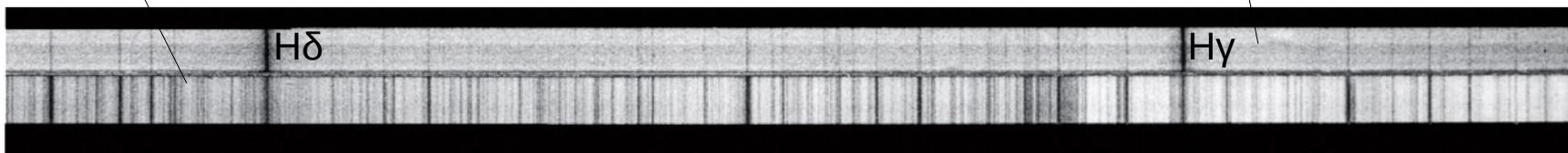
## Aglomerados Globulares



Pico do espectro integrado em  $\lambda$  curtos (azul) Pico em  $\lambda$  compridos (vermelho)  
Linhas e bandas moleculares de absorção de elementos pesados Poucas linhas de absorção

=> jovem, alta metalicidade  
=> População I

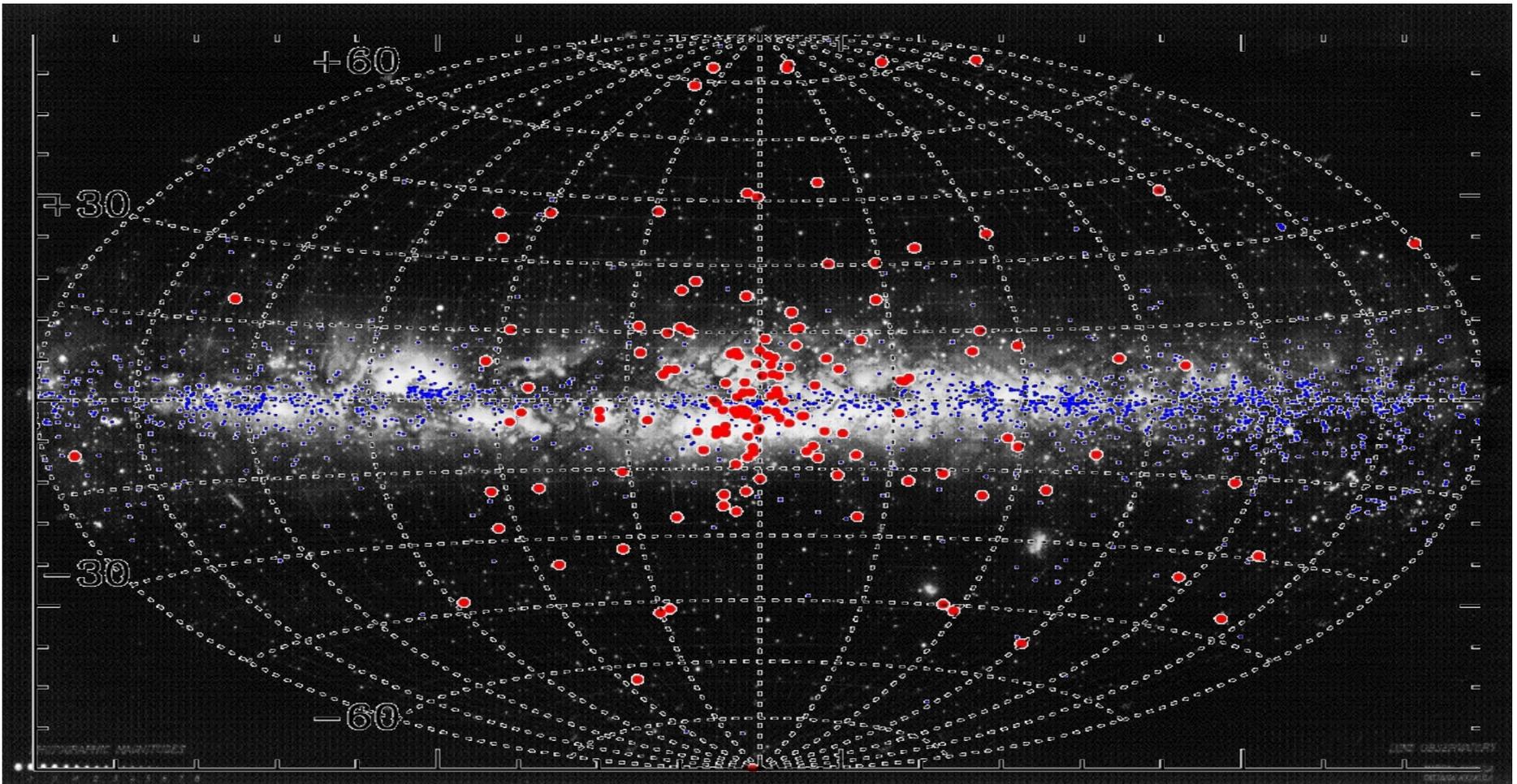
=> velho, baixa metalicidade  
=> População II



# Aglomerados Estelares

Aglomerados Abertos  
(~2000) na maioria no Disco

Aglomerados Globulares  
(~160) na maioria no Halo

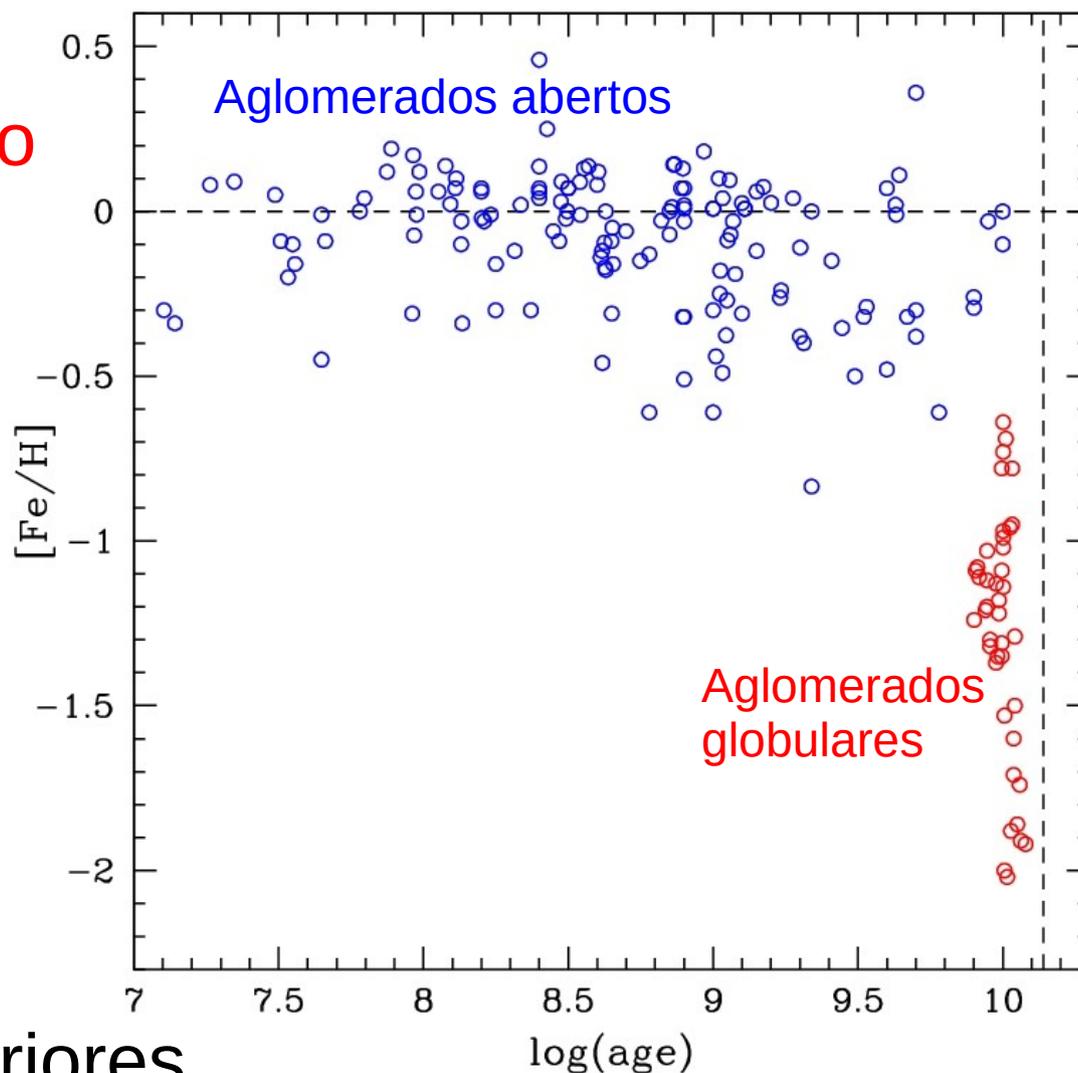


# Relação Idade-Metalicidade

Com o **tempo**, o Meio Interestelar é **enriquecido** de **elementos pesados** por estrelas “morrendo” (Nebulosas Planetárias, Supernovas).

Deste meio enriquecido as **novas estrelas** se formam.

=> **Novas gerações** de **estrelas** são **mais ricas** em “**metais**” que as anteriores.



# Razões Massa-Luminosidade

Uma grandeza frequentemente usada para estimar, que **tipo** de **estrelas** é responsável pela geração da luz de um dado componente estelar é a **Razão Massa-Luminosidade**  $M/L$ .

Ela é frequentemente dada em unidades da Razão Massa-Luminosidade **solar**  $M_{\odot}/L_{\odot}$

=>  $M/L$  ( $M_{\odot}/L_{\odot}$ ) do **Sol** é **1** por definição

Se  $M/L$  é **baixa** ( $\leq \sim 10$ ), o componente contém **estrelas brilhantes**, então populações estelares **jovens**.

$M/L$  **altas** são típicas de populações **velhas**, e mais altas ainda em componentes que contêm **mais massa**, do que só as estrelas (gás, poeira, Matéria Escura).

# O Disco da Via Láctea

A Via Láctea é provavelmente uma **galáxia espiral** ( $\Rightarrow$  aulas sobre galáxias) com um **disco estelar** contendo os **Braços Espirais**.



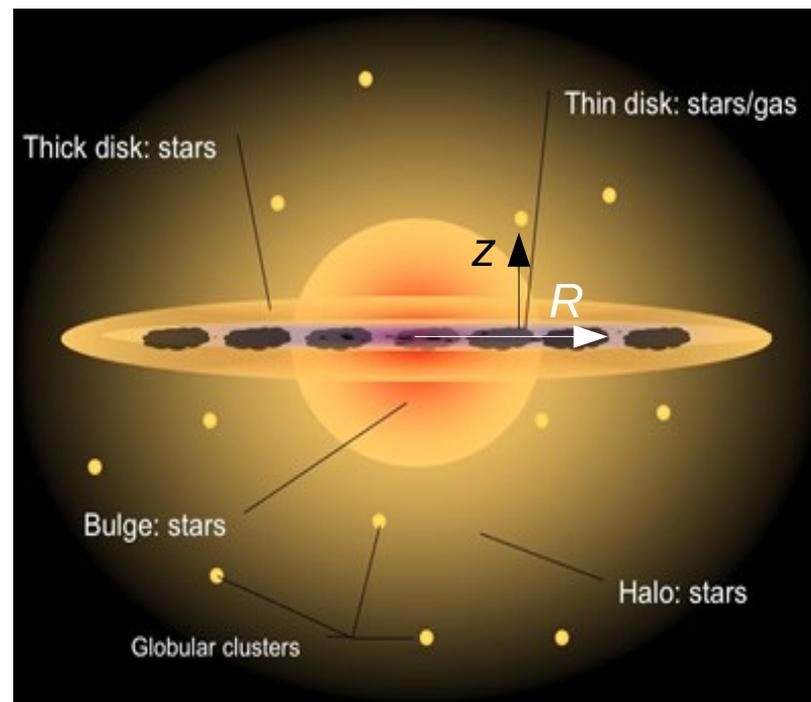
Estimativas do **diâmetro** do disco vão de 40 kpc a **50 kpc**.

O Sol fica a  $R_0 \approx 8$  kpc do **Centro Galáctico**,  $\sim 30$  pc “em cima” do plano. O círculo com raio  $R_0$  em torno do Centro se chama **círculo solar**. O **Sol orbita** o **Centro Galáctico** a  $\sim 220$  km/s em  $\sim 230$  Myr.

# O Disco da Via Láctea

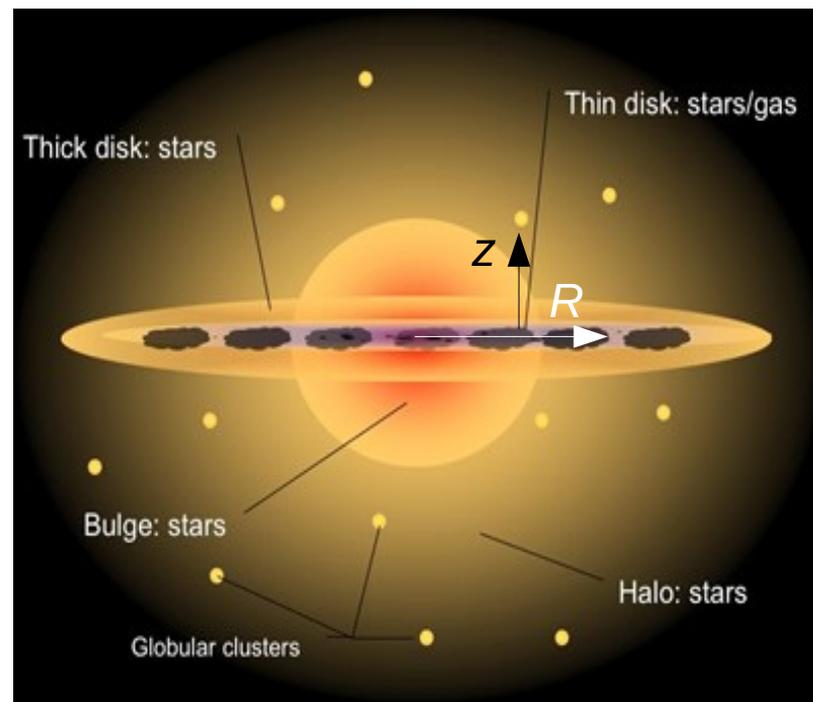
O Disco tem um **perfil exponencial** com **comprimento de escala radial**  $h_R > 2.25$  kpc e é composto de duas partes:

- o **Disco Fino** com **altura de escala** de  $z_{\text{fino}} \approx 350$  pc:
  - $\sim 10^{11} M_{\odot}$
  - atualmente **formando estrelas**.
  - $-0.5 < [\text{Fe}/\text{H}] < +0.3$  (População I)
  - **idade** das **estrelas** de **0 a 8 Gyr**
  - $M/L_B (M_{\odot}/L_{B,\odot}) \approx 3$
  - disco de **poeira** e **gás de  $\text{H}_2$**  de 3 a 7 kpc de raio e 35 a 90 pc de altura.



# O Disco da Via Láctea

- o **Disco Espesso**,  
 $Z_{\text{esp}} \approx 1000 \text{ pc}$  no meio:
  - $2 \cdot 10^9 M_{\odot} - 4 \cdot 10^9 M_{\odot}$
  - **densidade estelar** em  $z = 0$  de  $\sim 8.5 \%$  daquela no disco fino
  - $-0.6 < [\text{Fe}/\text{H}] < -0.4$   
(População I e pouco)
  - **idade** das **estrelas** de 10 Gyr a **11 Gyr**



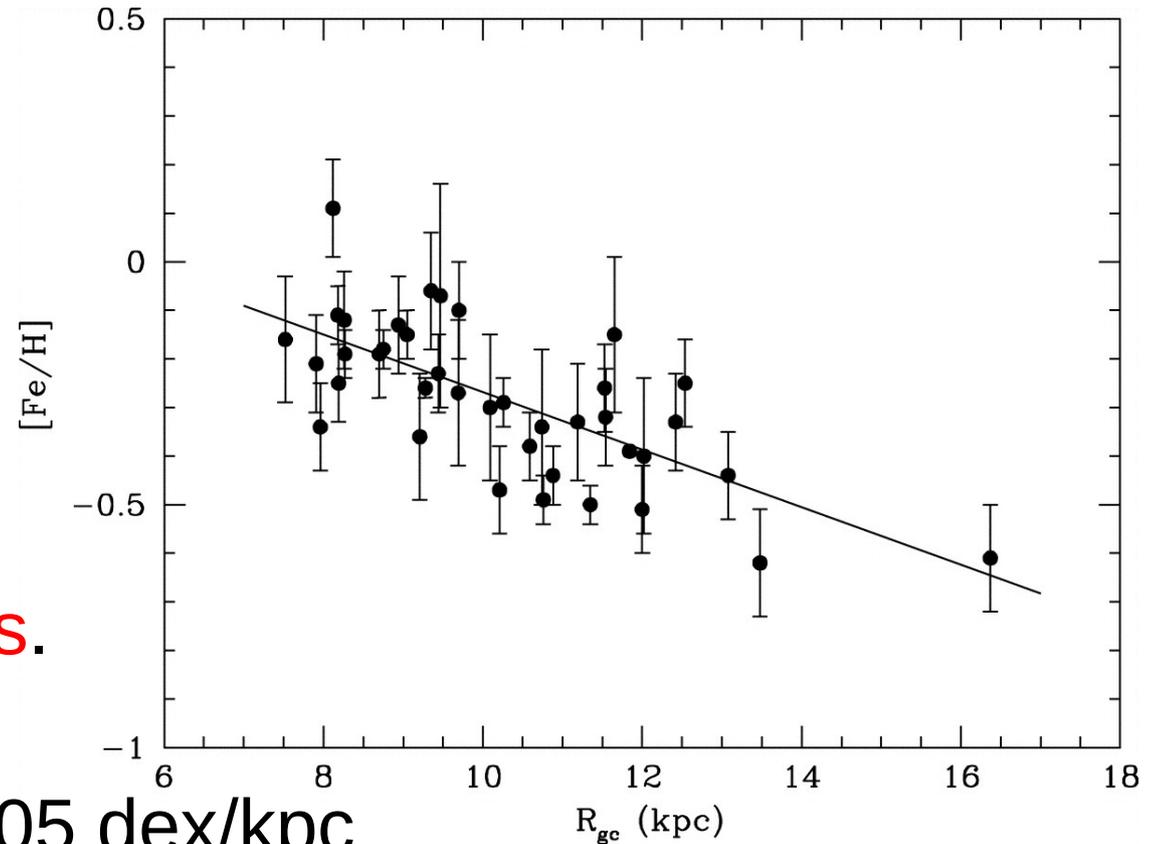
perfil de densidade do disco ( $n_0 = 0.02$  estrelas/ $\text{pc}^3$ ):

$$n(z, R) = n_0 \cdot (e^{-z/z_{\text{fino}}} + 0.085 \cdot e^{-z/z_{\text{esp}}}) \cdot e^{-R/hR}.$$

# Gradiente de Metalicidade de Disco

Regiões mais **centrais**:  
**maior formação estelar**  
e mais sujeitas a  
**enriquecimento** por  
**material** ejetado de  
estrelas.

=> Mais **ricas** em **metais**.



Gradiente:  $\sim -0.01$  a  $-0.05$  dex/kpc

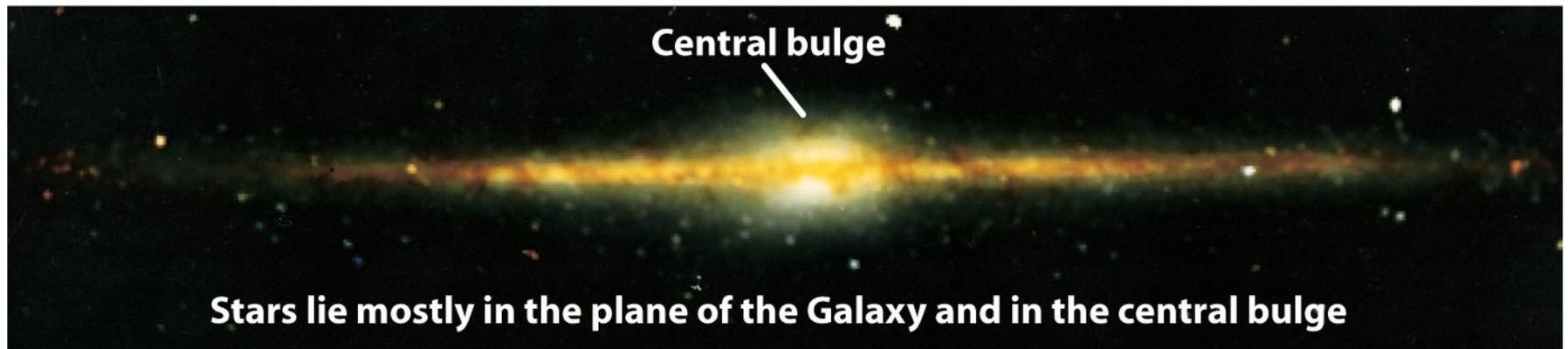
=> **dica** sobre a **formação** e **evolução** da Galáxia  
(aula galáxias II)

# O Disco da Via Láctea

Distribuição de poeira e estrelas na Galáxia, ...



(a) Infrared emission from dust at wavelengths of 25, 60, and 100  $\mu\text{m}$



(b) Infrared emission from dust at wavelengths of 1.2, 2.2, and 3.4  $\mu\text{m}$

Figure 23-6

*Universe, Eighth Edition*

© 2008 W. H. Freeman and Company

# O Disco da Via Láctea

... e de hidrogênio neutro, H I

**21-cm emission shows that hydrogen gas is concentrated along the plane of the Galaxy**

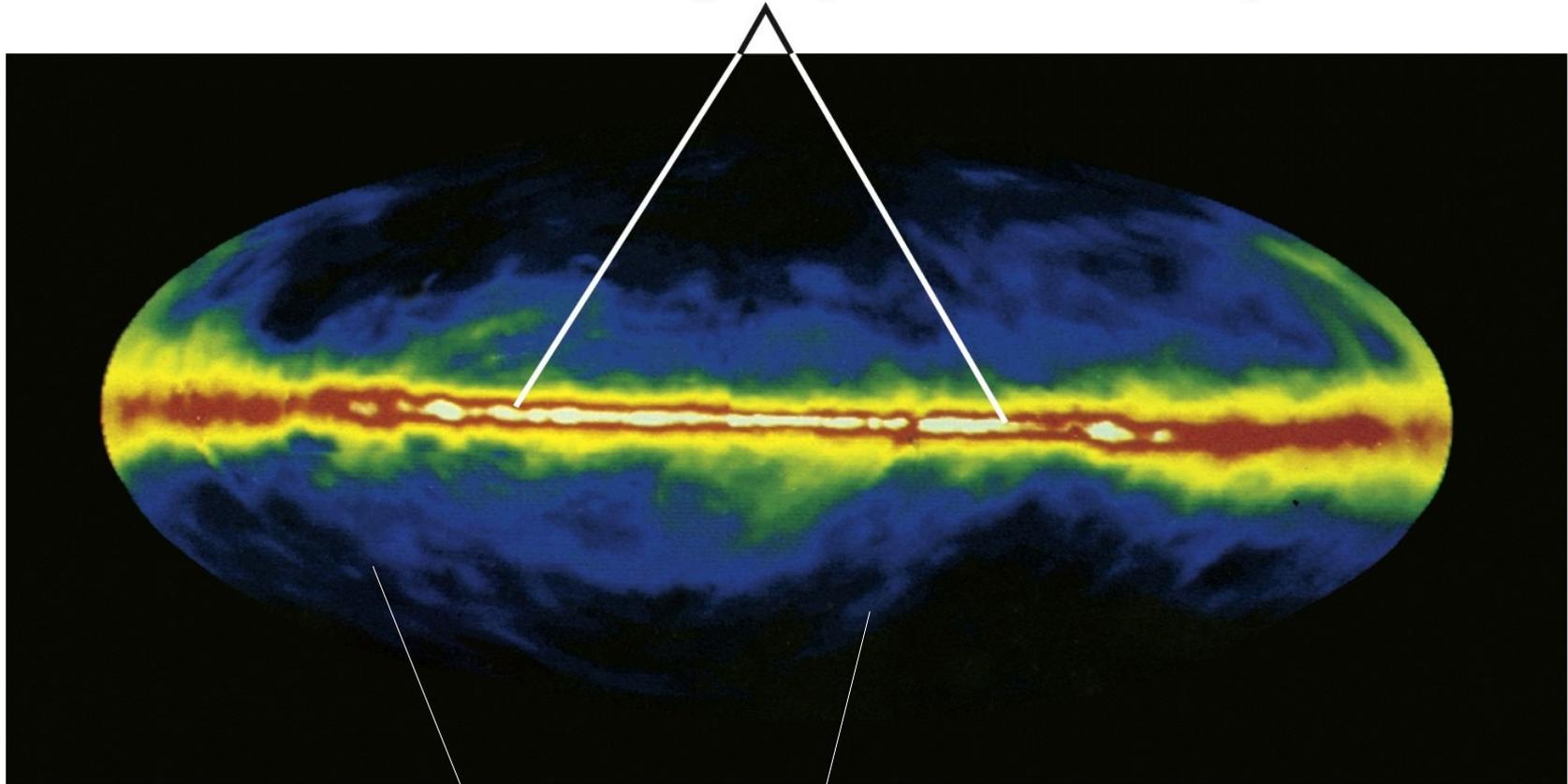
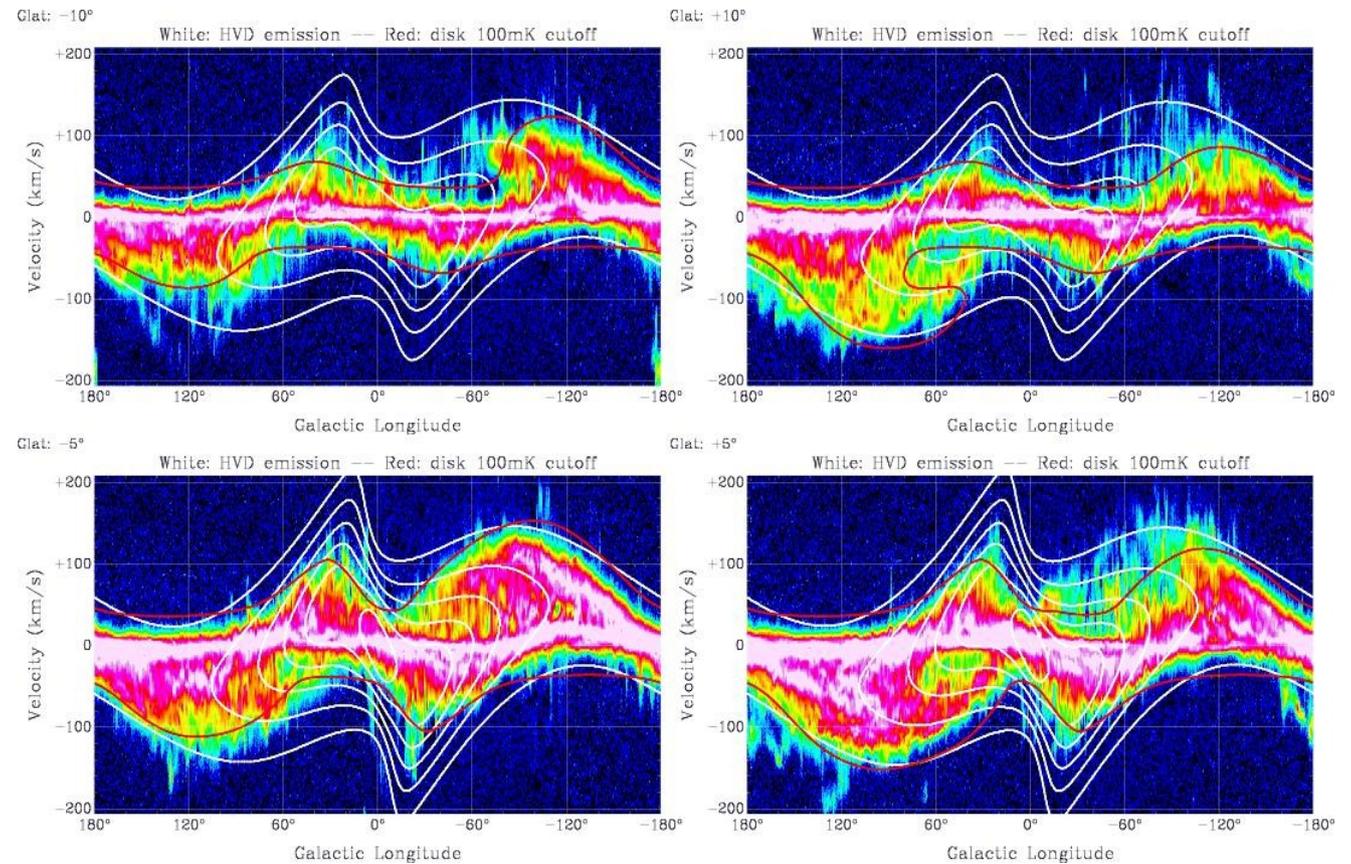


Figure 23-12  
*Universe, Eighth Edition*  
© 2008 W. H. Freeman and Company

Nuvens quentes da coroa Galáctica

# Braços Espirais

Olhando bem, o disco de HI tem uma **deformação** (*warp*) de até  $15^\circ$  a 12 kpc do Centro Galáctico, coisa bastante comum em galáxias discos.



# O Disco da Via Láctea

E de que consistem os **Braços Espirais**?

Do mesmo material que o resto do disco, mas com **densidade** ligeiramente **maior**.

=> **critério de Jeans** satisfeito (**colapso de nuvens de gás**)

=> **Formação estelar**.

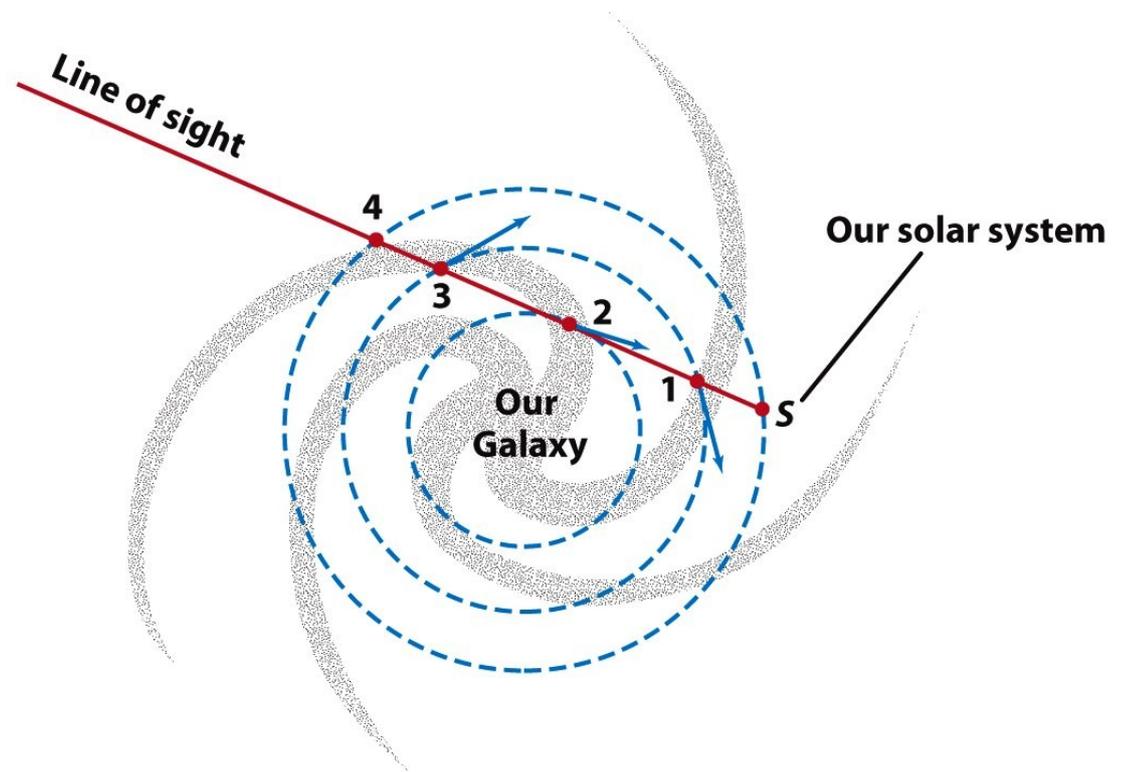


Interpretação artística da Via Láctea visto faceon

Os **Braços Espirais** são **mais brilhantes** que o resto do disco por serem regiões de **formação estelar**.

# Braços Espirais

Conhecendo a **curva** de **rotação** da **Galáxia** (velocidade rotacional em função da distância do centro; => em breve) podemos tentar **mapear** as **sobredensidades** do **hidrogênio neutro** observando a linha de **21 cm** (=> aula Matéria Interestelar) em **todas** as **direções** dentro do disco.



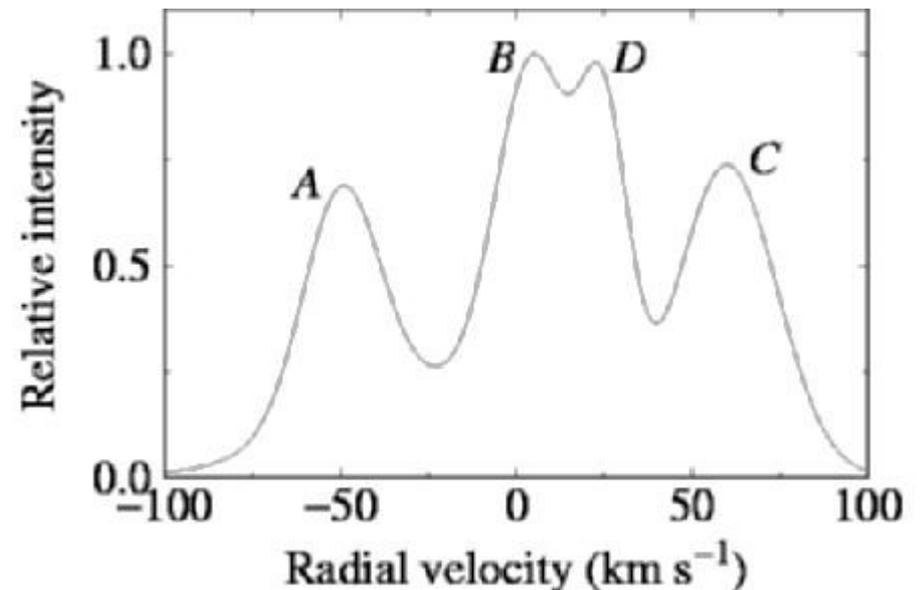
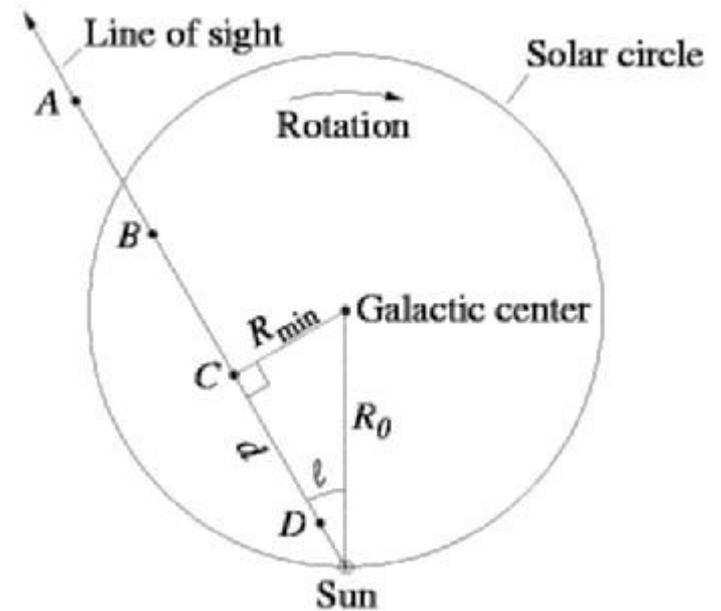
- Hydrogen clouds 1 and 3 are approaching us: They have a moderate blueshift.
- Hydrogen cloud 2 is approaching us at a faster speed: It has a larger blueshift.
- Hydrogen cloud 4 is neither approaching nor receding: It has no redshift or blueshift.

Figure 23-13  
*Universe, Eighth Edition*  
© 2008 W.H. Freeman and Company

# Braços Espirais

Pelo **efeito Doppler**, esta linha é um pouco **deslocada** para o **azul** ou para o **vermelho** dependendo da **velocidade radial relativa** entre a região **emitindo a radiação** e o **Sol**.

Supondo **órbitas circulares**, podemos determinar, onde na linha de visada se encontra o gás que emitiu a radiação.



# Braços Espirais

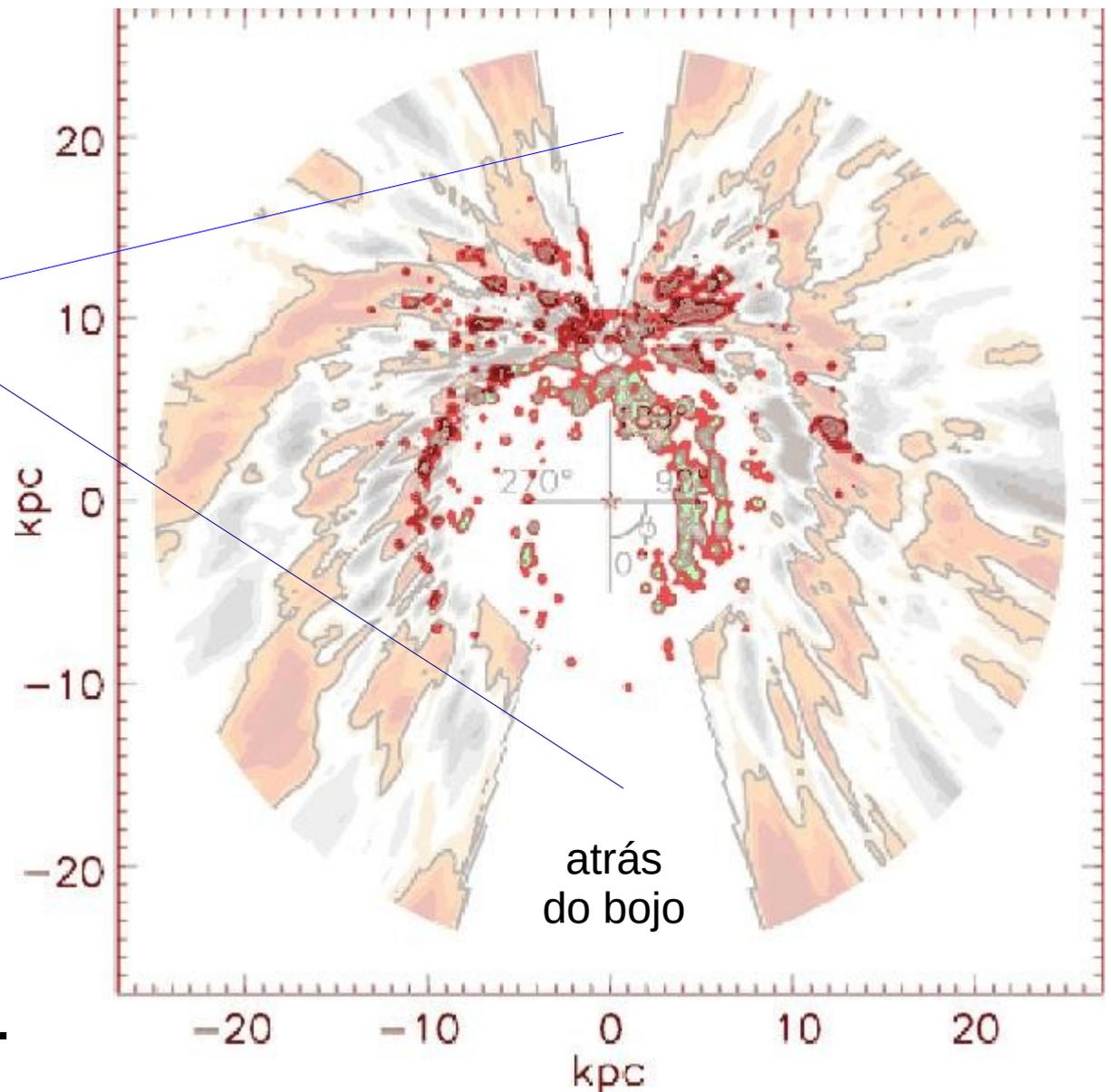
Obtemos o mapa ao lado.

**Nestas regiões**, o movimento do gás é perpendicular à linha de visada.

=> efeito Doppler zero

=> Não dá pra determinar a distância até o gás.

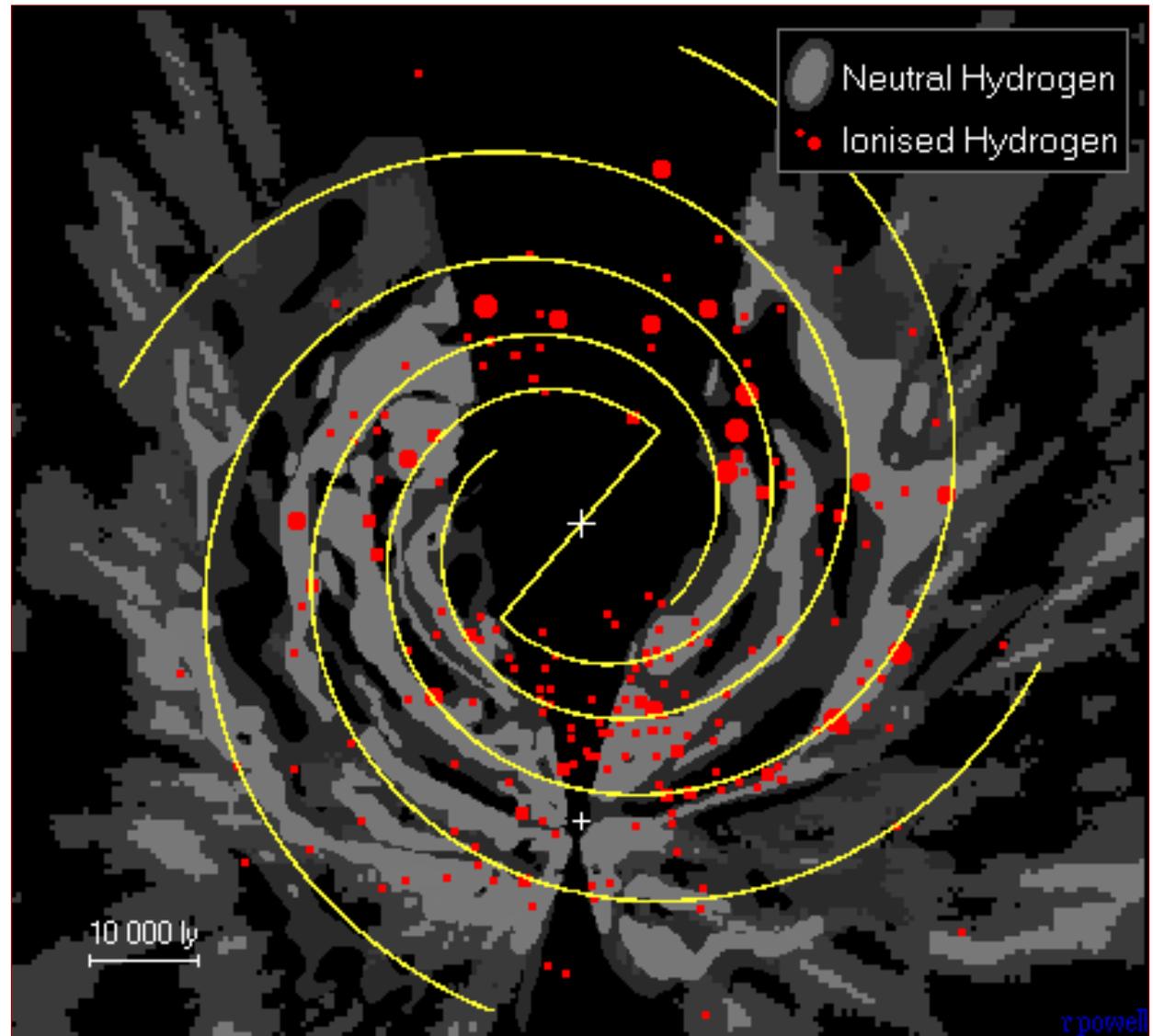
=> **Buracos** no mapa.



# Braços Espirais

Adicionando a este mapa as **regiões H II** (regiões de emissão de hidrogênio ionizado por formação estelar, => aula Formação Estelar), observadas no rádio

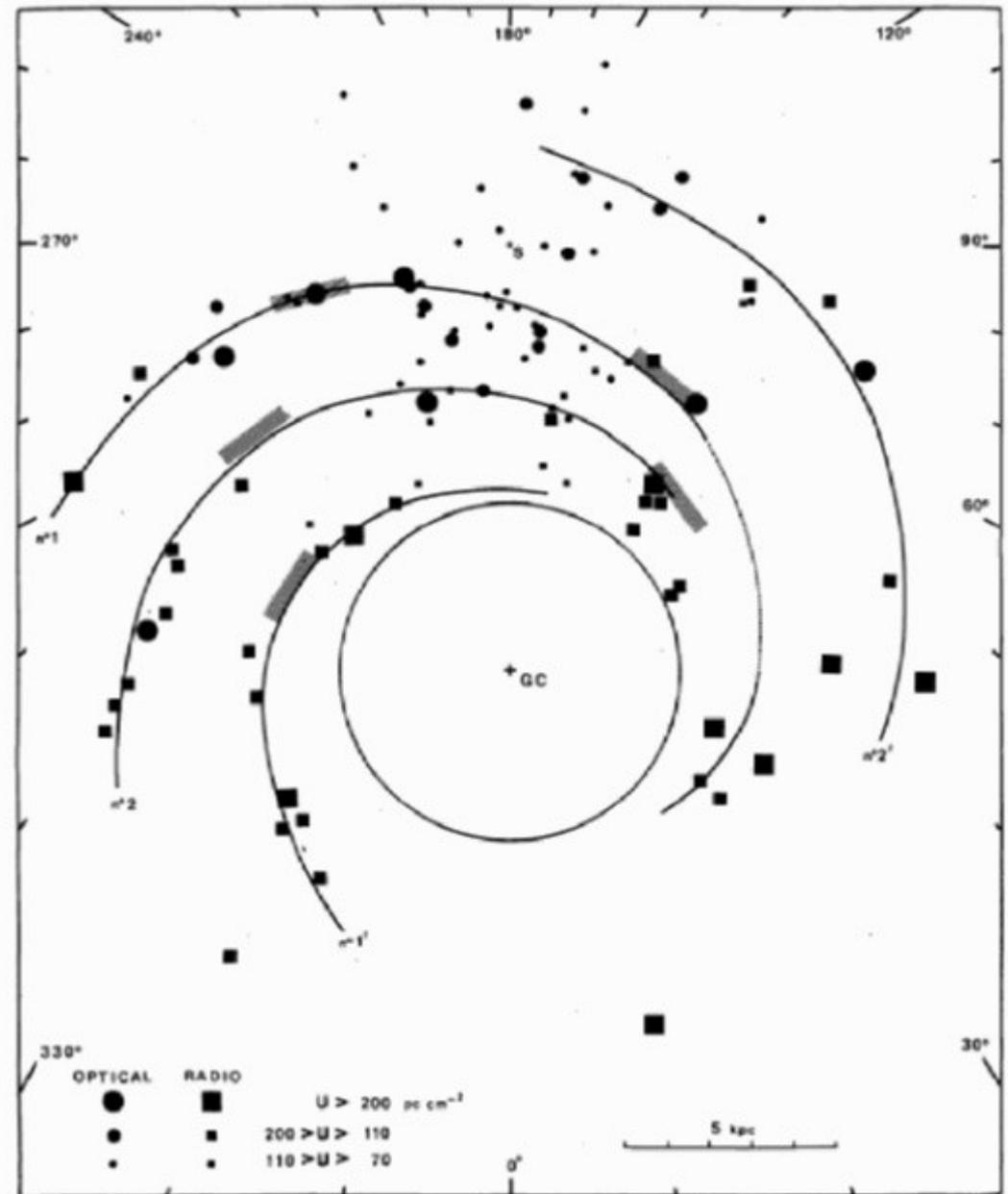
...



# Braços Espirais

... e as **estrelas jovens** (círculos: observadas no óptico), podemos obter uma ideia das **posições** dos **Braços Espirais**.

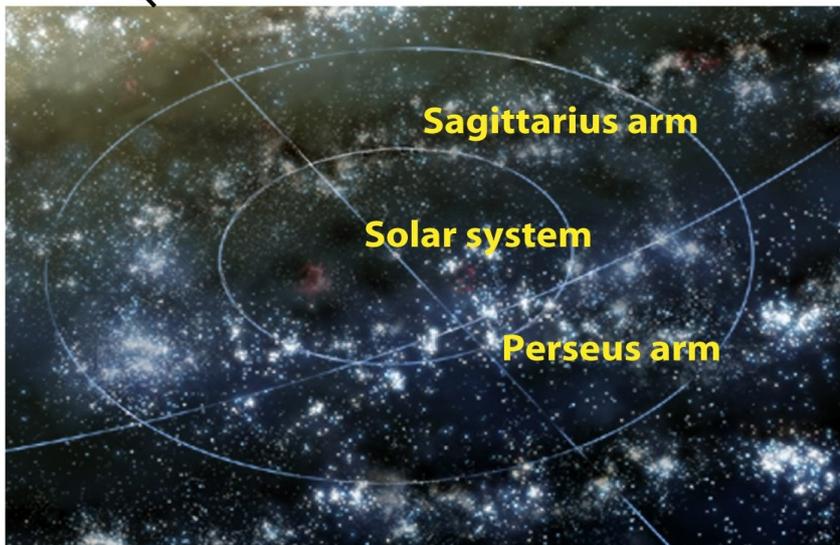
quadrados: as nuvens de H neutro e regiões H II.



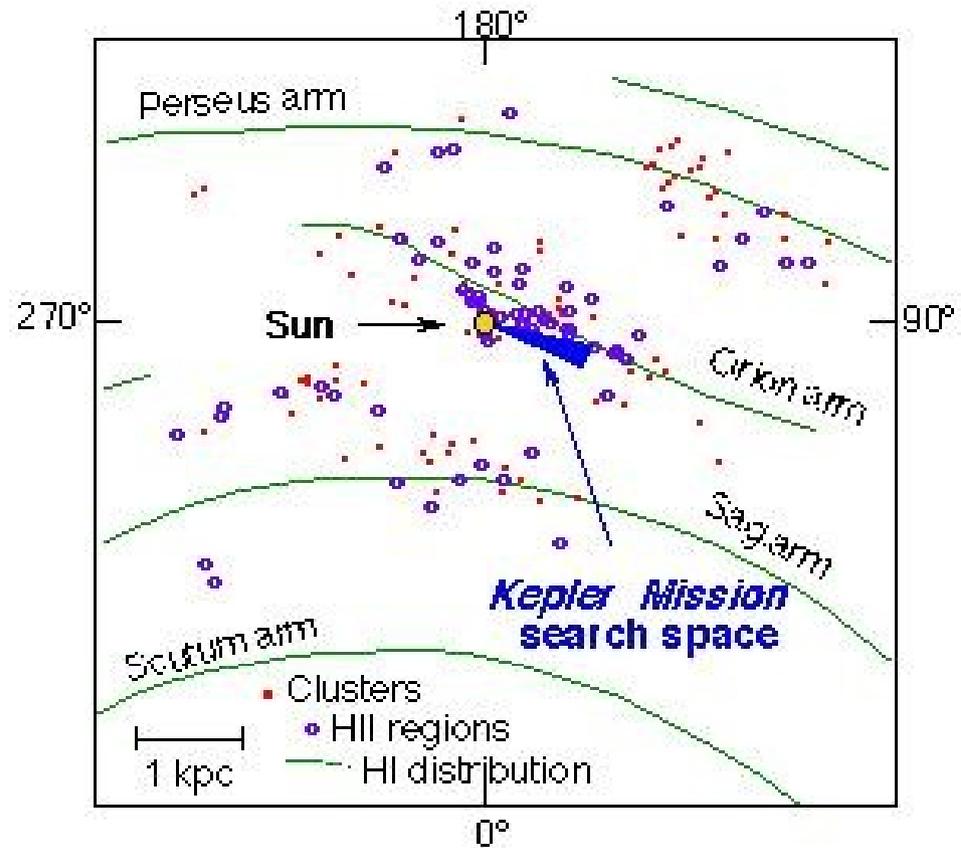
# Braços Espirais

Aglomerados Abertos também traçam Braços Espirais. (aqui: na vizinhança solar).

To the center of the Galaxy



Closeup of the Sun's galactic neighborhood



# Braços Espirais

Segundo estes resultados a **Via Láctea** tem **quatro** grandes **Braços Espirais**:

**Braço de Perseu**

**Braço de Norma**

**Scutum-Crux**

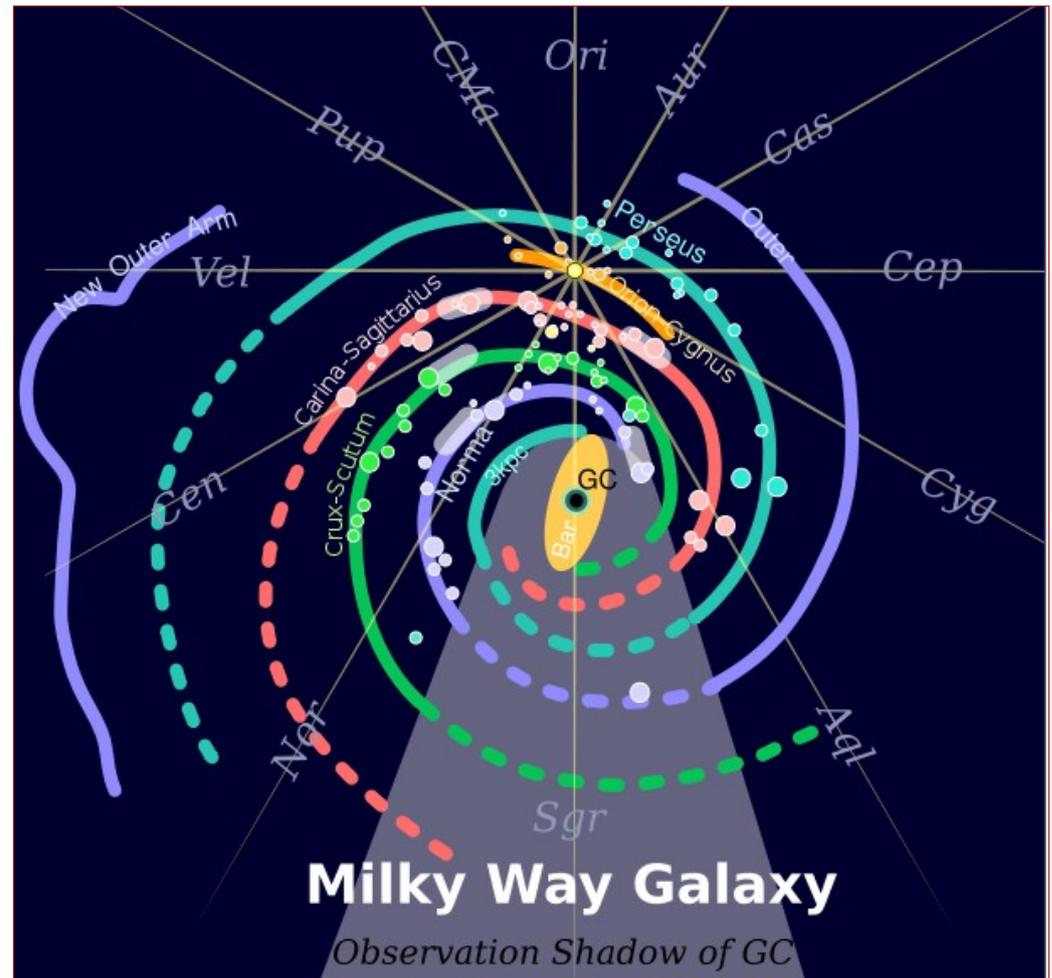
**Carina-Sagittarius,**

além de **fragmentos** de braços como o

**Braço de Órion** ou **Local,** com o Sistema Solar

perto ou dentro (mas o Sol não é uma estrela jovem).

Também há dicas que nossa Galáxia tem uma **Barra Central** de 4.4 kpc de comprimento e proporções 1 : 0.5 : 0.4.



# Braços Espirais

Outra visão...

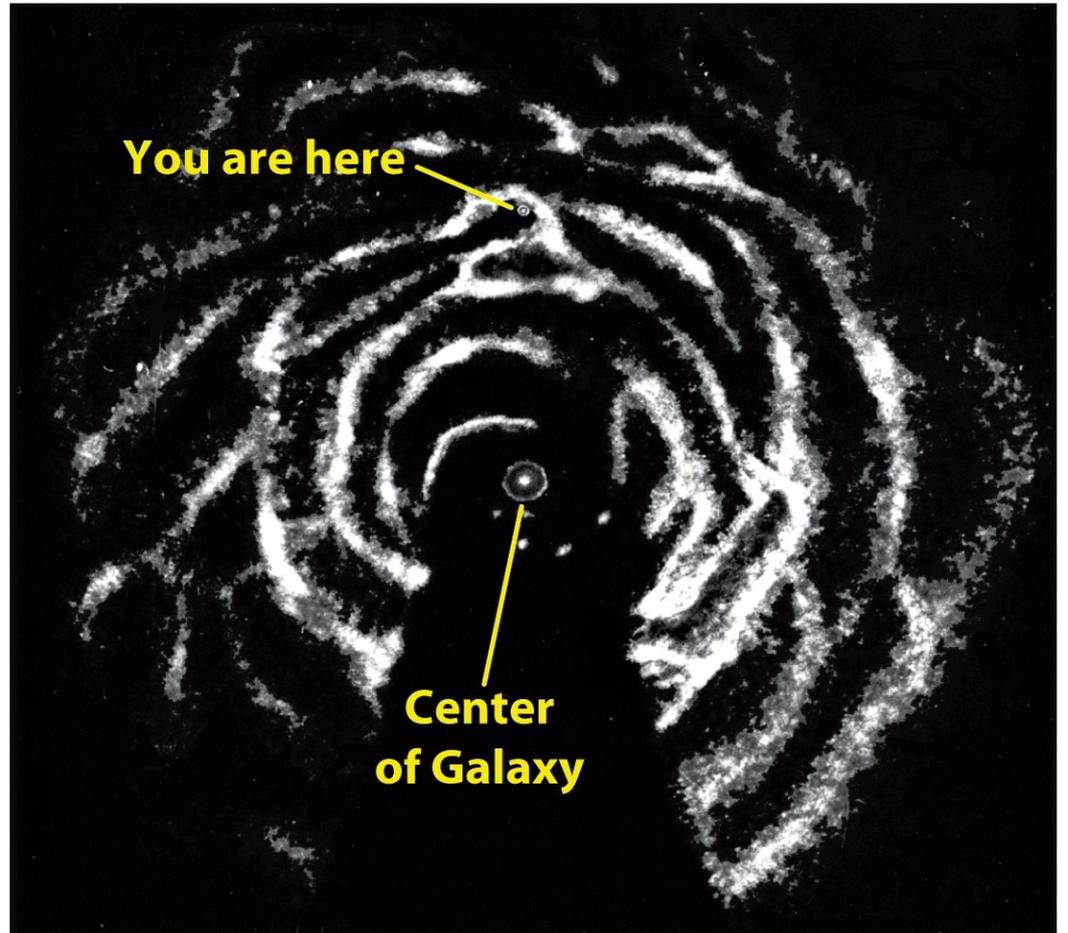
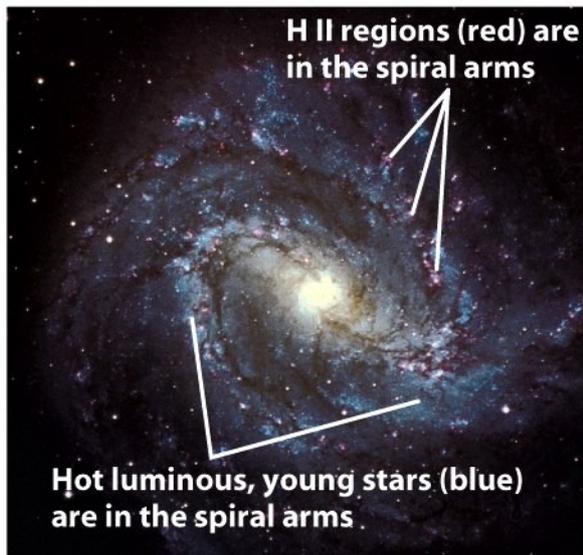


Figure 23-14  
*Universe, Eighth Edition*  
© 2008 W. H. Freeman and Company

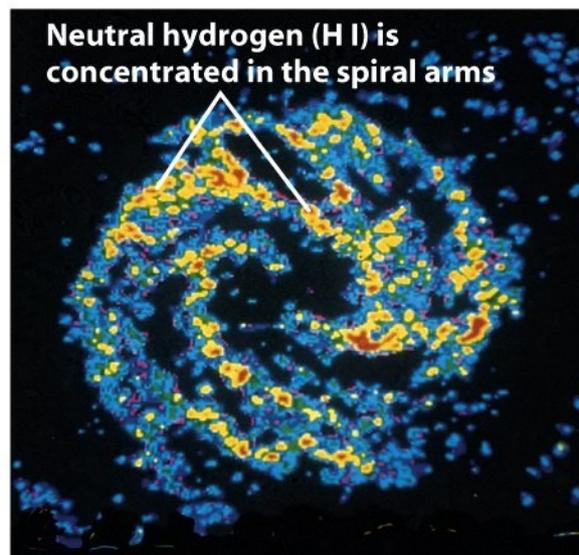
# Braços Espirais

Apesar da aparência dominante, os **Braços Espirais** são apenas **ligeiramente mais densos** que o resto do Disco, aqui ilustrado pelo exemplo da galáxia M83, galáxia provavelmente similar à Via Láctea.



(a) Visible-light view of M83

M83 no ótico



(b) 21-cm radio view of M83

M83 em 21 cm (HI)



(c) Near-infrared view of M83

M83 no infravermelho, um bom traçador de massa estelar

# O Bojo Central

No meio do Disco, a **escala de altura** aumenta para uns **100 a 500 pc**, formando o **Bojo Central**, de  $\sim 10^{10} M_{\odot}$  e luminosidade na banda  $B$  de  $3 \cdot 10^9 L_{\odot}$ .  
 $\Rightarrow M/L_B [M_{\odot}/L_{B,\odot}] \approx 3$



Diferentemente do disco, o Bojo não tem um perfil exponencial, mas a sua luminosidade superficial  $I(r)$  (em  $L_{\odot}/\text{pc}^2$ ) segue um **perfil de de Veaucouleurs**, típico para galáxias elípticas ( $\Rightarrow$  próxima aula):

$$\log_{10}(I(r)/I_e) = -3.307 \cdot [(r/r_e)^{1/4} - 1],$$

onde  $r_e$  (raio efetivo ou de meia-luz) é  $\sim 0.7$  kpc e  $I_e$  é o brilho superficial em  $r = r_e$ .

# O Bojo Central

O **Bojo** contém **estrelas** de  $-2 < [\text{Fe}/\text{H}] < +0.5$

=> **Populações I e II**,  
e 3 faixas de idades: de 7 a ~10 Gyr,  
entre 200 Myr e 7 Gyr e  $< 200$  Myr,  
mas sem formação estelar atual.

Aqui, a relação idade-metalicidade é invertida: as **estrelas** mais **velhas** têm as **metalidades** mais **altas**, e as mais **novas**, metalidades na **faixa inteira** (-2 a +0.5).

Provavelmente houve uma **época** de **formação estelar** quando a Galáxia era **jovem**, e as estrelas formadas **mais tarde** foram formadas por **material** que **caiu** no Bojo **depois**, e tinha **metalidades** (parcialmente) **mais baixas**.

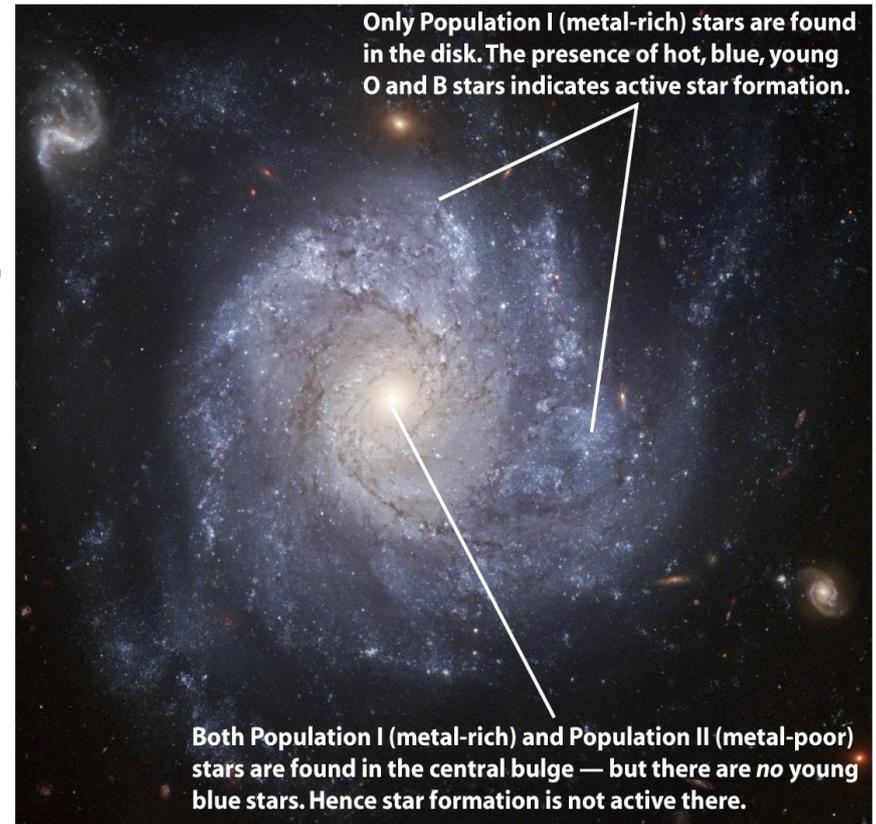


Figure 23-10  
*Universe, Eighth Edition*  
© 2008 W.H. Freeman and Company

# O Halo Estelar

Em torno de tudo, com um diâmetro de  $> 200$  kpc temos o **Halo Estelar**,  
 $M \sim 10^9 M_{\odot}$ ,  $L_B \sim 10^9 L_{\odot}$ ,  
 $\Rightarrow M/L (M_{\odot}/L_{\odot}) \sim 1$   
consistindo de “**estrelas de alta velocidade**” e  
**Aglomerados Globulares**,  
de 11 a 13 Gyr de idade,  
maioria com  $[Fe/H] < -0.8$ .  
 $\Rightarrow$  **População II**

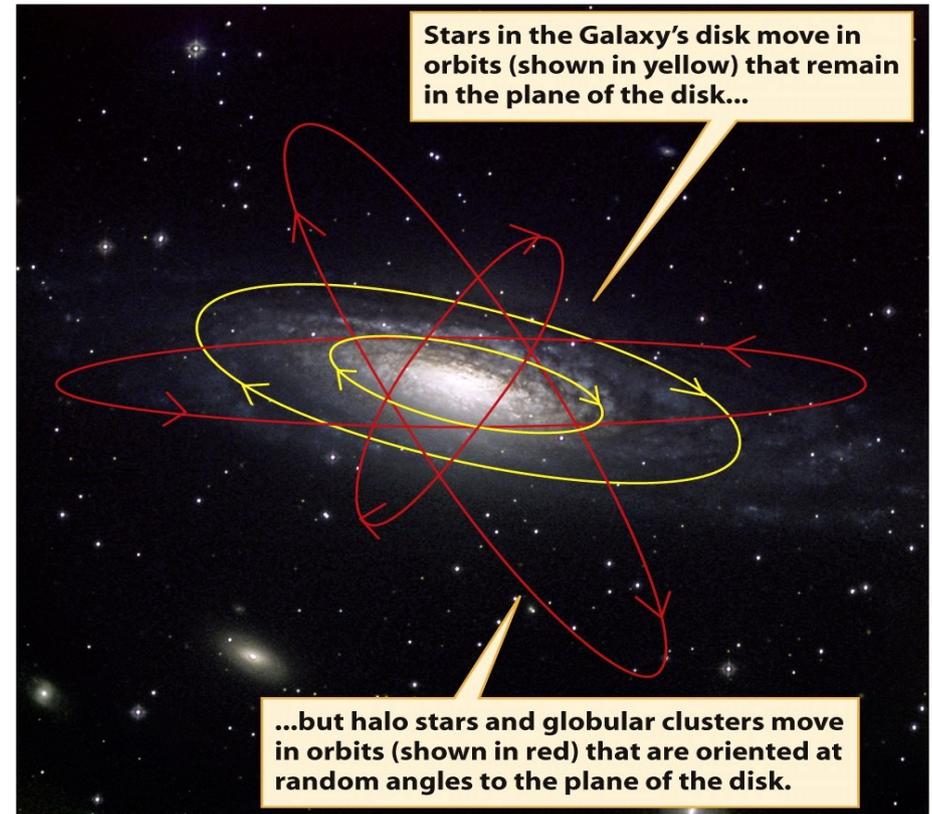


Figure 23-9  
*Universe, Eighth Edition*  
© 2008 W.H. Freeman and Company

Tem alguns Aglomerados Globulares com  $[Fe/H] > -0.8$ , mas que são distribuídos mais perto do disco e podem ser associados com o Disco Espesso.

# O Halo Estelar

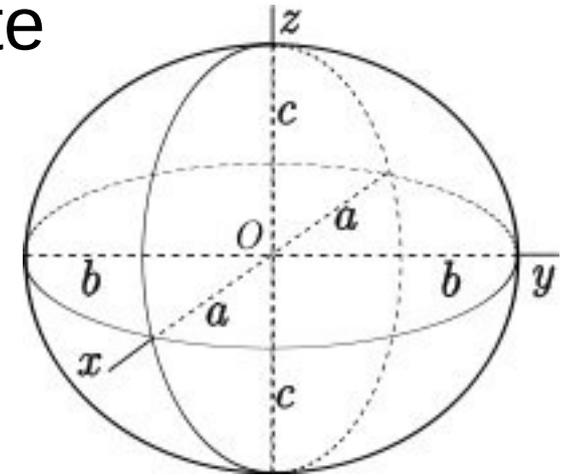
O Halo tem **forma esférica**, provavelmente um pouco **achatada**, com  $0.6 \leq c/a \leq 0.9$  (provavelmente mais perto de 0.9).

Perfil de densidade de no. de estrelas:

$$n_{\text{halo}}(r) = n_{0,\text{halo}} \cdot (r/a)^{-3.5},$$

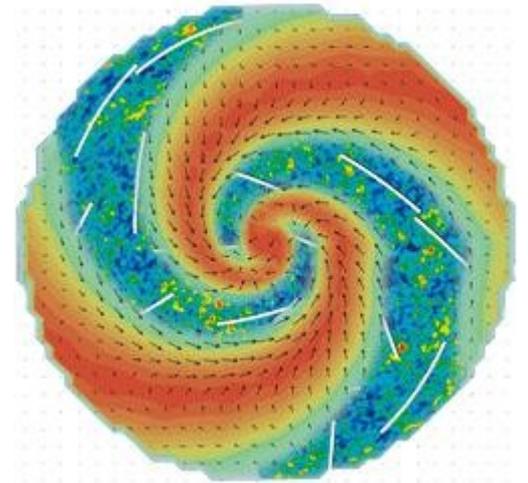
onde  $n_{0,\text{halo}} \approx 4 \cdot 10^{-5} \text{ pc}^{-3}$  ( $\sim 0.002$  vezes a densidade do Disco no plano central),  $a$  = comprimento de escala, de alguns kpc.

Projetado num plano para obter o perfil de luminosidade superficial, obtem-se um perfil de de Veaucouleurs, com  $r_e = 2.7 \text{ kpc}$ .



# O Campo Magnético Galáctico

Pelo efeito Zeeman ( $\Rightarrow$  aula Sol), ou pela polarização da radiação (óptica e rádio) refletida por grãos de poeira alinhados com o **Campo Magnético Galáctico**, dá pra determinar este.



No **Disco**, ele segue os **Braços Espirais**, e é da ordem de 0.4 nT, chegando a 1  $\mu$ T perto do Centro Galáctico.

Apesar de **fraco** (o da Terra é  $\sim 50 \mu$ T na superfície) este campo magnético provavelmente teve um papel importante na **formação** e na **evolução** da **Via Láctea** (sua densidade de energia é comparável à energia térmica do gás do Disco.)

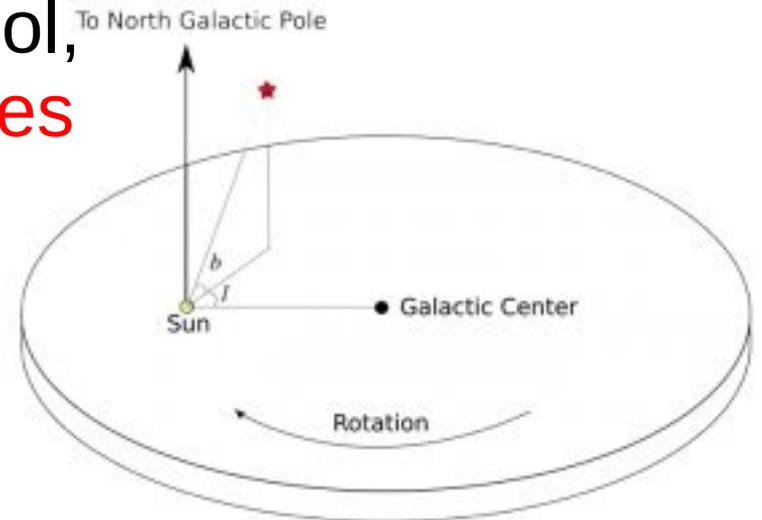
# A Curva de Rotação da Via Láctea

As **estrelas** da Via Láctea, p. e. o Sol, se movimentam em **órbitas circulares** em torno do **Centro Galáctico** (e o gás também).

A **velocidade** de rotação de uma estrela na **distância  $r$**  do **Centro** depende da **massa** da Galáxia **contida** no espaço no **interior** da sua **órbita**,  $M(r)^*$ :  $v(r) = \sqrt{G \cdot M(r) / r}$

\*Já que  $F_{\text{grav.}} = GM(r)m/r^2 = F_{\text{centrip.}} = mv(r)^2/r$ , onde  $m$  = massa da estrela / “de teste”

No caso que **toda a massa** está **concentrada** no **centro**, como no **Sistema Solar**,  $M(r) = M_{\odot} = \text{const.}$ , isto dá numa curva de rotação **kepleriana**,  $v(r)$  prop.  $r^{-1/2}$ .



# A Curva de Rotação da Via Láctea

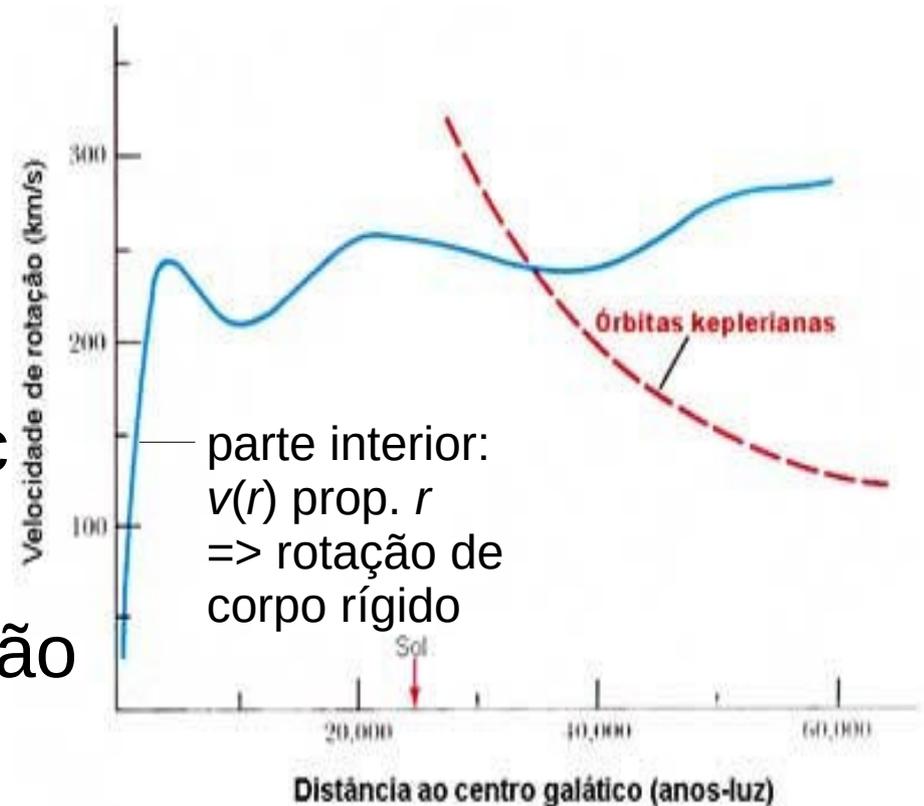
Medindo as **velocidades** das **estrelas** da nossa Galáxia, chega-se numa **curva de rotação** nada kepleriana, ela é, em primeira ordem, **constante**, para  $r >$  poucos kpc  $v(r) \approx 225 \text{ km/s} \approx \text{const.}$

Para obter uma curva de rotação constante:  $M(r)/r = \text{const.}$

$$\Rightarrow M(r) = \int_0^r \rho(r') dV = \int_0^r \rho(r') \cdot 4\pi r'^2 dr' = \text{const.} \cdot r$$

$\Rightarrow \rho(r) \cdot r^2 = \text{const.} \Rightarrow \rho(r) \text{ prop. } r^{-2}$ , que é justamente o perfil de um “gás” **relaxado (isotérmico)**.

Fazendo o cálculo com todas as constantes:  $\rho(r) = \frac{v(r)^2}{4\pi G r^2}$



# A Curva de Rotação da Via Láctea

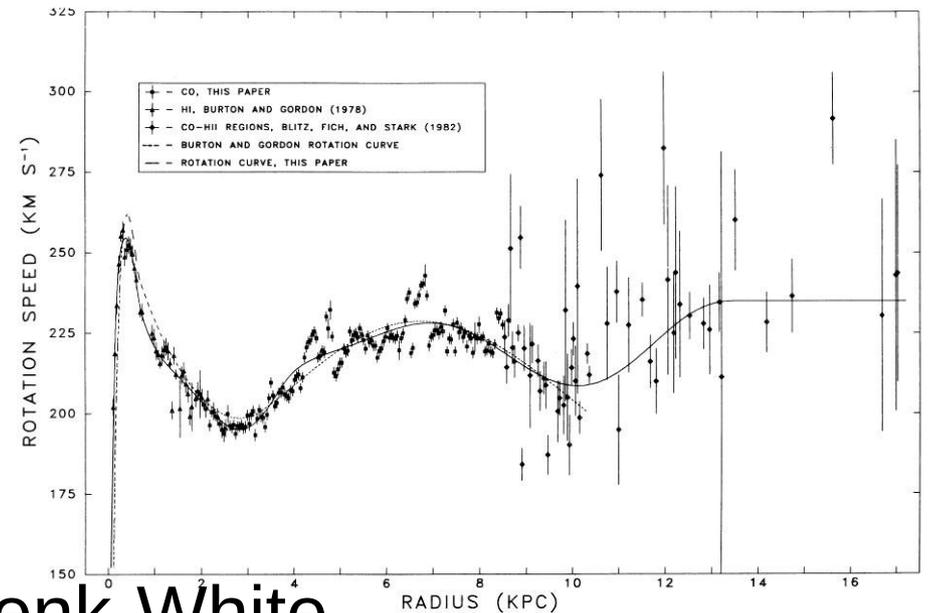
Levando em conta um pouco melhor os detalhes da **curva de rotação**, chega-se no seguinte **perfil de densidade** para a **Via Láctea**:

$$\rho_{\text{NFW}}(r) = \rho_0 / [(r/a)(1+r/a)^2],$$

chamado perfil de Navarro-Frenk-White, onde  $\rho_0$  é a **densidade central** e  $a$ , o **raio de escala**.

Este perfil **cai** muito **menos rápido** com  $r$  aumentando, do que sugerido pelos **componentes observados** da **Galáxia** (estrelas, gás interestelar, ...).

=> Deve ter um **componente** extra, **invisível**, na Via Láctea, chamado **Halo de Matéria Escura**.



# O Halo de Matéria Escura

$M = 5.4 \cdot 10^{11} M_{\odot}$  até 50 kpc,  
e  $1.9 \cdot 10^{12} M_{\odot}$  até 230 kpc.  
=> **95 %** da **massa total** da  
**Via Láctea!**

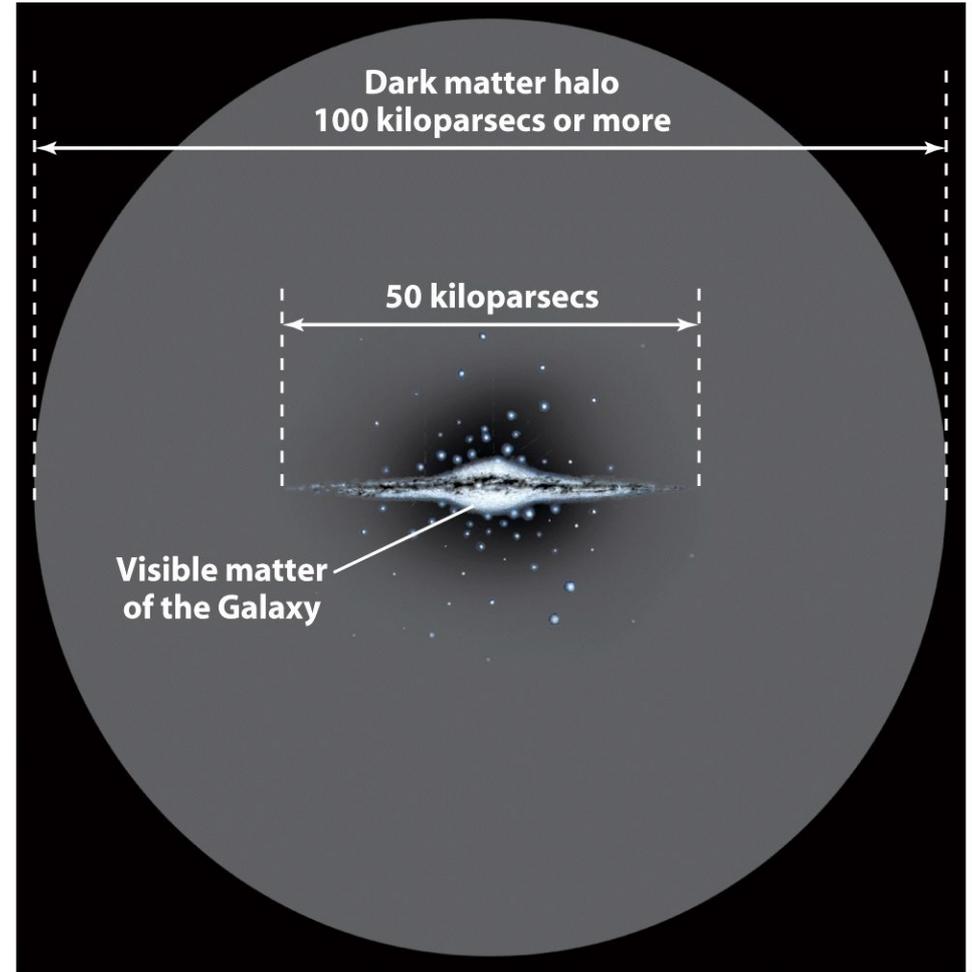
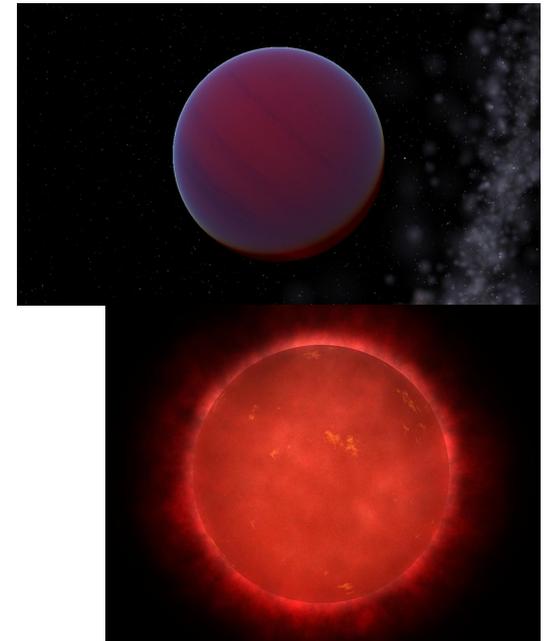


Figure 23-19  
*Universe, Eighth Edition*  
© 2008 W.H. Freeman and Company

# Do que consiste a Matéria Escura?

Anos 80: debate MACHOs  $\Leftrightarrow$  WIMPs

- **MACHOs** (ingl. *MA*ssive *C*ompact *H*alo *O*bjects, objetos do halo massivos e compactos, ou machões):
  - **Anãs Marrons** ( $\Rightarrow$  aula Estrelas)
  - “**Júpiter**”
  - **Estrelas comuns**, mas de baixo brilho
  - **Anãs Brancas** ( $\Rightarrow$  aula Estágios Finais)
  - **Estrelas de Nêutrons** (idem)
  - **Buracos Negros** ( $\Rightarrow$  aula Relatividade)



# Do que consiste a Matéria Escura?

Anos 80: debate MACHOs  $\Leftrightarrow$  WIMPs

- WIMPs: partículas massivas interagindo pela força fraca (do inglês *Weakly Interacting Massive Particles*; a palavra inglesa *wimp* também significa chorão)
- **partículas elementares** interagindo com o resto da matéria só pela **força fraca** (?) e pela **gravitação**, p. e. **neutrinos**, as partículas previstas pela teoria de **supersimetria**, ou outras.  
=> praticamente **invisíveis**.

Era, então um debate machões vs. chorões.

# Do que consiste a Matéria Escura?

Como detectar os MACHOs?

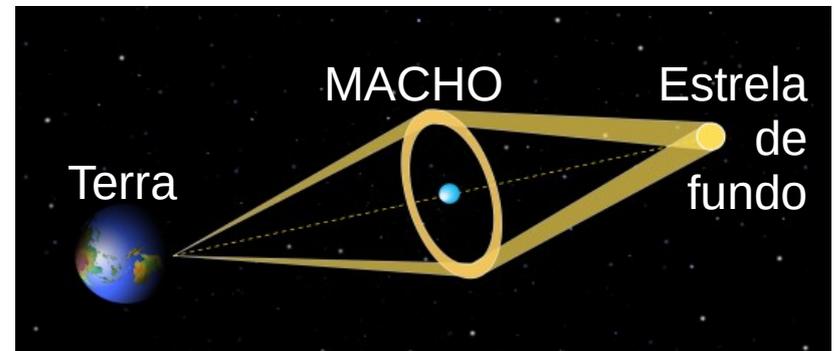
Pelo **efeito lente**, consequência da **Relatividade Geral**:

**Luz é defletida** por **massa**.

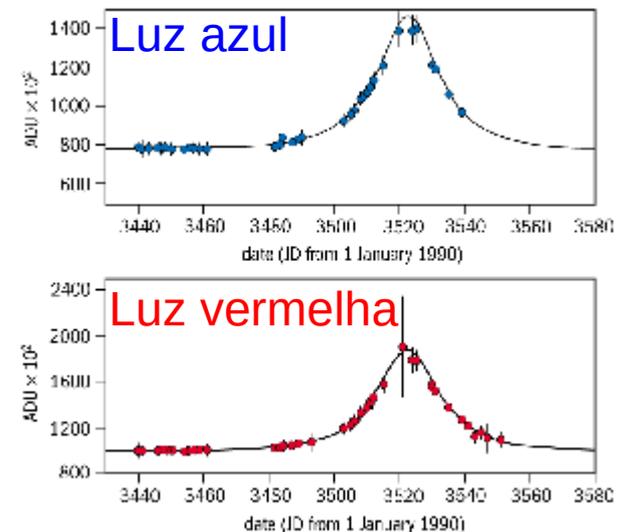
Quando um MACHO passa **na frente** de uma **estrela de fundo**, a **luz da estrela é focada** na Terra => A estrela parece mais brilhante por algumas horas ou dias.

Por ser um efeito fraco (comparado ao efeito devido a galáxias ou aglomerados) se fala de **microlensing**.

Pela **curva de luz** da estrela de fundo pode-se determinar a **massa** do **MACHO**. (mais detalhes na aula sobre Relatividade)



Curvas de luz de uma estrela durante um evento de microlensing



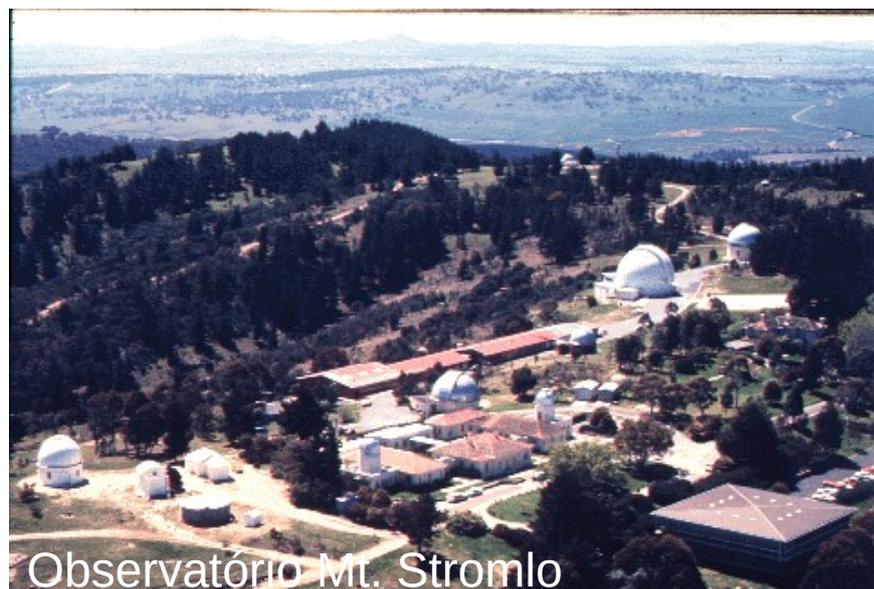
# Do que consiste a Matéria Escura?

## O Projeto MACHO

Observaram **12 mi. estrelas** na Grande Nuvem de Magalhães **de 1992 a 1998** com um telescópio no observatório Mt. Stromlo na Austrália.

Detectaram entre **13 e 17** eventos de microlensing.  
=> **Estimativa** do **número total** de **MACHOs** na **Via Láctea**.

Determinando as **massas** destes MACHOs, consegue-se estimar a **massa total** de **MACHOs** em nossa Galáxia.



# Do que consiste a Matéria Escura?

**MACHOs** ou **WIMPs**, então?

O Projeto e outros, similares, detectaram vários **MACHOs**  
=> eles **existem**,

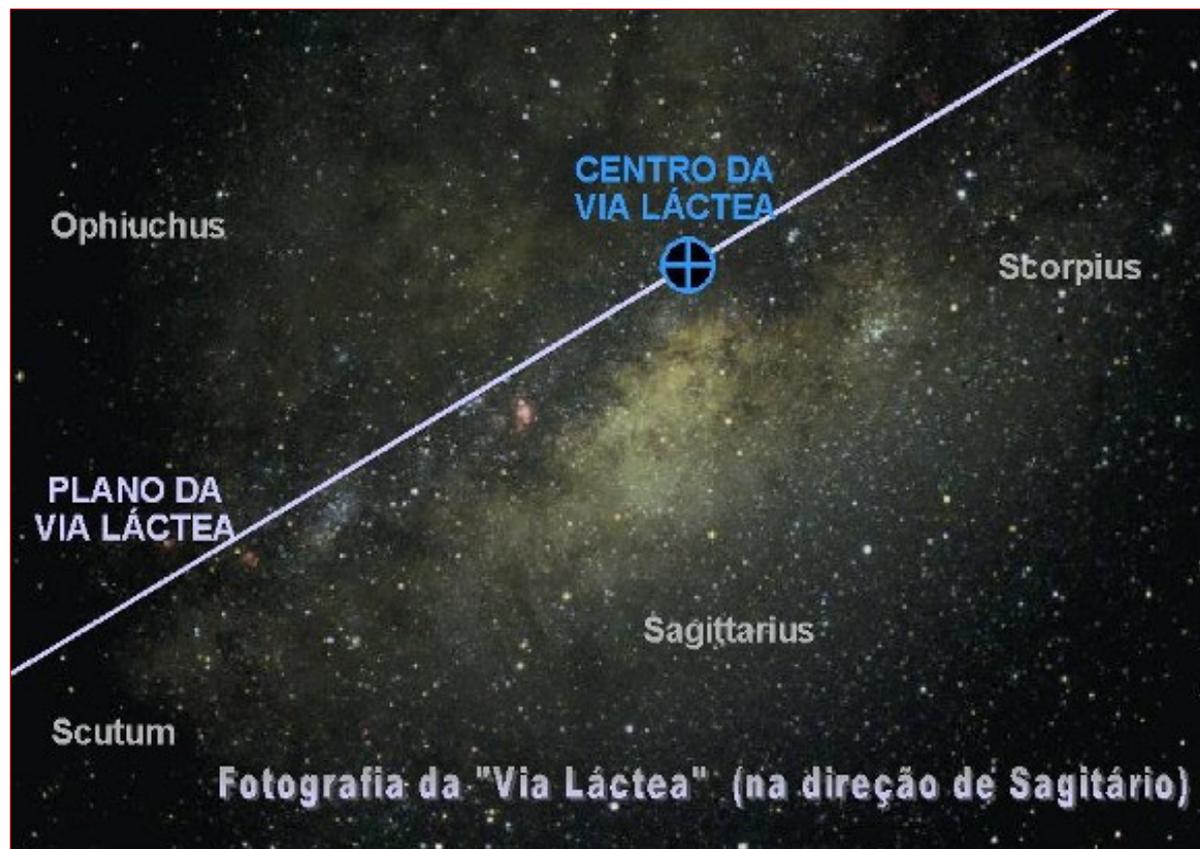
mas de longe **não** em número/massa **suficiente** para  
explicar a **Matéria Escura** na **Via Láctea**  
(compõem menos de 1 % do número suficiente).

=> A **Matéria Escura** deve consistir na maioria de **WIMPs**,  
**partículas elementares** ainda **não detectadas**.

Os chorões derrotaram os machões!

# O Centro Galáctico

A parte da Via Láctea mais **difícil** de **observar** é o **Centro**, escondendo-se atrás de **poeira** valendo **~30 magnitudes** de **extinção** no **ótico**, na constelação de **Sagitário**.



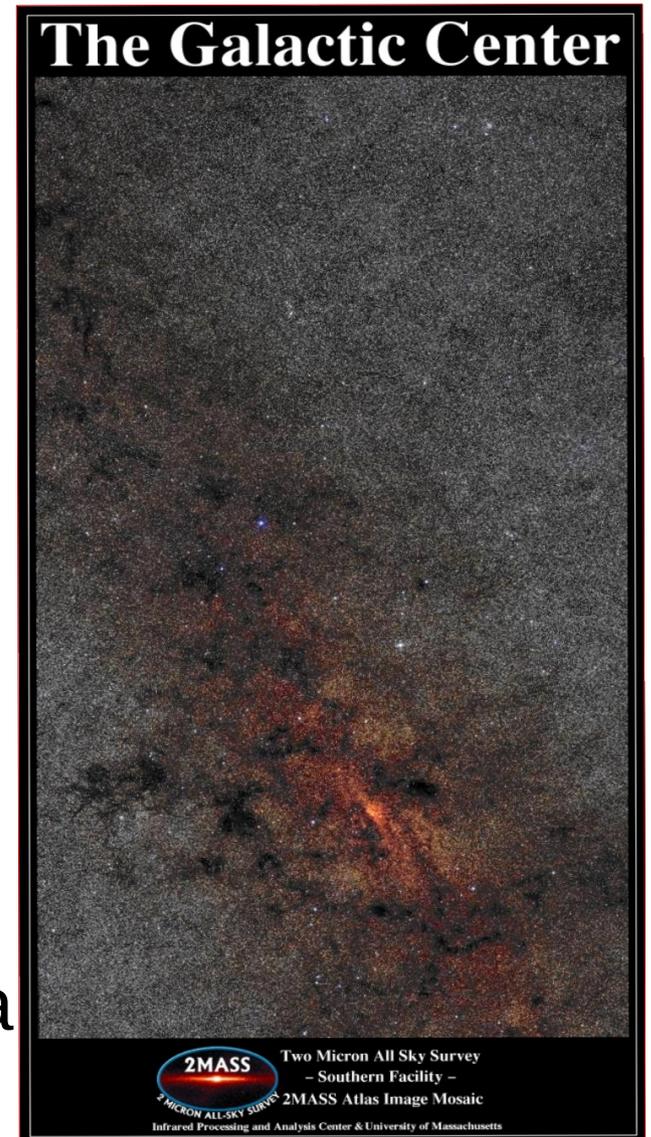
# O Centro Galáctico

=> Melhor observá-lo em **comprimentos de ondas** mais **longas**,  $\lambda > 1 \mu\text{m}$  (ou esperar 15 mio. anos).

Ao lado: O Centro Galáctico no infravermelho.

Observando na banda  $K$ ,  $\lambda \sim 2.2 \mu\text{m}$ , dá pra ver um **aglomerado denso** de **estrelas velhas**.

A densidade deste aglomerado cai como  $r^{-1.8}$  (quase  $r^{-2}$ , o perfil relaxado que resulta em uma curva de rotação constante).



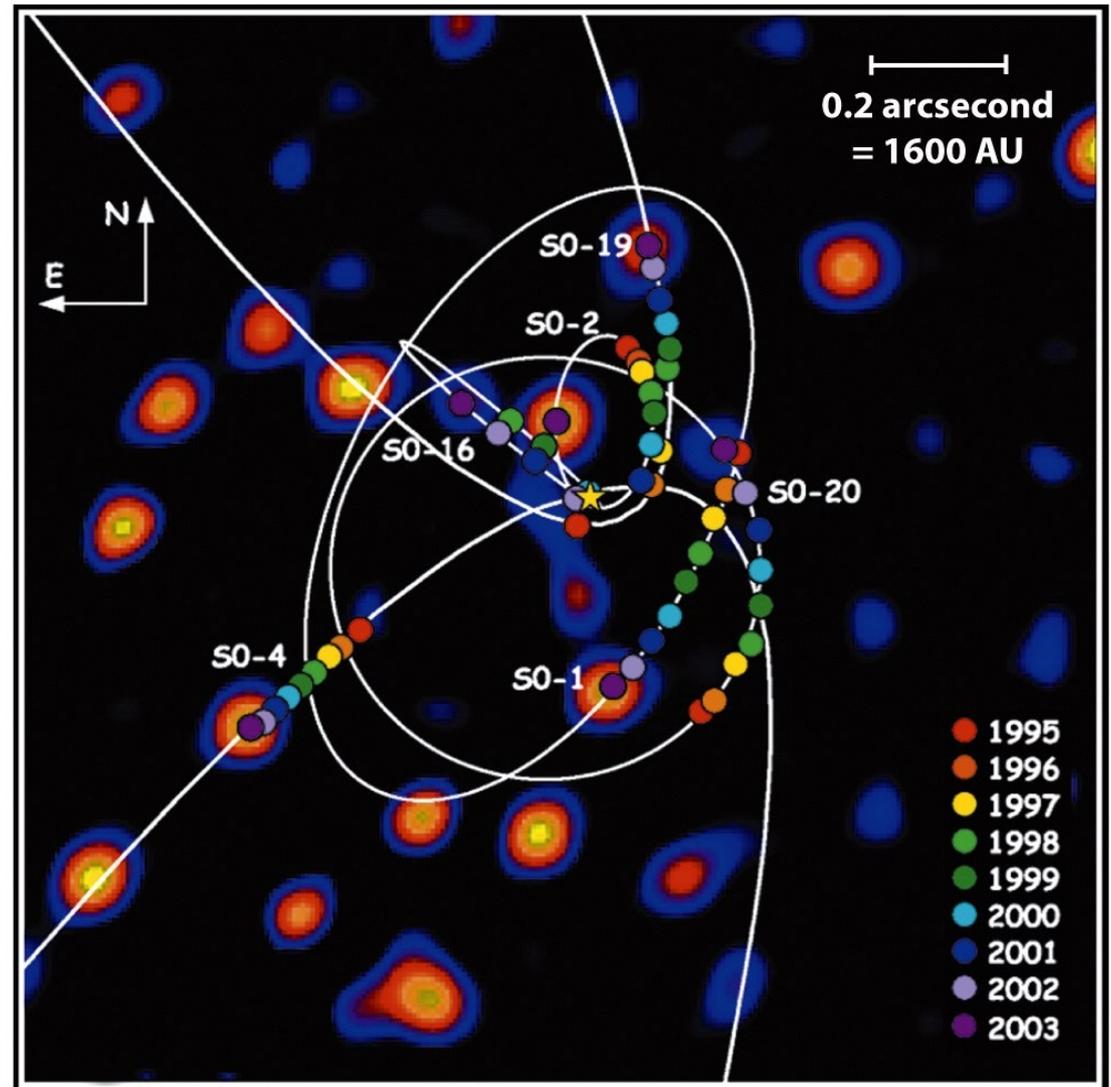
# O Centro Galáctico

Mais pro interior ainda, nos 2 pc centrais, a **densidade** parece **aumentar** mais **rapidamente** ainda, pelo menos com  $r^{-2.7}$ .



# O Centro Galáctico

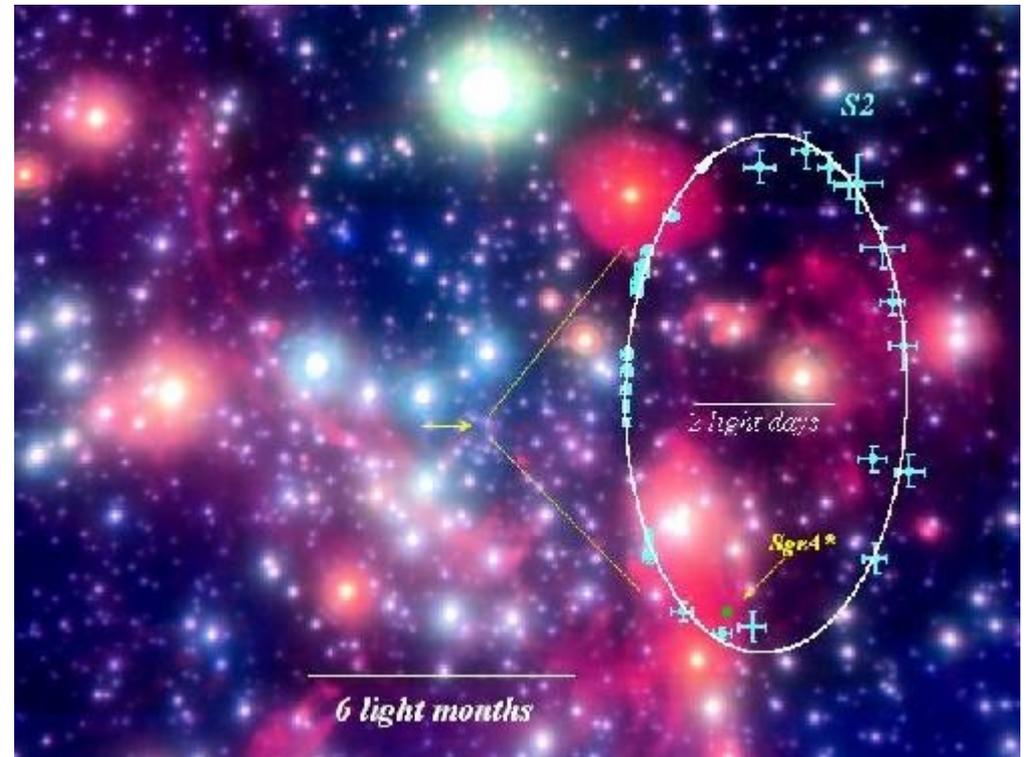
Nesta região, as **estrelas orbitam** algum **centro de massa**, ★, tão **rapidamente** que dá pra **observar** o **movimento**.



<https://www.youtube.com/watch?v=DRCD-zx5QFA>

# O Centro Galáctico

A estrela mais próxima do Centro Galáctico, S2, orbita Sgr A\* em apenas **15.2 anos**, chegando a **120 AU** do **Centro**, órbita só poucas vezes a de Plutão em torno do Sol!

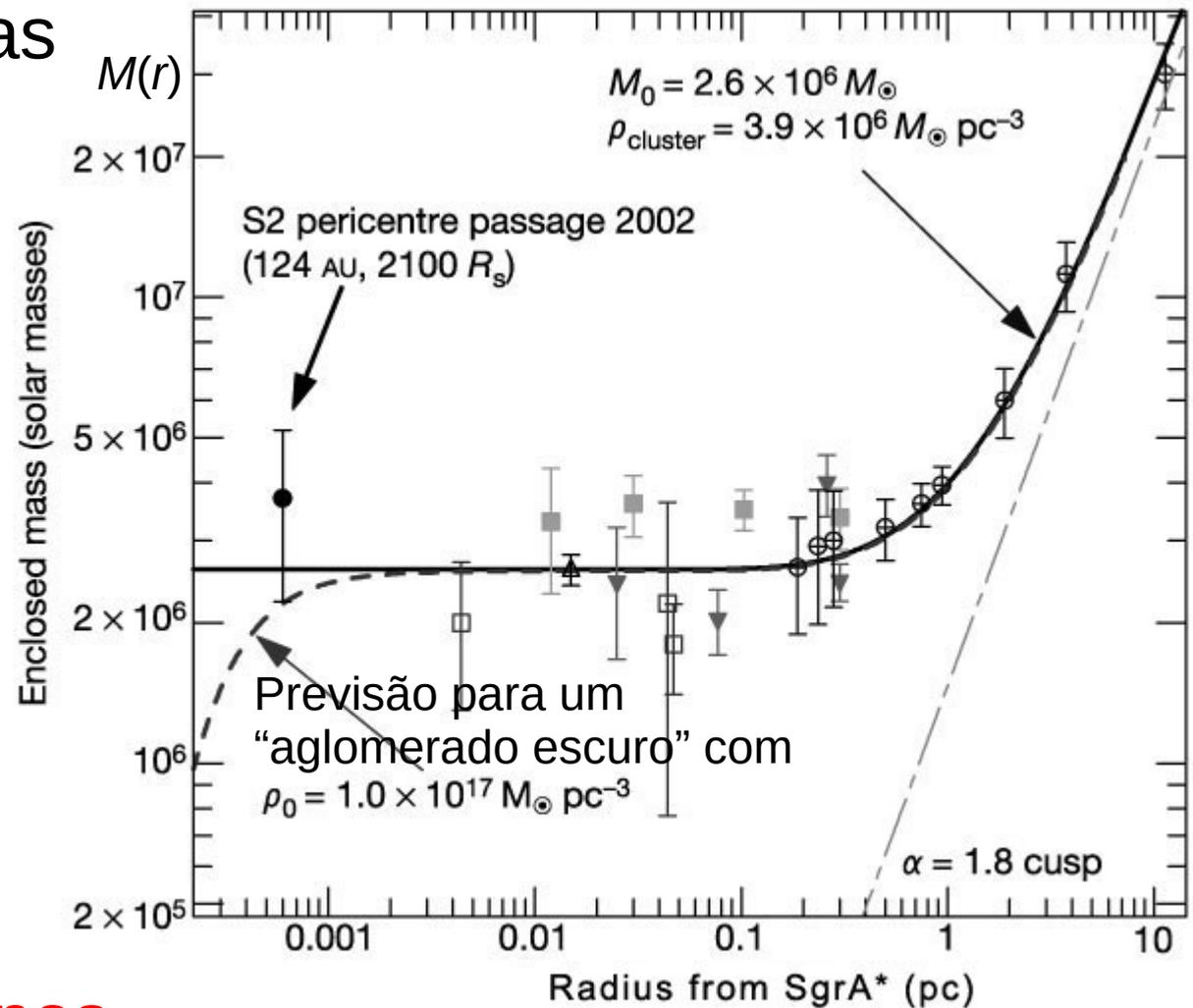


# O Centro Galáctico

Usando estas estrelas podemos fazer uma **curva de rotação**, e uma da **massa contida**,  $M(r)$  prop.  $v(r)^2$ , do **parsec central** da **Via Láctea**.

De 0.2 pc para 0.0006 pc,  $M(r)$  **não diminui**.

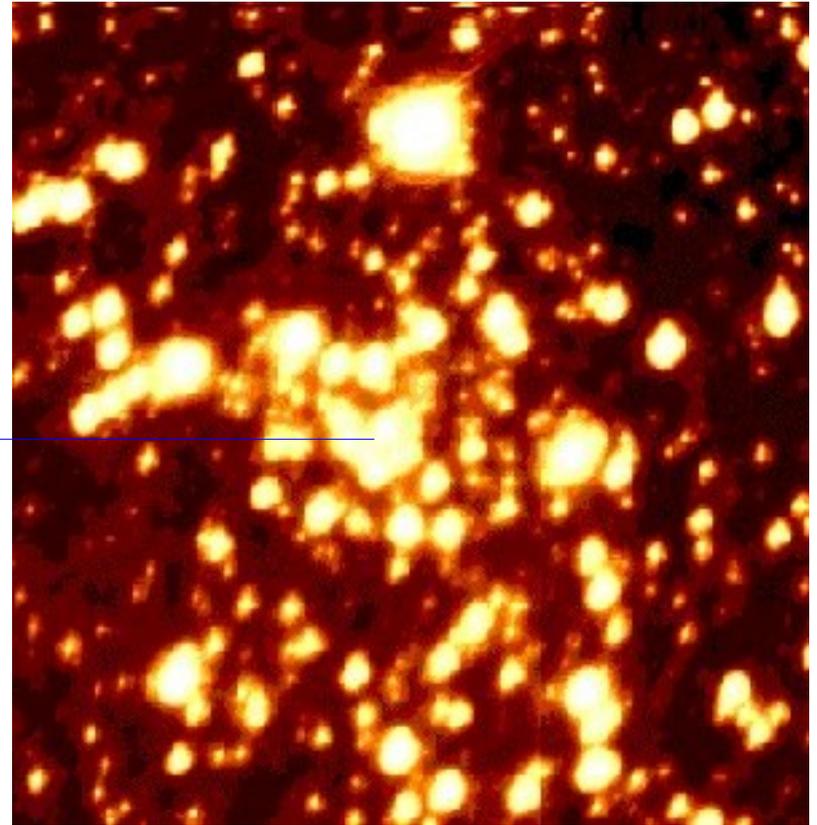
=> Nos **120 AU internos** da **Galáxia** se concentra uma **massa de 3.7 mio.  $M_{\odot}$** .



# O Centro Galáctico

O que poderia ser aquela **concentração de massa**?

Tem uma **fonte** misteriosa de **radiação infravermelha** na região, chamada IRS 16, aparentemente composta de **poucas estrelas de alta massa**, mas que de longe **não explica** 3.7 mio.  $M_{\odot}$ .

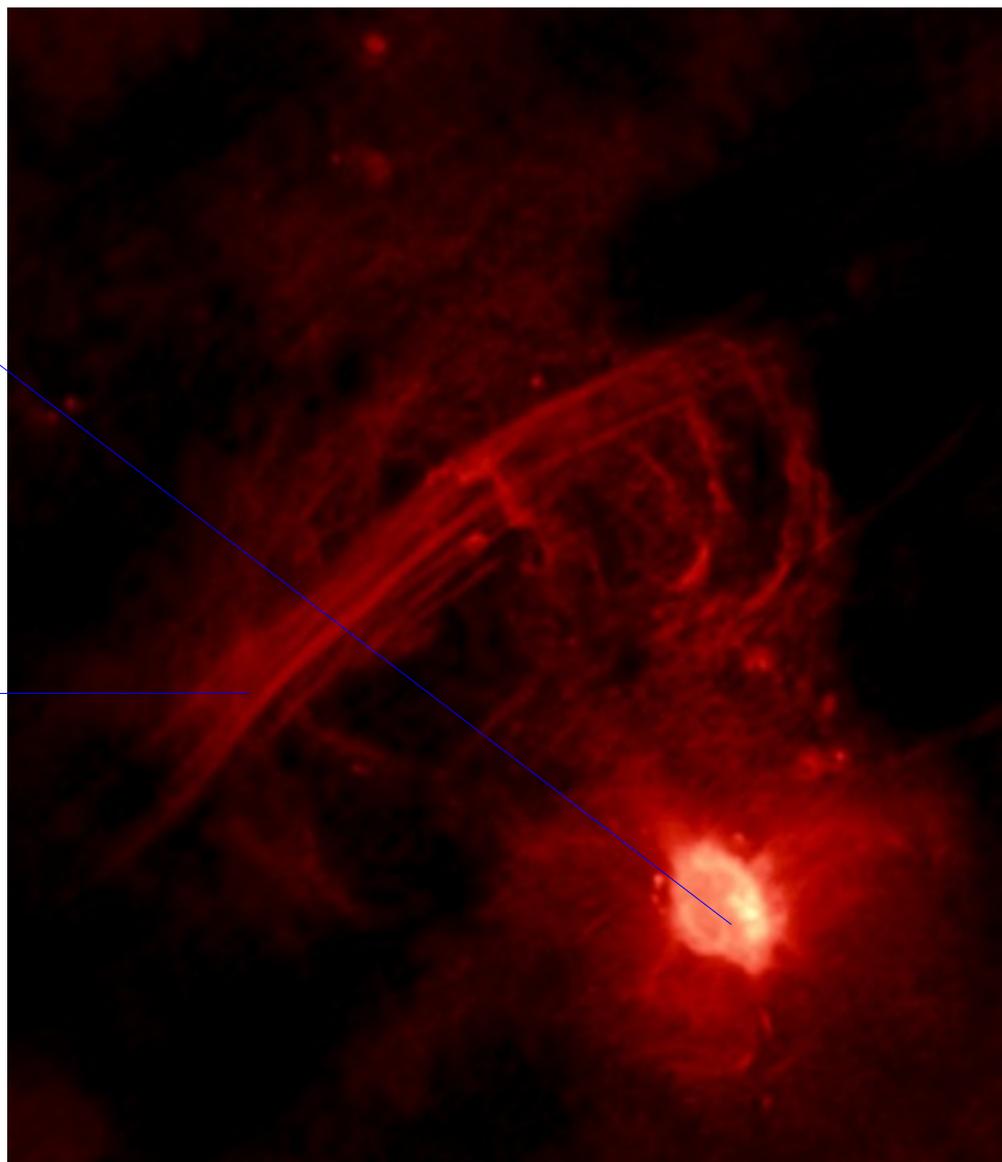


# O Centro Galáctico

Talvez observações no **rádio** dão uma dica?

Se vê um **disco nuclear** de **gás neutro** de alguns 100 pc a 1 kpc do Centro, um pouco inclinado com respeito ao Disco Galáctico.

De lá saem **filamentos** de uns 20 pc seguindo o **Campo Magnético Galáctico**. Estes indicam um **fluxo** de **material deixando a região central**.



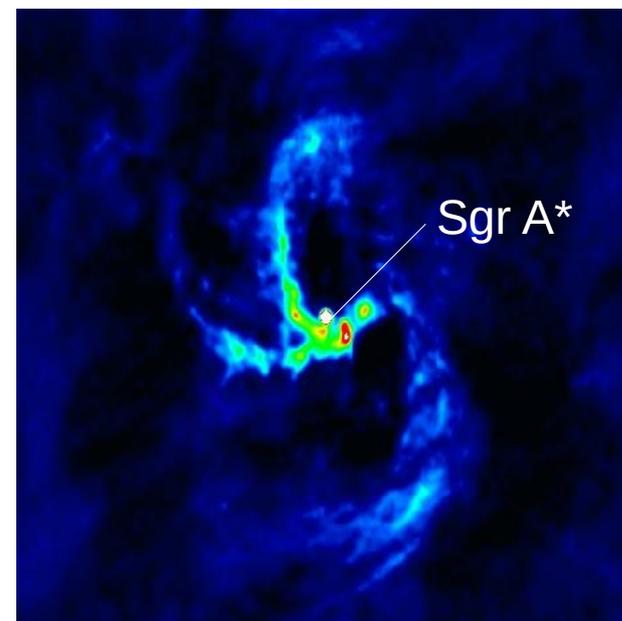
O Centro Galáctico no rádio

# O Centro Galáctico

Um *zoom* na região central deste disco revela a **fonte rádio Sagitário A**, que pode ser estudado com uma resolução de **2 AU**, empregando **interferometria** (=> aula Telescópios).

Lá encontramos um **disco molecular** de 2 pc a 8 pc do Centro, de 300 K a 400 K e  $n_{\text{H}_2}$  de  $1.5 \cdot 10^{10} \text{ m}^{-3}$  a  $5 \cdot 10^{10} \text{ m}^{-3}$ , um fator >20 mais **quente** e >150 mais **denso** que nuvens moleculares no Disco.

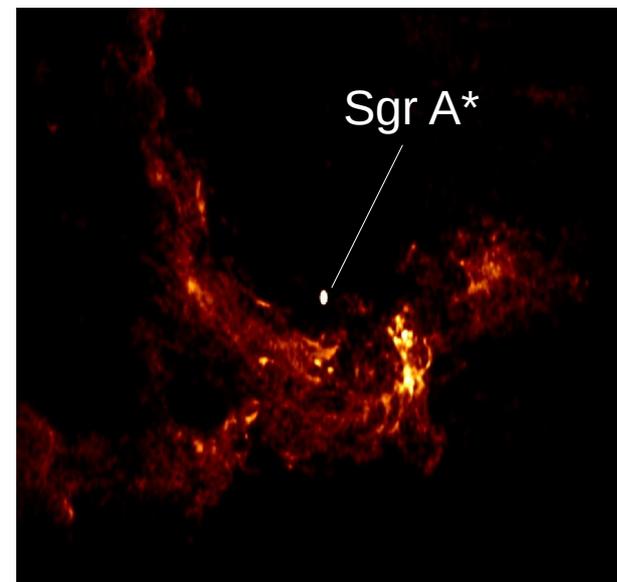
O **limite inferior** deste disco molecular é muito **nítido**, indicativo de algum **evento violento recente** (uma Supernova?).



Sagitário A Oeste

# O Centro Galáctico

Além disto encontra-se o remanescente de uma Supernova, chamado Sagitário A Leste, uma região H II em forma de mini-espiral, Sagitário A Oeste, e uma fonte pontiforme de radiação rádio mais forte, Sagitário A\* (Sgr A\*), que coincide com a massa, em torno daquela as estrelas orbitam, com o centro de IRS 16, e com uma fonte pequena ( $\leq 0.1$  pc) de raios X.



Sagitário A Oeste

Ao contrário de outros objetos na região central da Via Láctea, Sgr A\* não se movimenta.

Sgr A\* parece ser o verdadeiro Centro Galáctico.

# O Centro Galáctico

O que é, então, esta fonte, com **raio** de **no máximo 120 AU**, **massa** de **3.7 mio.  $M_{\odot}$** , e que emite relativamente **pouca radiação** ( $\leq 10^4 L_{\odot}$ )?

Será que é um **aglomerado denso** de **estrelas** de **baixa luminosidade** (Anãs Marrons / Estrelas de Nêutrons)?

Umas estrelas seriam ejetados dentro de  $10^8$  anos, outras colidiriam => **instável**.

A única explicação que conhecemos para um objeto tão denso e escuro é um **Buraco Negro Supermaciço**, em contraste aos **Buracos Negros Estelares** formados na morte de estrelas, de massas bem menores.

# O Buraco Negro Central da Via Láctea

O **Raio de Schwarzschild** ( $\Rightarrow$  aula Relatividade)

de um Buraco Negro desta massa é

$$R_{\text{Sgr A}^*} = 2GM_{\text{Sgr A}^*}/c^2 = 0.08 \text{ AU},$$

ainda **menor** que a **resolução** observacional de 2 AU da imagem em rádio de 3 slides atrás.

Calculando a **energia potencial gravitacional liberada** por **material** de massa  $M$  sendo **acretado** por esta massa (caindo da distância  $r_i$  até a distância  $r_f$  do centro da massa):

$$E = GM_{\text{Sgr A}^*}M/r_f - GM_{\text{Sgr A}^*}M/r_i = GM_{\text{Sgr A}^*}M(1/r_f - 1/r_i)$$

supondo  $r_f = R_{\text{Sgr A}^*}$  e  $r_i \gg r_f$ :

$$E = GM_{\text{Sgr A}^*}M/R_{\text{Sgr A}^*} = GM_{\text{Sgr A}^*}Mc^2/2GM_{\text{Sgr A}^*} = 1/2Mc^2$$

# O Buraco Negro Central da Via Láctea

Levando em conta que metade desta energia é usada para aquecer o disco de acreção (teorema do virial), obtemos para uma **acrecção** à **taxa**  $\dot{M}$  uma **luminosidade máxima** de:

$$L_{\max} = \frac{1}{2} \cdot dE/dt = \frac{1}{2} \cdot d[\frac{1}{2}Mc^2]/dt = \frac{1}{4} \cdot \dot{M}c^2$$

Para uma taxa  $\dot{M}$  de  $10^{-3}$  a  $10^{-2} M_{\odot}$  por ano,  $L_{\max}$  é da ordem de  $10^{10} L_{\odot}$  e mais que **explica** a **radiação** vinda de **Sgr A\***.

=> A explicação **Buraco Negro Supermaciço no Centro da Via Láctea** funciona (e é a única que conhecemos).

# O Buraco Negro Central da Via Láctea

De vez em quando deve cair uma **estrela** dentro do Buraco Negro, sendo destruída no caminho por **forças de maré**, e **aumentando** a **luminosidade** de **Sgr A\*** por **poucos anos**.

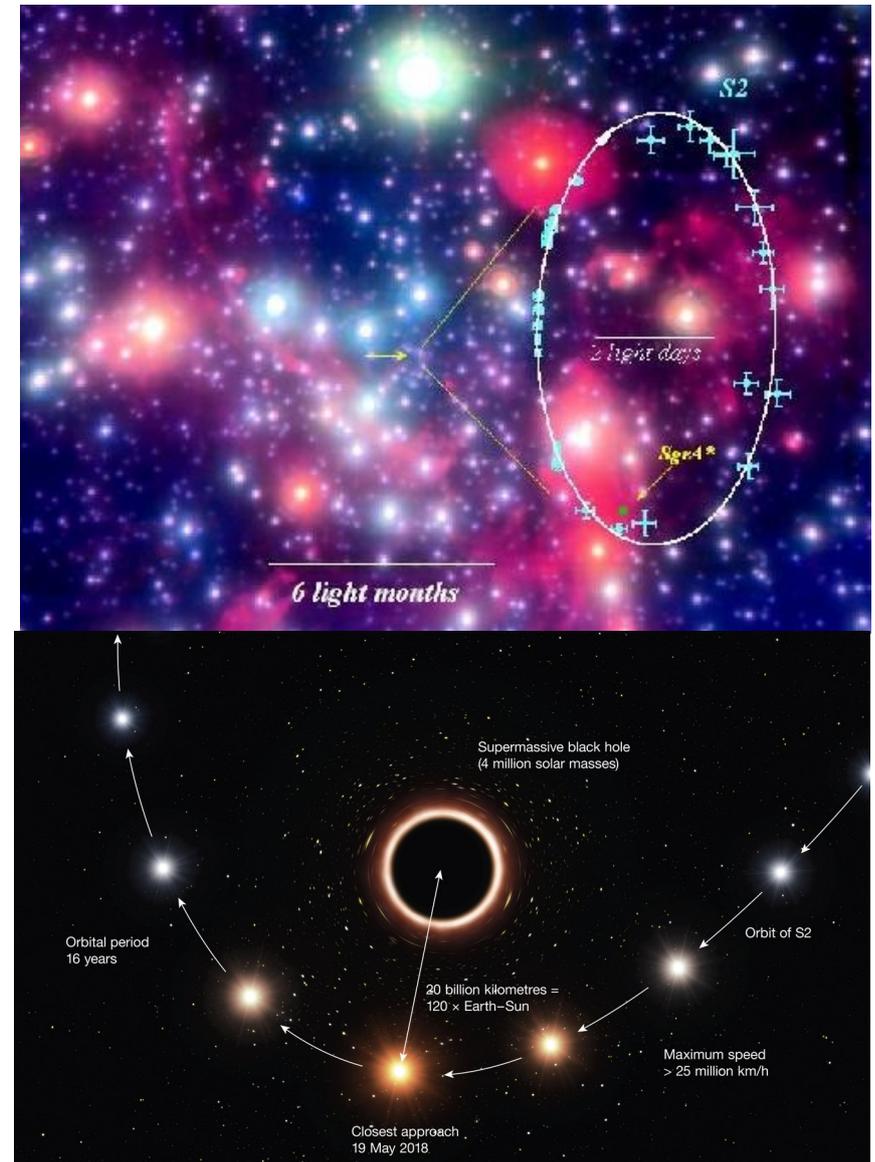
Em 2018, o instrumento GRAVITY da ESO detectou moitas de gás rodando a  $\sim 30\%$  a velocidade da luz numa órbita circular rente ao horizonte de eventos de Sgr A\*.



Simulação de material orbitando perto de um Buraco Negro

# O Buraco Negro Central da Via Láctea

Outra dica, de que se trata de um Buraco Negro, também vem de **S2** (aquela estrela que passa muito próximo do Centro Galáctico):  
Em 2018 observaram, também com o instrumento GRAVITY, no espectro desta estrela o **redshift gravitacional** e em 2020, a **precessão do perigalácticon** da sua órbita (fenômenos vistos na aula Relatividade).



# O Buraco Negro Central da Via Láctea

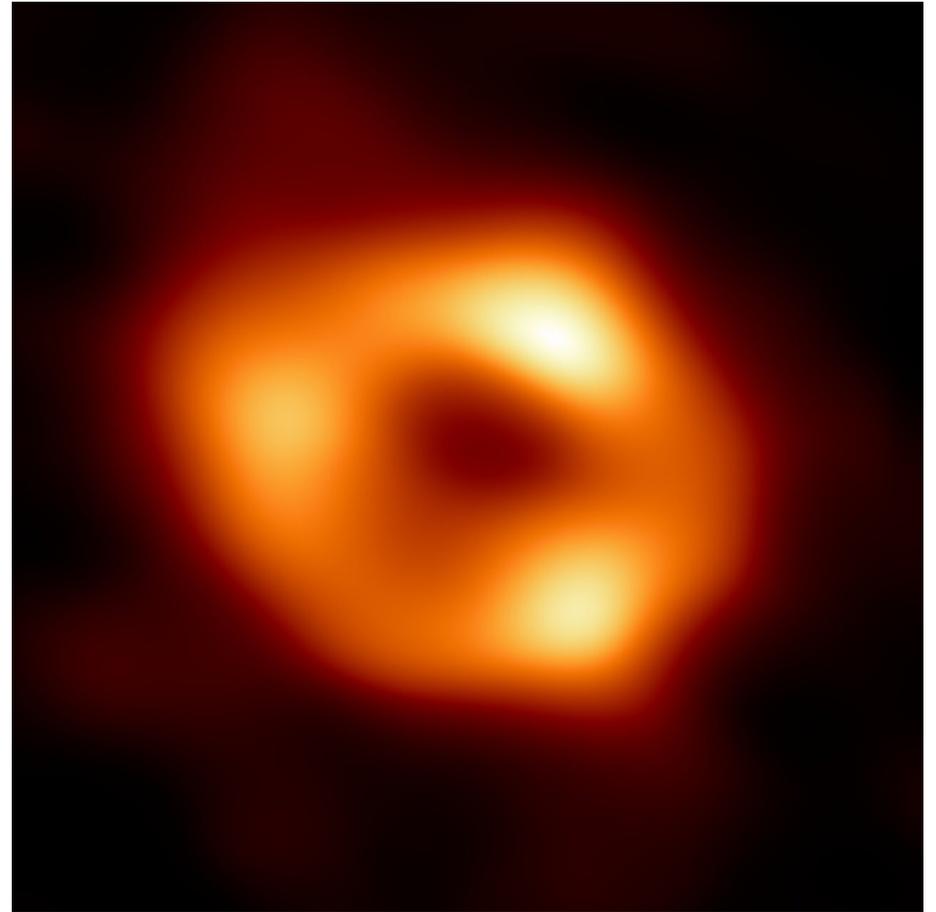
12/05/2022:

Publicada a “foto” (imagem em rádio) do **disco de acreção** em torno de Sgr A\* pelo *Event Horizon Telescope* (EHT), uma rede de VLBA (=> aula 3) estendendo-se pela Terra inteira:

- tirada em 2017 (5 anos de processamento de dados)
- **diâmetro**:  $\sim 50 \mu'' \Rightarrow \frac{1}{3} \text{ AU}$ ,

descartando ainda mais

possibilidades outras que um **Buraco Negro**.



# Resumo: Via Láctea

Classificada como do **tipo SBbc** pela sequência de Hubble (=> próxima aula), uma **galáxia espiral barrada** tipo bc.

**Massa** (luminosa:  $9 \cdot 10^{10} M_{\odot}$ , total:  $\sim 2 \cdot 10^{12} M_{\odot}$ )

**Diâmetro**:  $\sim 50$  kpc (Disco),  $> 200$  kpc (Halo Estelar),  
 $> 460$  kpc (Halo de Matéria Escura)

**Número de Estrelas**: 2 a  $4 \cdot 10^{11}$

**Luminosidade**:  $3.6 \cdot 10^{10} L_{\odot}$  (na banda *B*:  $2.3 \cdot 10^{10} L_{\odot}$ )

**Idade**:  $\sim 13$  Gyr

**Distância Sol-Centro**: 8 kpc

**Comprimento da Barra**: 4.4 kpc.

**Buraco Negro Central**: 3.7 mio.  $M_{\odot}$

# Resumo: Via Láctea

## Propriedades dos Componentes

Disks			
	Neutral Gas	Thin Disk	Thick Disk
$M$ ( $10^{10} M_{\odot}$ )	$0.5^a$	6	0.2 to 0.4
$L_B$ ( $10^{10} L_{\odot}$ ) <sup>b</sup>	—	1.8	0.02
$M/L_B$ ( $M_{\odot}/L_{\odot}$ )	—	3	—
Radius (kpc)	25	25	25
Form	$e^{-z/h_z}$	$e^{-z/h_z}$	$e^{-z/h_z}$
Scale height (kpc)	< 0.1	0.35	1
$\sigma_w$ ( $\text{km s}^{-1}$ )	5	16	35
[Fe/H]	> +0.1	-0.5 to +0.3	-2.2 to -0.5
Age (Gyr)	$\lesssim 10$	$8^c$	$10^d$

Spheroids			
	Central Bulge <sup>e</sup>	Stellar Halo	Dark-Matter Halo
$M$ ( $10^{10} M_{\odot}$ )	1	0.3	$190^{+360}_-170^f$
$L_B$ ( $10^{10} L_{\odot}$ ) <sup>b</sup>	0.3	0.1	0
$M/L_B$ ( $M_{\odot}/L_{\odot}$ )	3	$\sim 1$	—
Radius (kpc)	4	> 100	> 230
Form	boxy with bar	$r^{-3.5}$	$(r/a)^{-1} (1 + r/a)^{-2}$
Scale height (kpc)	0.1 to 0.5 <sup>g</sup>	3	170
$\sigma_w$ ( $\text{km s}^{-1}$ )	55 to 130 <sup>h</sup>	95	—
[Fe/H]	-2 to 0.5	< -5.4 to -0.5	—
Age (Gyr)	< 0.2 to 10	11 to 13	$\sim 13.5$

<sup>a</sup>  $M_{\text{dark}}/M_{\text{gas}} \simeq 0.007$ .

<sup>b</sup> The total luminosity of the Galaxy is  $L_{B,\text{tot}} = 2.3 \pm 0.6 \times 10^{10} L_{\odot}$ ,  
 $L_{\text{bol,tot}} = 3.6 \times 10^{10} L_{\odot}$  ( $\sim 30\%$  in IR).

<sup>c</sup> Some open clusters associated with the thin disk may exceed 10 Gyr.

<sup>d</sup> Major star formation in the thick disk may have occurred 7–8 Gyr ago.

<sup>e</sup> The mass of the black hole in Sgr A\* is  $M_{\text{bh}} = 3.7 \pm 0.2 \times 10^6 M_{\odot}$ .

<sup>f</sup>  $M = 5.4^{+0.2}_{-3.6} \times 10^{11} M_{\odot}$  within 50 kpc of the center.

<sup>g</sup> Bulge scale heights depend on age of stars: 100 pc for young stars, 500 pc for old stars.

<sup>h</sup> Dispersions increase from 55  $\text{km s}^{-1}$  at 5 pc to 130  $\text{km s}^{-1}$  at 200 pc.

# Resumo: Via Láctea

**1.** All the stars, gas clouds, and dust particles within the disk orbit around the center of the Galaxy. They are held in orbit by the combined gravitational effects of the other parts of the Galaxy.

**2.** Dark dust lanes indicate where spiral density waves cause material to pile up as it orbits the galactic center. Gas is compressed as it passes through these regions, triggering the formation of new stars.

**3.** Hot, blue, massive O and B stars begin their formation in the dark dust lanes, then appear fully formed some distance “downstream” of the dust lanes. These stars have short main-sequence lifetimes, so they die out before they travel too far around the disk from their birthplace.

**4.** Most of the stars produced in the dust lanes are relatively faint, with 1 solar mass or less. These long-lived stars complete many round trips around the Galaxy during a main-sequence lifetime. (Our Sun has made more than 20 round trips in the 4.56 billion years since it formed.)

**5.** As a star in the disk evolves, it produces metals. Much of a star’s metal-enriched material is returned to the interstellar medium when it dies. When this material is next compressed by a density wave, it is incorporated into a new generation of stars. Thus the disk contains many metal-rich stars of Population I. Our Sun is one example.

**6.** The density waves do not penetrate to the center of the Galaxy, so new stars are not presently forming there. The blue O and B stars have long since died out, so the bulge has a yellowish color. It contains both old Population I stars and even older Population II stars (metal-poor stars from the first generation of stars to form in the Galaxy).

**7.** Also orbiting the Galaxy are the globular clusters. These star clusters have no mechanism to trigger star formation, so they contain only very old, metal-poor Population II stars. Studies of these clusters suggest that the first stars formed in them about 13.6 billion years ago — a mere 100 million years after the Big Bang.

**8.** Not visible to any telescope is the Galaxy’s dark matter, which emits no electromagnetic radiation of any kind. The spherical halo of dark matter that envelops our Galaxy has at least 10 times the combined mass of all of the Galaxy’s stars, planets, gas, and dust. Its fundamental nature remains a mystery.

Orbital motion

R I V U X G

R I V U X G

(Image of spiral galaxy M101: NASA and ESA; image of globular cluster M3: S. Kafka and K. Honeycutt, Indiana University/WIYN/NOAO/NSF)

# Resumo: Via Láctea

## A Via Láctea, em diferentes "cores"

*Visível*



*Radio*



*Hidrogênio Atômico*



*Hidrogênio Molecular*



*Infravermelho*



*Infravermelho Próximo*



*Raio X*



*Raio Gama*





Universidade Federal do ABC

# Noções de Astronomia e Cosmologia

## FIM PRA HOJE

