

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

A VIA LÁCTEA



Definição:

Uma galáxia é um conjunto de matéria estelar e interestelar:

- estrelas, gás, poeira, estrelas de nêutrons, buracos negros, matéria escura e raios cósmicos (90% p, 9% é + elementos pesados)**
- isolado no espaço e mantido junto pela sua própria gravidade.**

Número total de galáxias: 1-2 trilhões.

A nossa Galáxia é denominada Via Láctea ou simplesmente Galáxia com G maiúsculo.

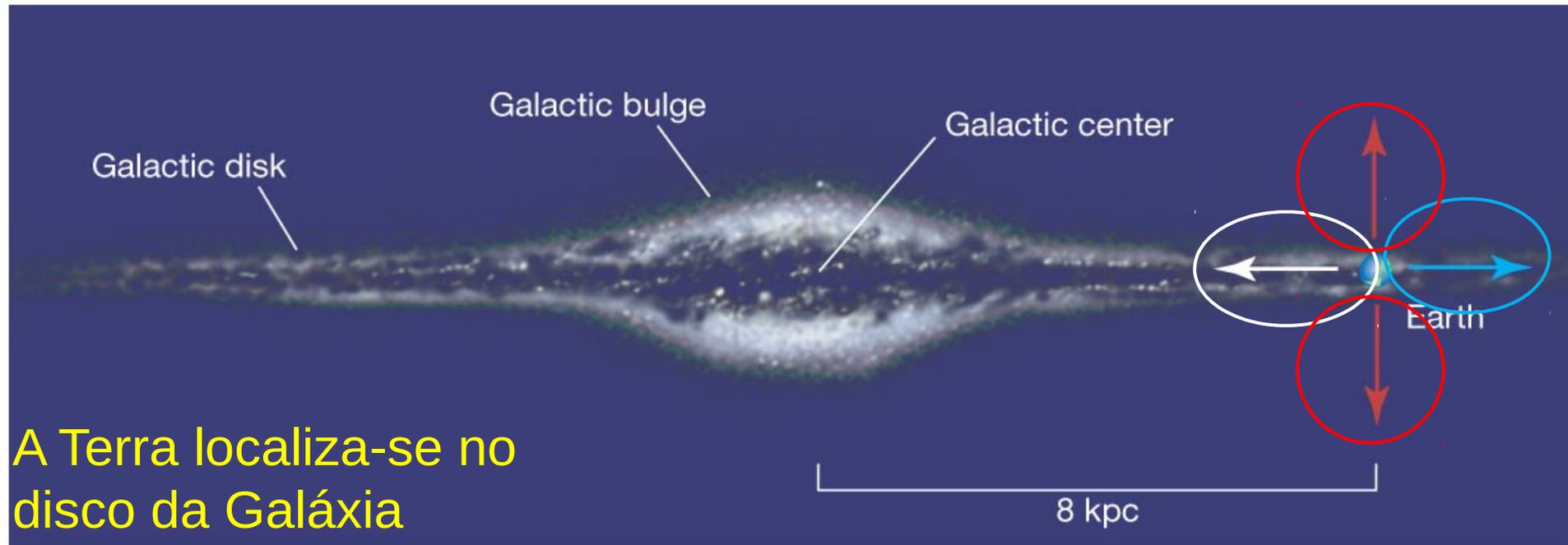


VIA LACTEA

Povos da Índia: *Akash Ganga* (o Ganges do céu)

Tribo Kung, no deserto do Kalahari: a espinha dorsal do céu

Localização do sistema solar na Galáxia



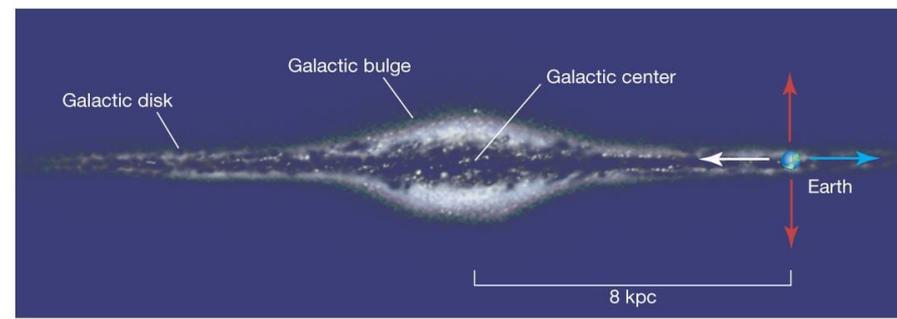
(a) Artist's view of Milky Way from afar

Como a Galáxia é observada a olho nu da Terra :

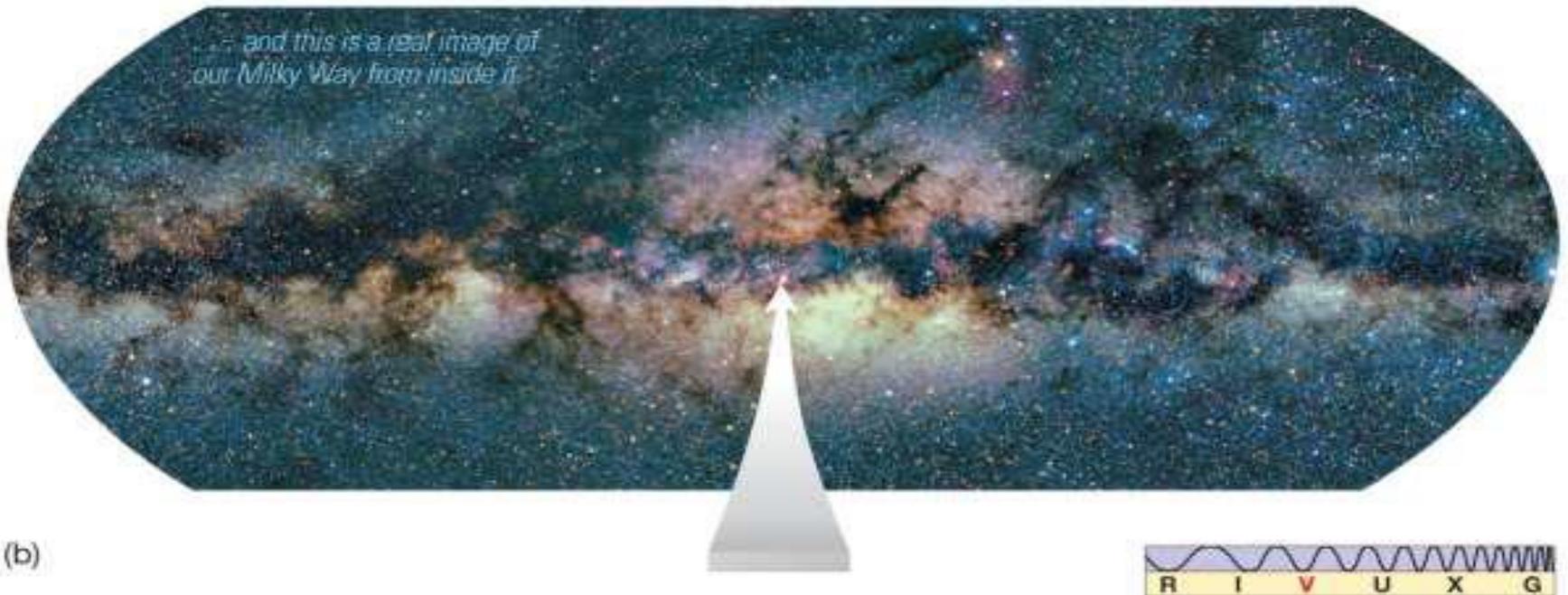
Seta branca \Rightarrow grande número de estrelas contidas numa faixa de luz (VIA LÁCTEA)

Seta azul \Rightarrow faixa de luz mais tênue (direção oposta ao centro da Galáxia)

Setas vermelhas \Rightarrow poucas estrelas são vistas



(a) Artist's view of Milky Way from afar

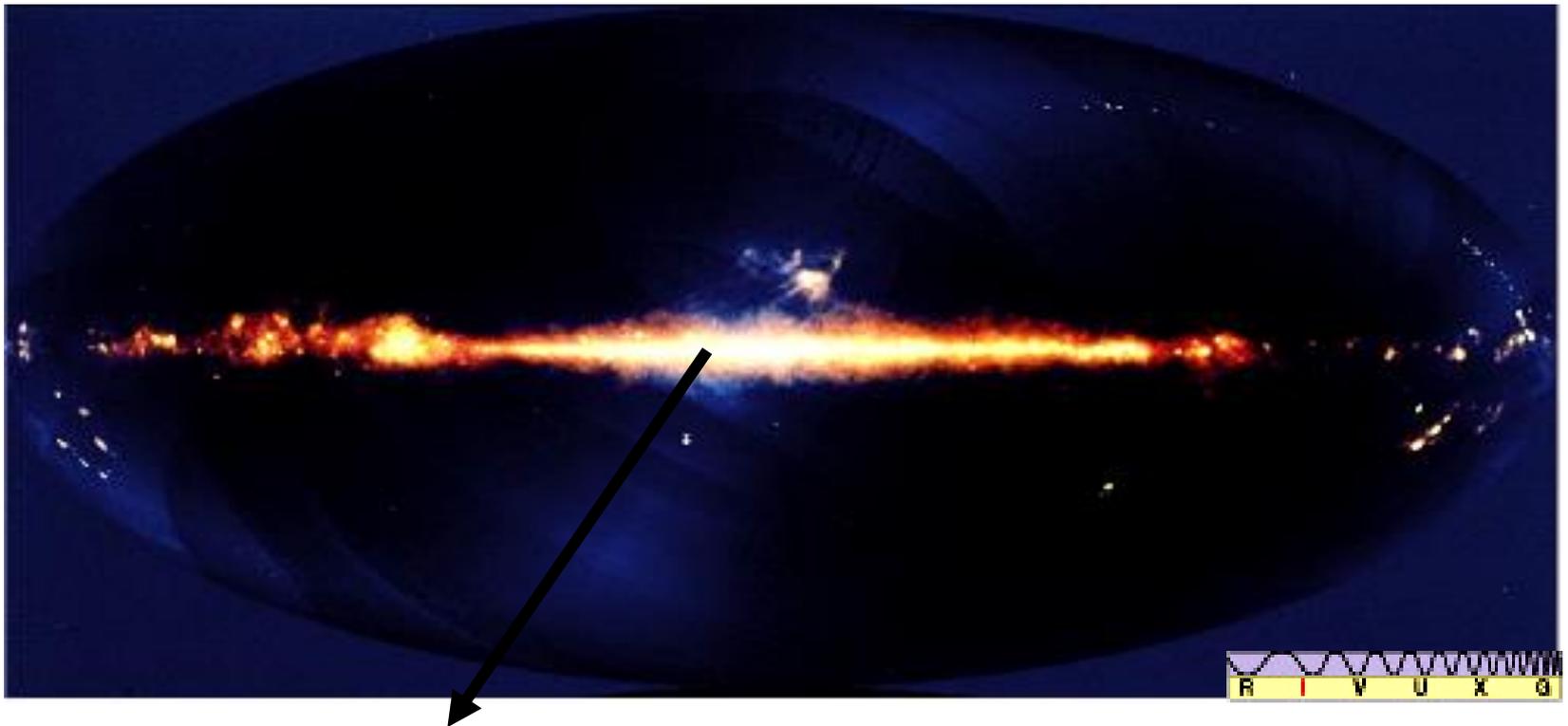


(b)

DIREÇÃO SETA BRANCA

Decifrando a forma da Galáxia

Vista de um satélite infravermelho do céu ao redor da Terra

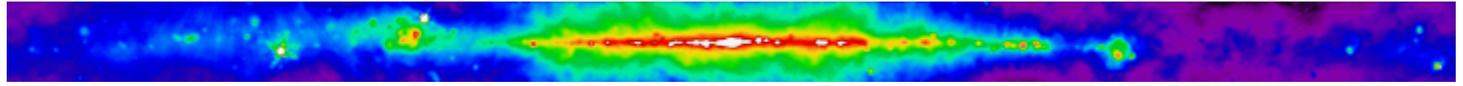


Disco da Galáxia

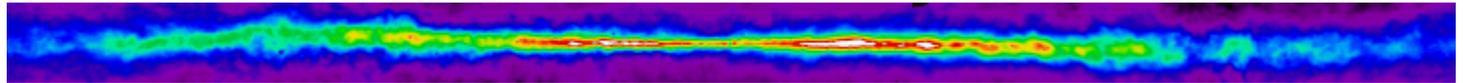
Vista mais brilhante do disco: a radiação infravermelha é emitida por poeira presente em grande quantidade no disco.

Decifrando a forma da Galáxia

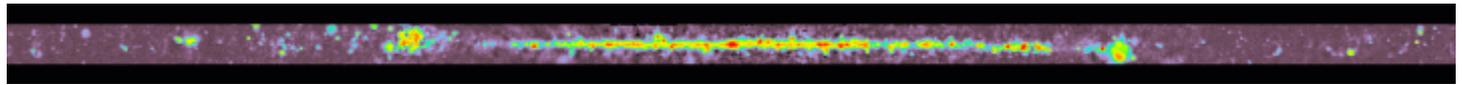
Rádio (0.4 GHz)



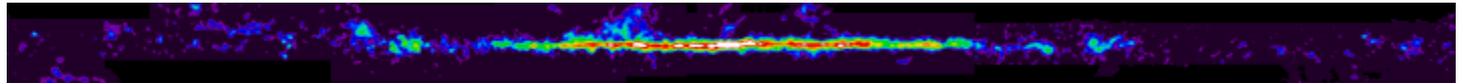
H Atômico (HI)



Rádio (2.7 GHz)



H Molecular



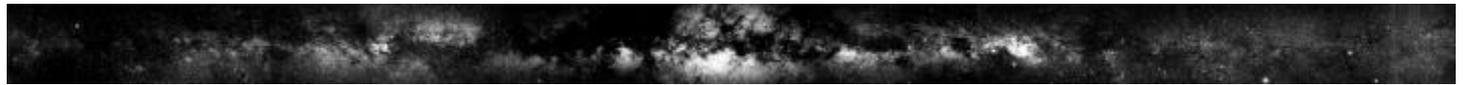
Infravermelho



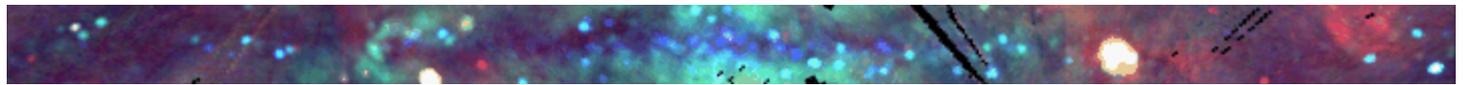
IR próximo



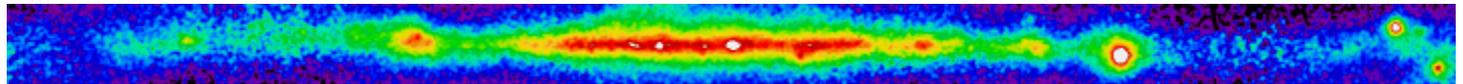
Ótico



Raios X



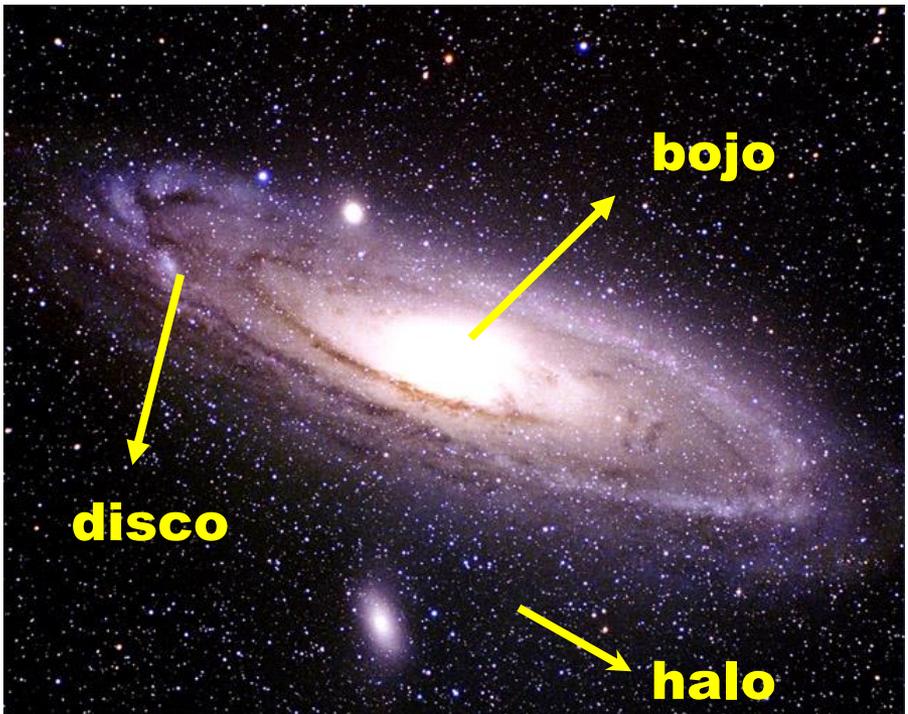
Raios Gama



Decifrando a forma da Galáxia

Comparação com outras galáxias distantes

**A
N
D
R
Ô
M
E
D
A**



maior galáxia mais próxima à nossa Galáxia
800 kpc (~2.5 milhões de anos-luz)

Medindo a Galáxia

Contagem de estrelas

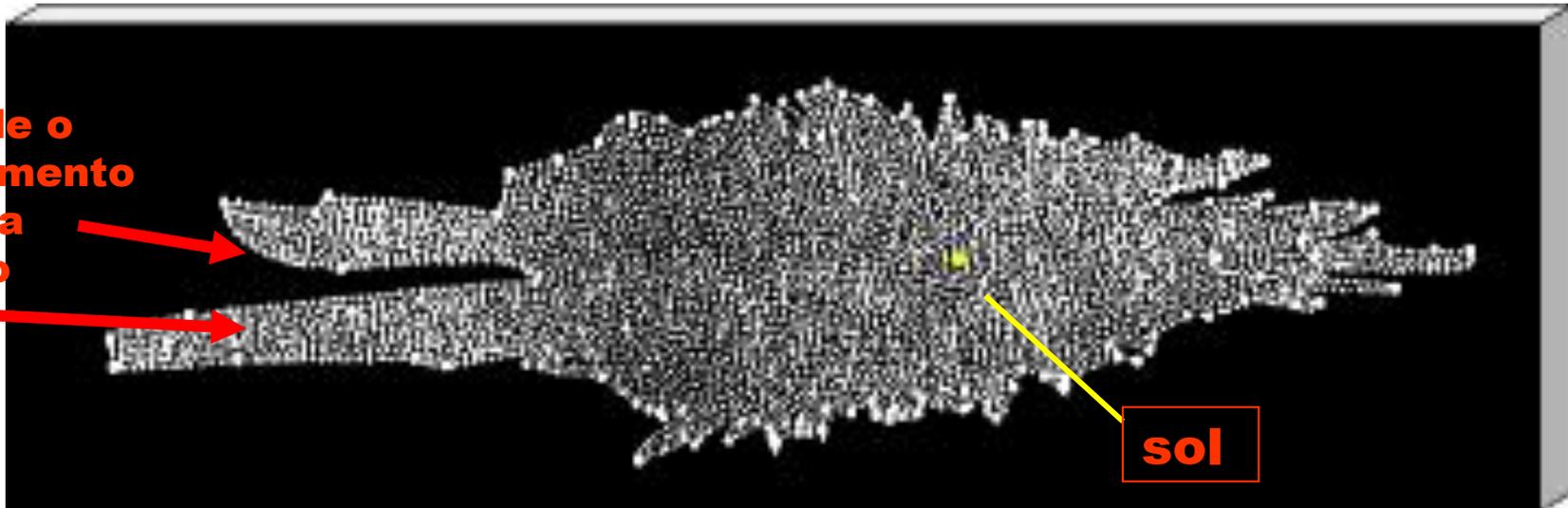
Willian Herschel (final do século XVIII):

- estimativa da forma da Galáxia através da contagem de estrelas em diferentes direções no céu (observações no visível)
- assume que as estrelas tem aproximadamente brilhos iguais: diferença de brilho = diferença de distância

Não levou em conta a atenuação da luz visível das estrelas pelo meio interestelar (gás e poeira).

somente em 1930 os astrônomos descobriram a importância da extinção interestelar

Zonas onde o obscurecimento é menor na direção do centro



Sol próximo ao centro e Galáxia com formato achatado

Medindo a Galáxia

Estimativa de tamanho

Início do século XX: dimensões da galáxia (disco) de 10 kpc de diâmetro e 2 kpc de espessura e o Sistema solar próximo ao centro.

Hoje : Galáxia com ~25 kpc de diâmetro e Sistema solar ~ 8 kpc do centro.

Nebulosas espirais e aglomerados globulares

- **No início do século XX: não havia medidas precisas de distância (logo tb de tamanho) além da paralaxe trigonométrica (estrelas mais próximas)**
- **Galáxia com uma distribuição esferoidal (achatada) e estática de estrelas**



aglomerados globulares e “nebulosas espirais” observados dentro ou fora da distribuição de estrelas?

Shapley e Curtis (1920): O grande debate : O que são as "nebulosas espirais"

Harlow Shapley: defendeu a hipótese nebular convencional: são objetos da nossa Galáxia .

•Heber Curtis: defendeu a hipótese dos universos-ilha: são outras galáxias como a nossa.

•Principal questão: qual é a distância das nebulosas espirais?

•Debate inconclusivo

**O debate só evoluiu quando se descobriu um novo estimador de distância de objetos celestes:
ESTRELAS VARIÁVEIS EM BRILHO**

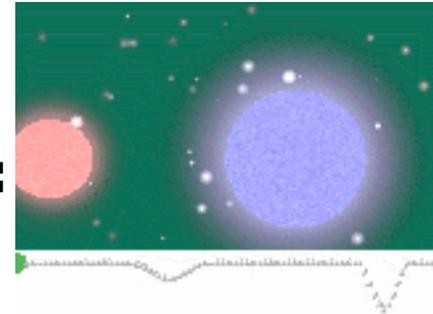


Estrela variável: a sua luminosidade varia com o tempo

Tipos de variáveis:

1. Estrelas associadas a um sistema binário:

- binárias eclipsantes
- novas
- supernovas de tipo Ia

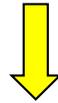


**variáveis cataclísmicas
grandes variações de brilho**

2. variáveis intrínsecas (não associadas a um sistema binário)

VARIÁVEIS INTRÍNSECAS

classe importante:
Estrelas Variáveis Pulsantes

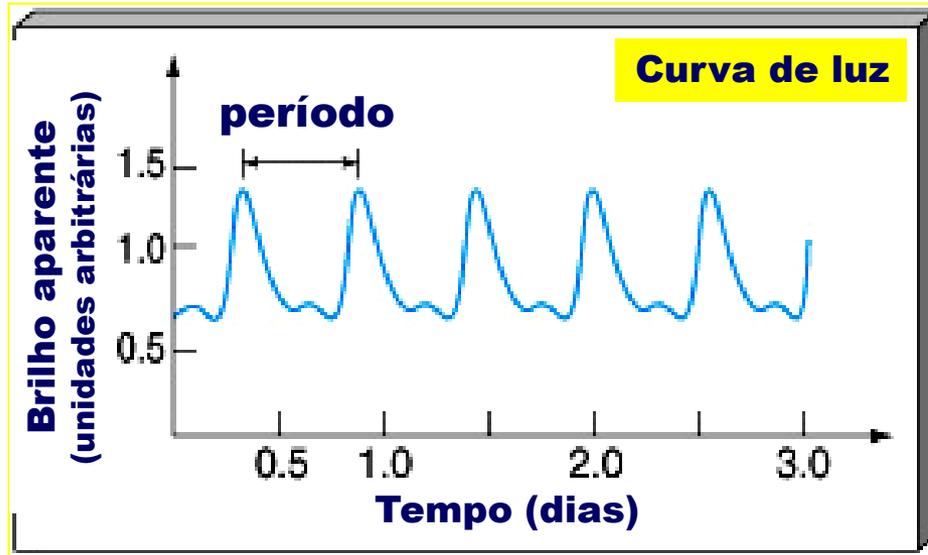


- ❖ **variam o brilho com períodos bem definidos**
- ❖ **Determinando período \Rightarrow determina-se L**

Dois tipos são bons determinadores de distância na Galáxia e em galáxias vizinhas:

- **RR Lyrae**
- **Cefeidas**

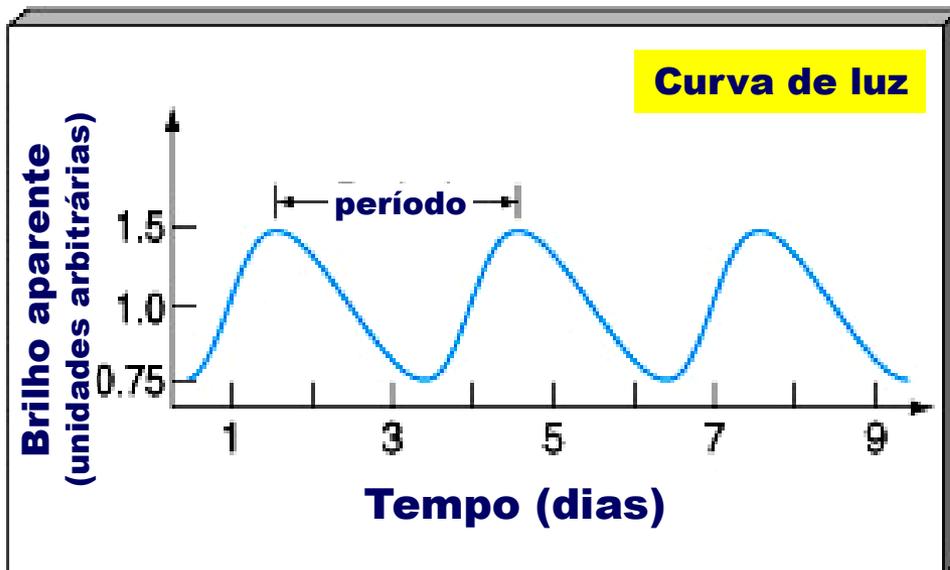
RR LYRAE



**Períodos observados entre diferentes RR Lyrae:
0,5 a 1 dia**

Uma estrela variável pode ser identificada apenas pela variação da luz emitida por ela.

CEFEIDAS



**Períodos observados entre diferentes Cefeidas :
1 a 100 dias**

Cefeida no seu mínimo e máximo de brilho
duas fotografias da mesma região do céu sobrepostas
em posições diferentes

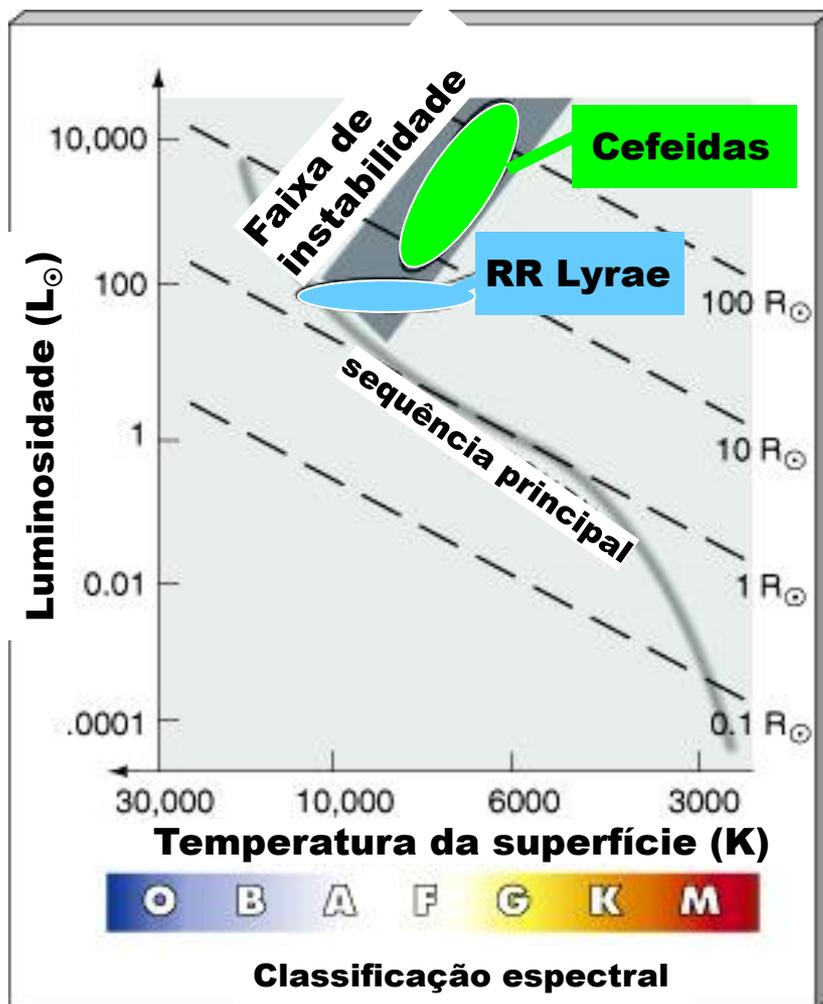


Porque as estrelas pulsam?

1. estrela expande na fase pós sequencia principal
2. radiação sai livremente  **BRILHO AUMENTA** 
3. Diminui a T das camadas externas pela expansão
4. estrela contrai um pouco  **BRILHO DIMINUI** 

Dadas certas condições, as estrelas entram nesta fase de instabilidade fazendo com que experimentem variações de tamanho e brilho ⇒ PULSAÇÕES

Todas as estrelas passam por esta fase de instabilidade (pulsação) num tempo muito curto de sua evolução.



pulsações ocorrem sempre após a estrela deixar a sequência principal

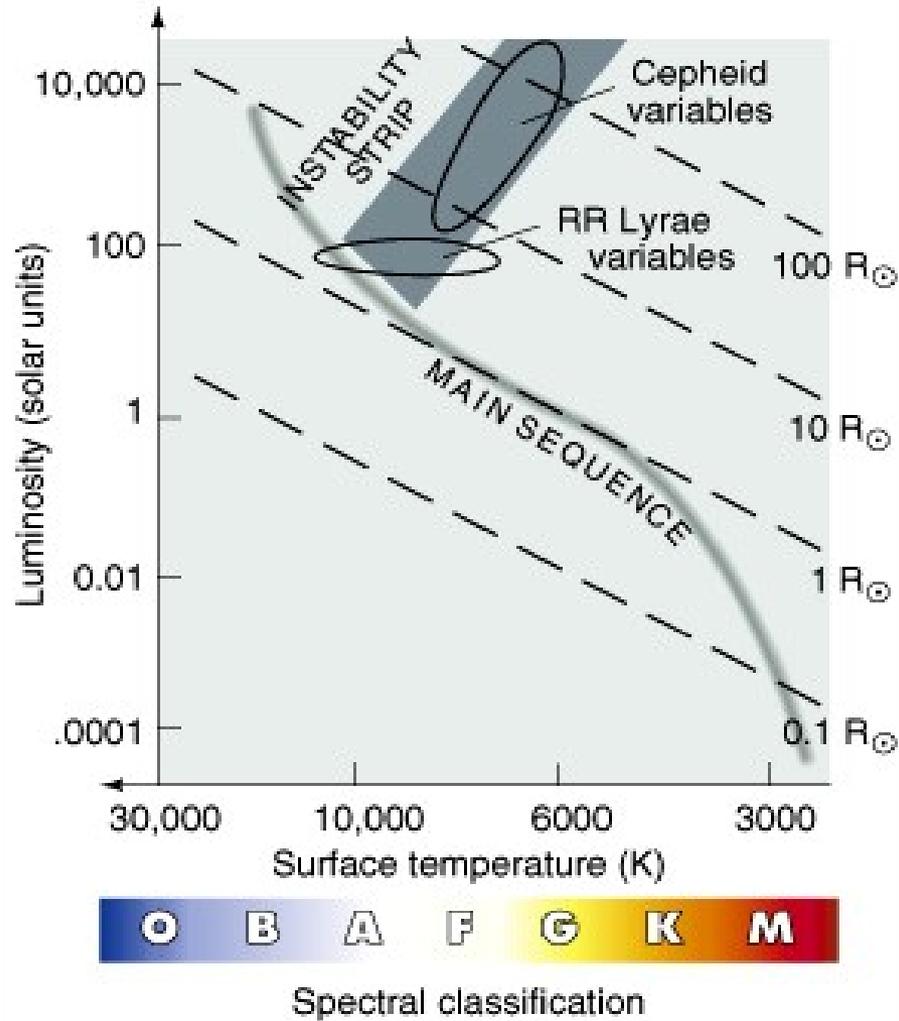
Cefeida : estrela de mais alta massa que evolui para a faixa de instabilidade na fase de gigante ou supergigante.

RR Lyrae : estrela de mais baixa massa que evolui para a faixa de instabilidade na fase de gigante.

Localização na Galáxia

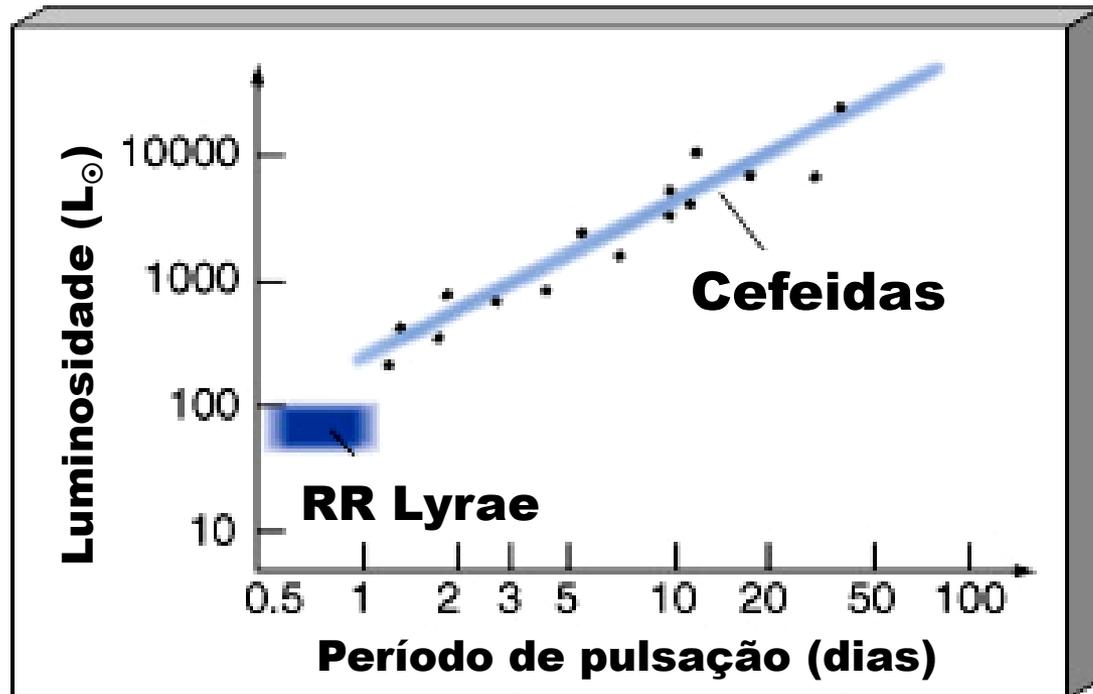
**RR Lyrae (período de horas):
gigantes velhas encontradas
no halo ou em aglomerados
globulares**

**Cefeidas (período de dias)
gigantes e supergigantes
⇒ jovens em braços de espirais:
aglom. abertos e associações
OB**



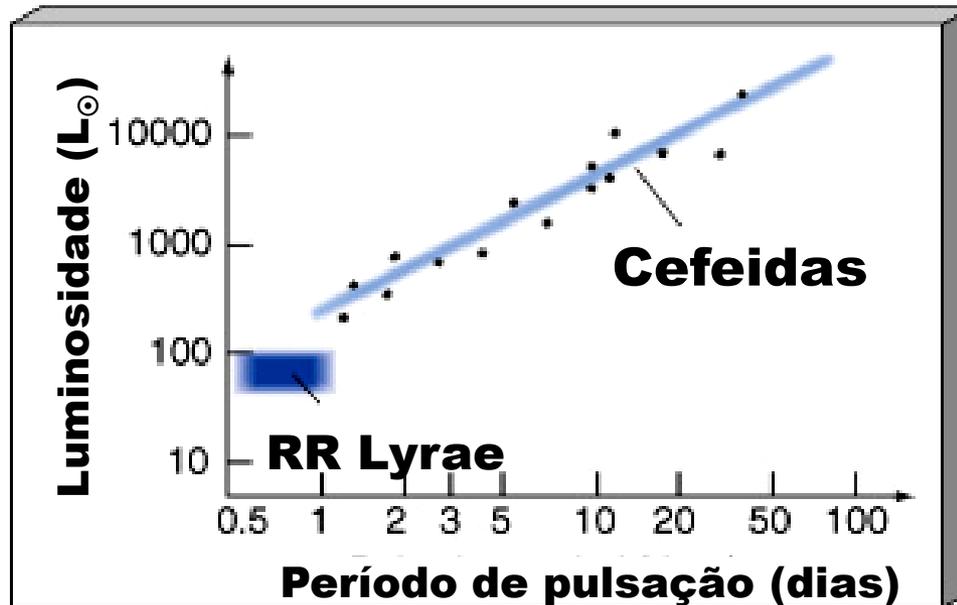
Descoberta da relação Luminosidade - período

Para estrelas próximas, em que a distância é conhecida por paralaxe, podemos determinar seus brilhos absolutos
⇒ verifica-se que existe uma correlação entre luminosidade no seu máximo de brilho e período de pulsação



- RR Lyrae tem luminosidade ~ constante ($\sim 100L_{\odot}$)
- Cefeidas tem o período de pulsação diretamente ~ a L

Então: para estrelas em que não se pode determinar distância através de paralaxe: se elas forem variáveis pode-se identificar o tipo de variável e usar o seu período de pulsação para estimativa da luminosidade.

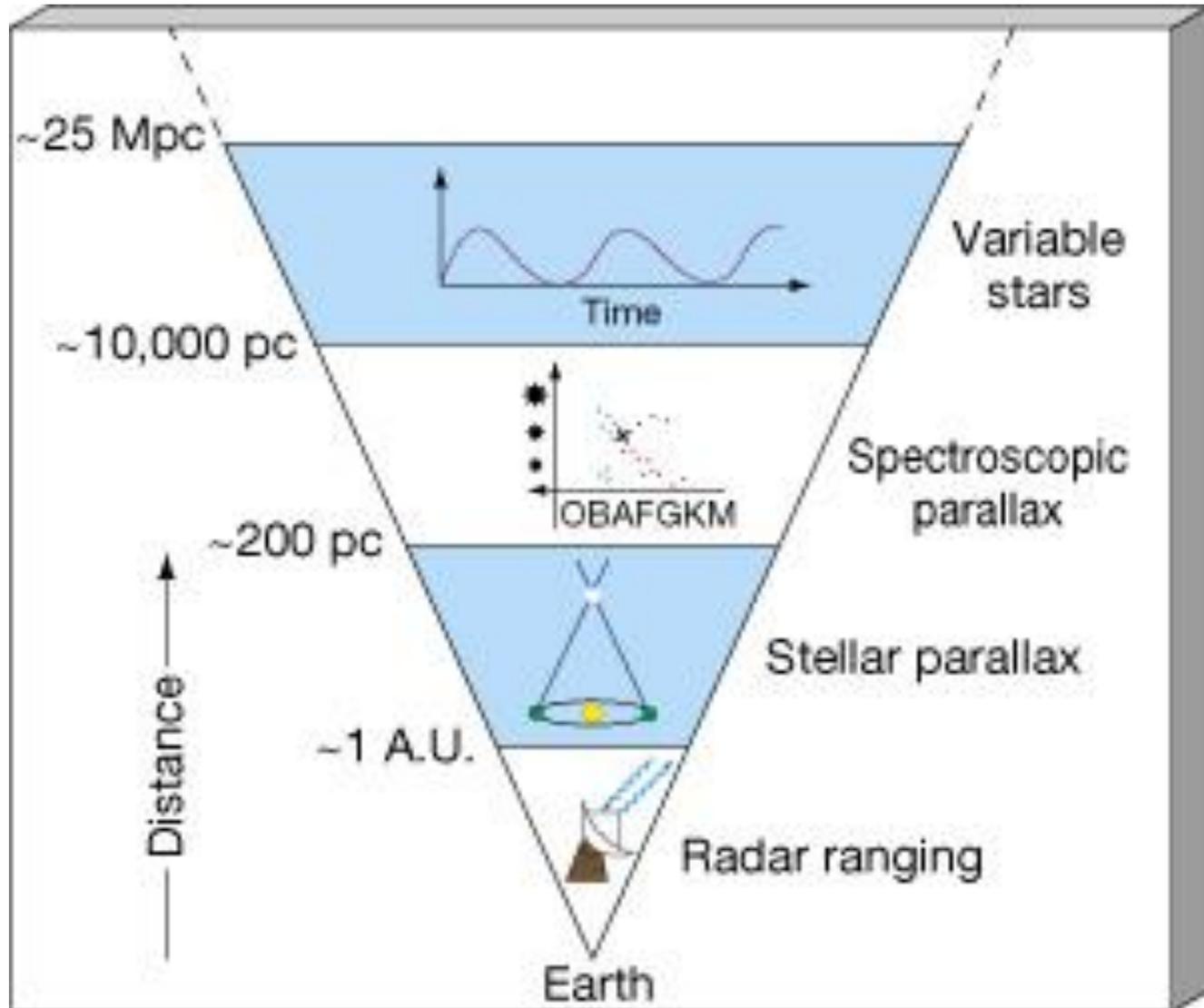


Determinando luminosidade, têm-se magnitude absoluta:

$$M - M_{\odot} = -2,5 \times \log(L/L_{\odot})$$

Determinando a magnitude absoluta e medindo a magnitude aparente, têm-se a distância: $m - M = 5 \log D - 5$

Com as variáveis pode-se medir distâncias de até 25 Mpc (80 milhões de anos-luz)



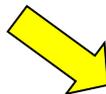
A forma e o tamanho da Galáxia

Muitas RR Lyrae são encontradas em aglomerados globulares



H. Shapley (começo do século XX) usando as RR Lyrae fez 2 importantes descobertas:

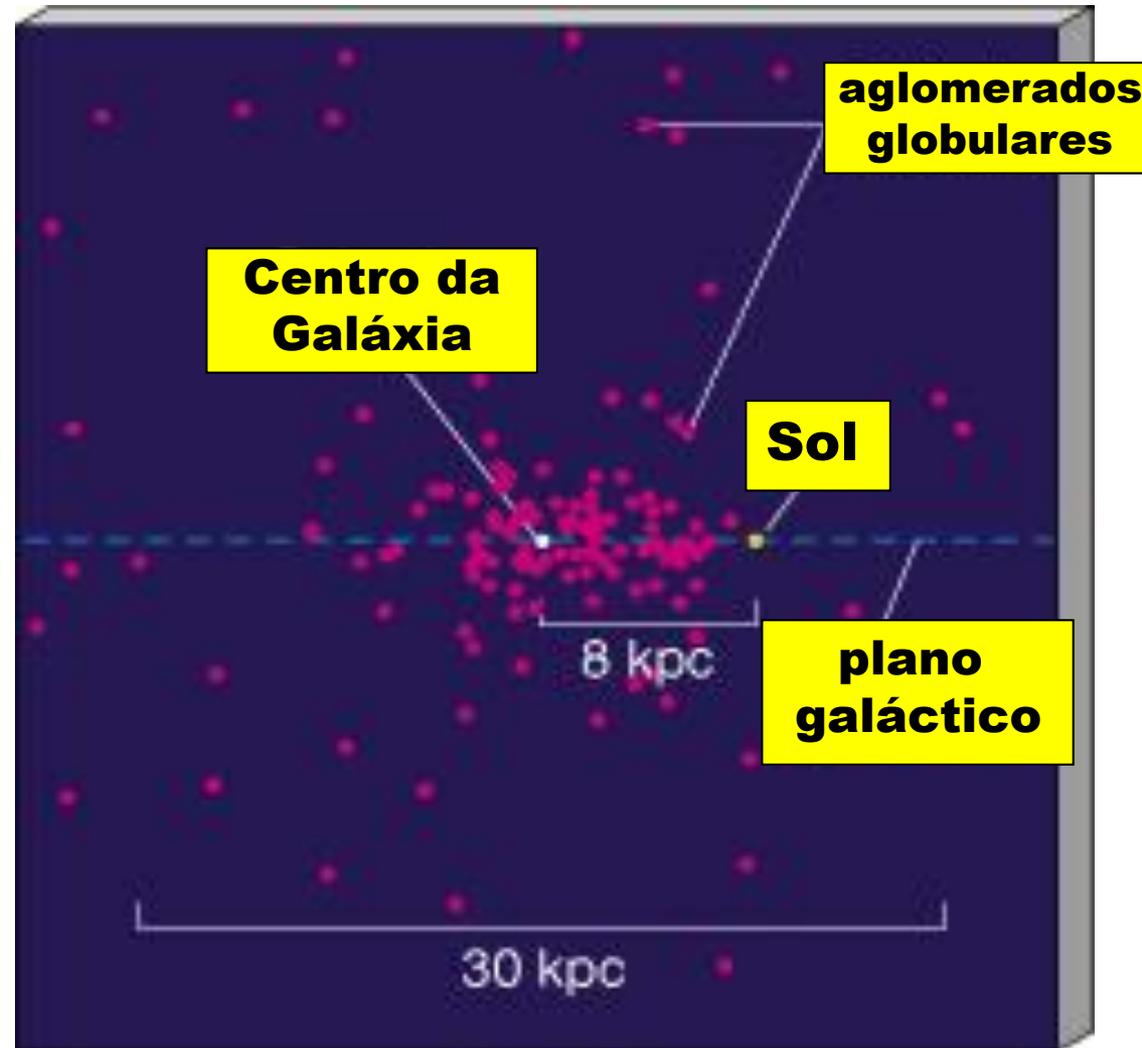
- 1. A maior parte dos aglomerados globulares está a grande distância do Sol (centenas de pc)**
- 2. Os aglomerados ocupam um volume grande e aproximadamente esférico (diâmetro de ~ 30 Kpc).
A distribuição dos aglomerados representa a máxima extensão da distribuição das estrelas na Galáxia**



Halo da Galáxia

O centro da distribuição dos aglomerados globulares não está no nosso sistema solar !

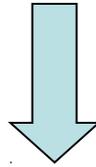
30 kpc ~ 100 mil anos-luz
8 kpc = 26 mil anos-luz



Mesmo assim até aquele momento as “nebulosas espirais” eram consideradas objetos galácticos....

- Somente em 1925 Edwin Hubble usando o telescópio de 2,5 m de Mt Wilson: encontrou estrelas variáveis em brilho denominadas **Cefeidas** em Andromeda e determinou sua distância
- Comprovou que Andromeda está a uma distância muito além da nossa Galáxia: $D=2,5$ milhões de anos-luz ou ~ 800 kpc



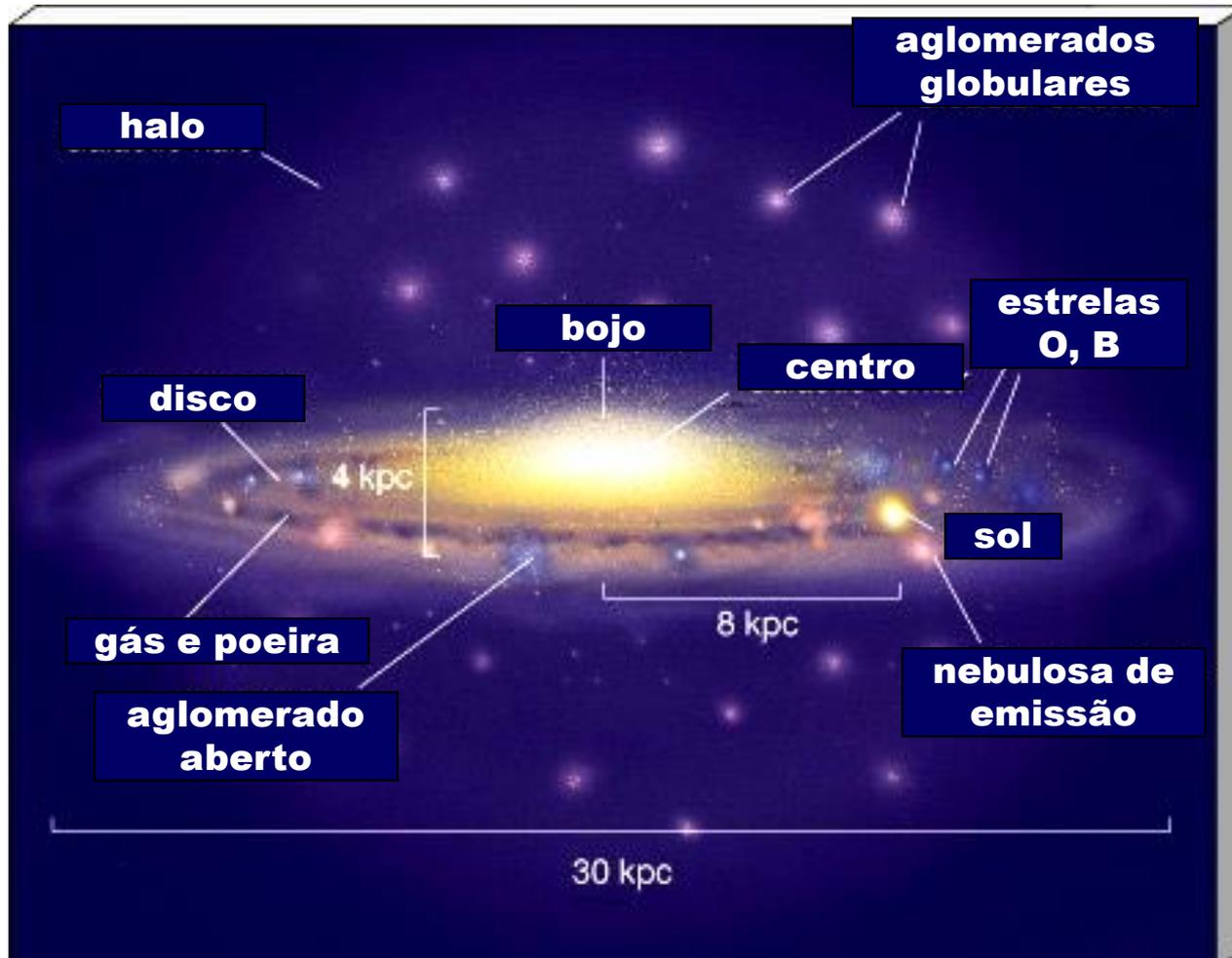


nebulosas espirais = outras galáxias

Notar: há menos de apenas um século se sabe da existência de outras galáxias !

ESTRUTURA EM GRANDE ESCALA DA GALÁXIA

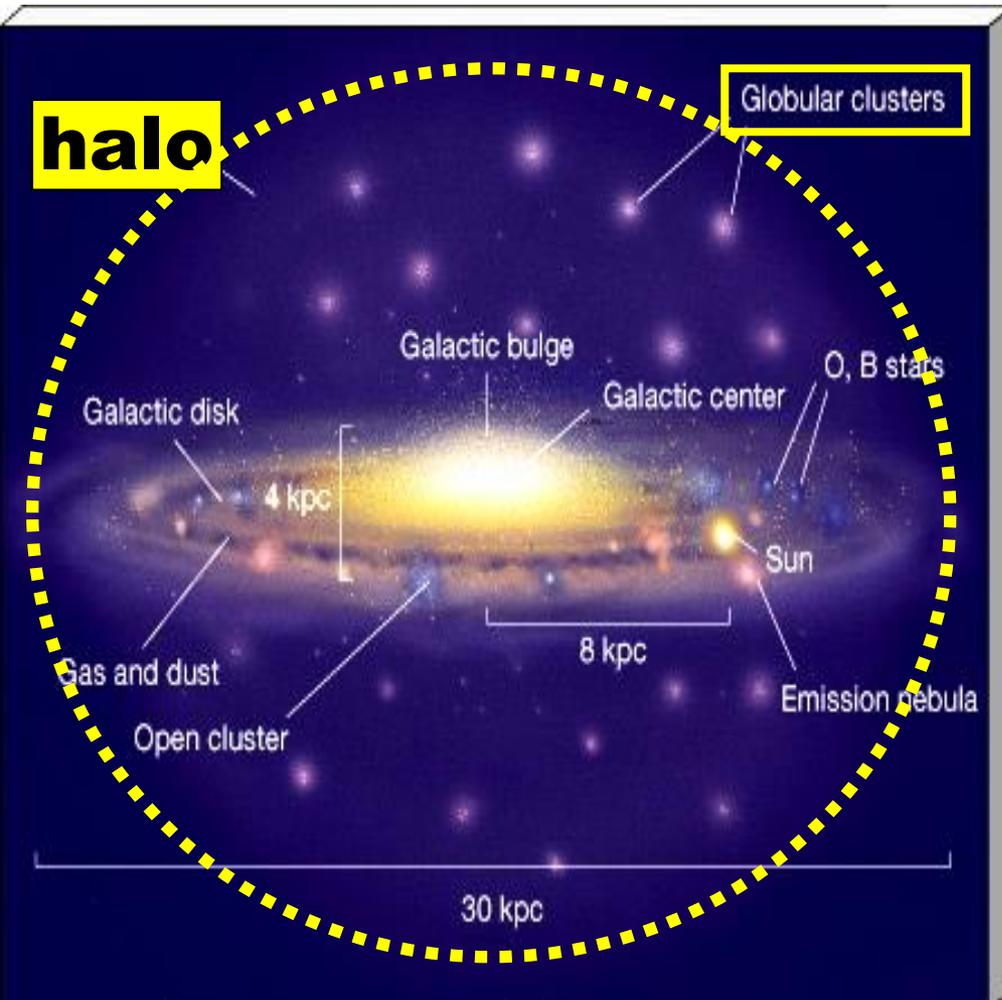
Baseado em observações no óptico, infravermelho e rádio de estrelas, gás e poeira.



componentes:

- **Halo**
- **Disco**
- **bojo**

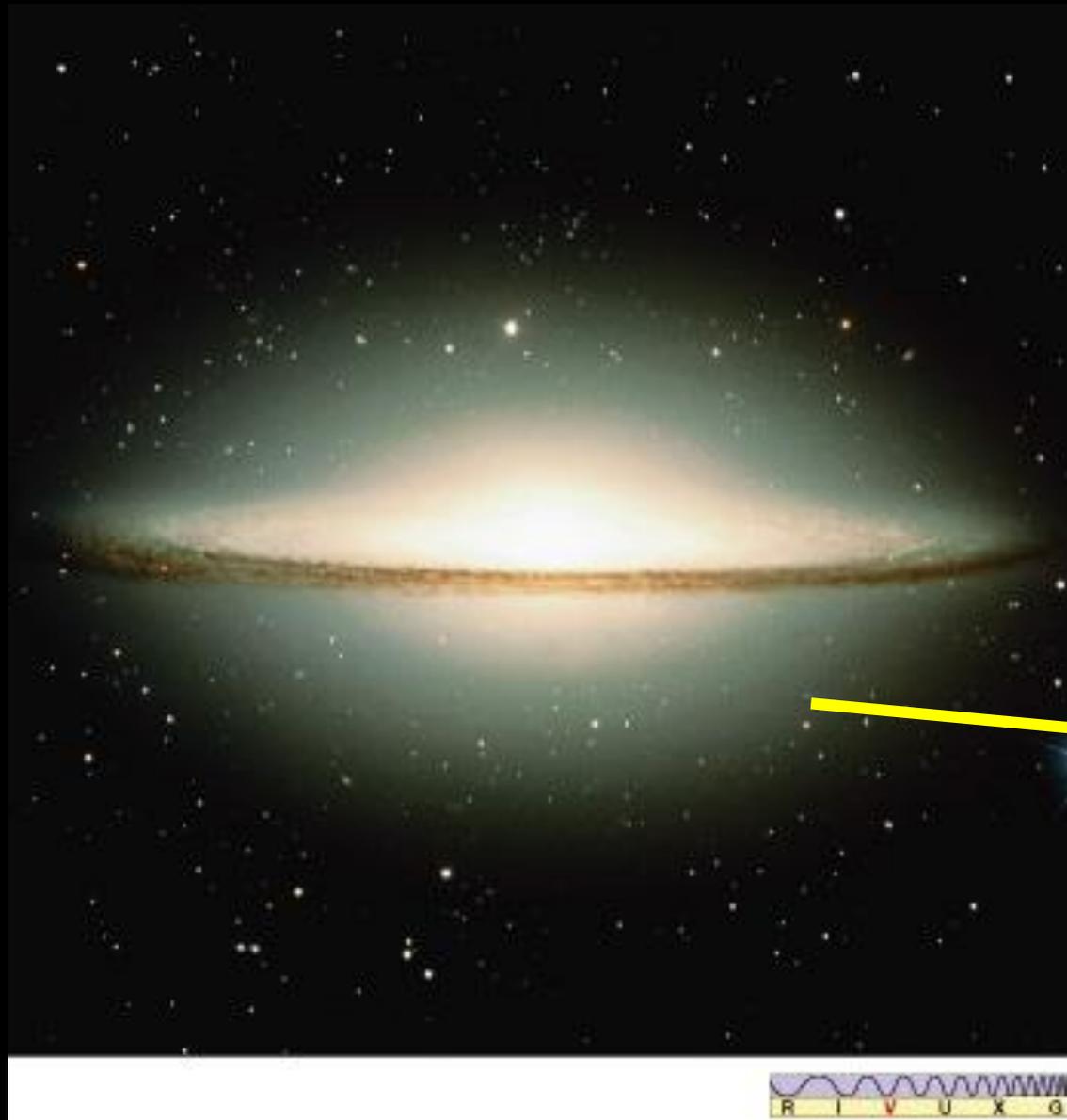
HALO



PROPRIEDADES

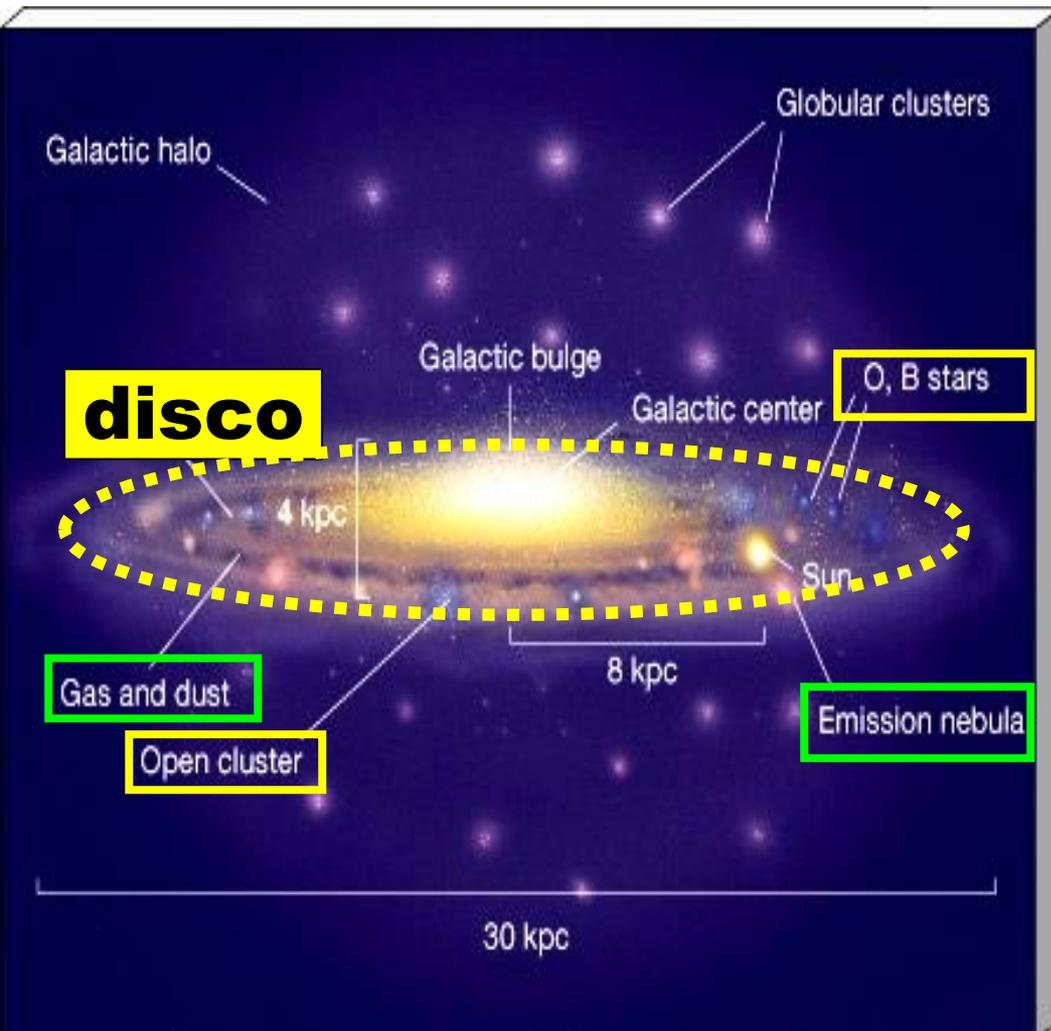
- Formado por estrelas velhas isoladas ou pertencentes a aglomerados globulares
- não contém nuvens densas de gás ou poeira

M104 – Galáxia sombreiro



halo

DISCO



PROPRIEDADES

- Formado por estrelas velhas (menor proporção) e jovens. As estrelas jovens podem estar isoladas ou em aglomerados abertos.

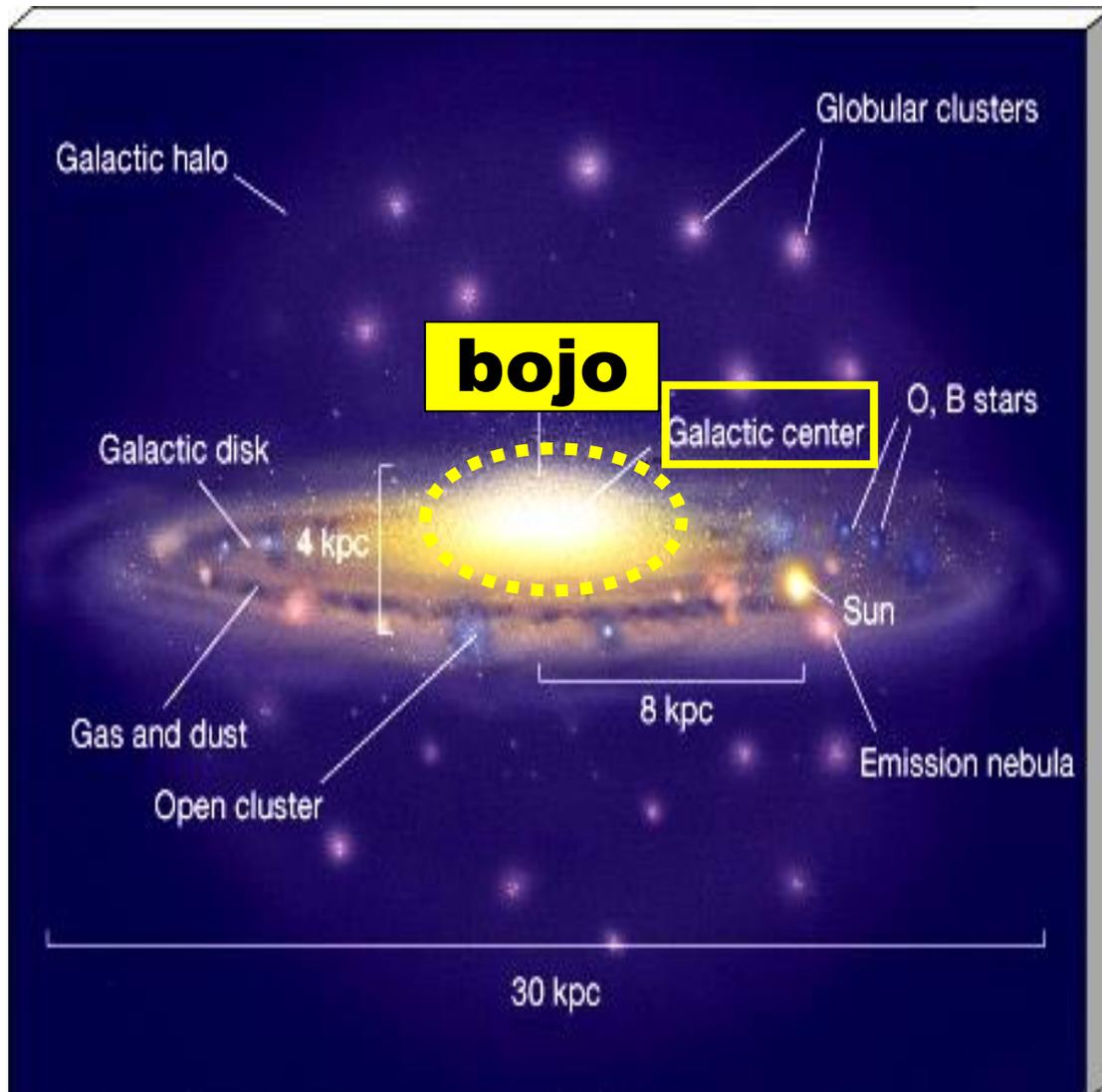
- **Contém nuvens densas de gás e poeira**



regiões de formação estelar

Contém braços de espirais (subestrutura)

BOJO



PROPRIEDADES

- Formado por estrelas velhas e jovens (menor proporção).
- Contém nuvens densas de gás e poeira na região mais interna.
- Contém barra

Centro da Galáxia:

**Buraco negro
massivo central**

A DINÂMICA DA NOSSA GALÁXIA

Movimento das estrelas, gás e poeira

**Estrelas e gás na
vizinhança do Sol
apresentam movimentos
Doppler sistemáticos em
qualquer direção**

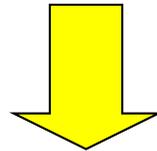


**Disco da Galáxia
está se movendo de
maneira ordenada**



Conclusão: o disco está rotando ao redor do centro da Galáxia

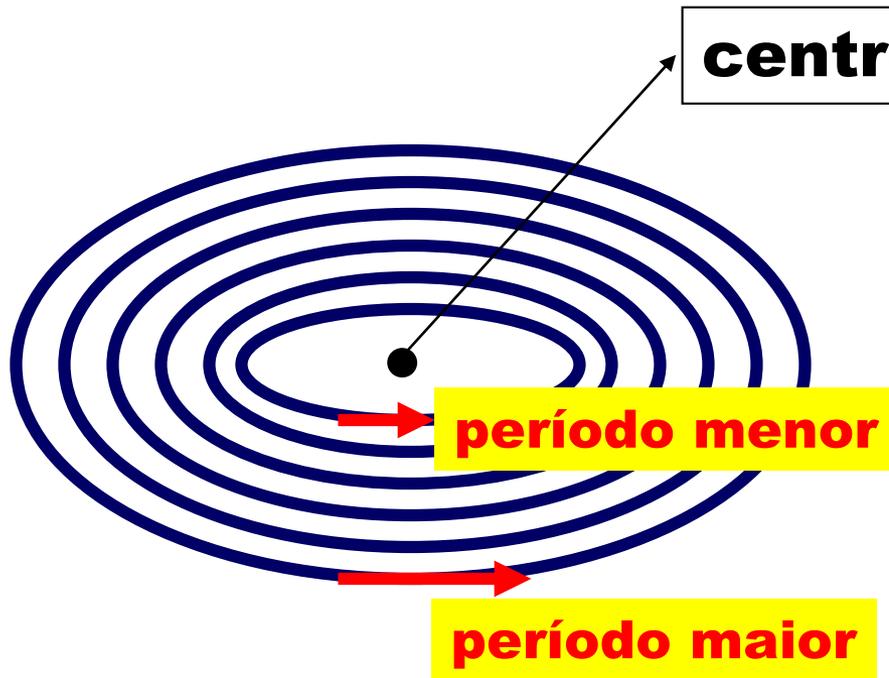
Na vizinhança do Sol a velocidade orbital é de 220 km/s



$$P = \frac{2\pi r}{v}$$

**Em 8 kpc do centro (distância do Sol) o material leva
~ 225 milhões de anos para dar 1 volta completa
= 1 ANO GALÁCTICO**

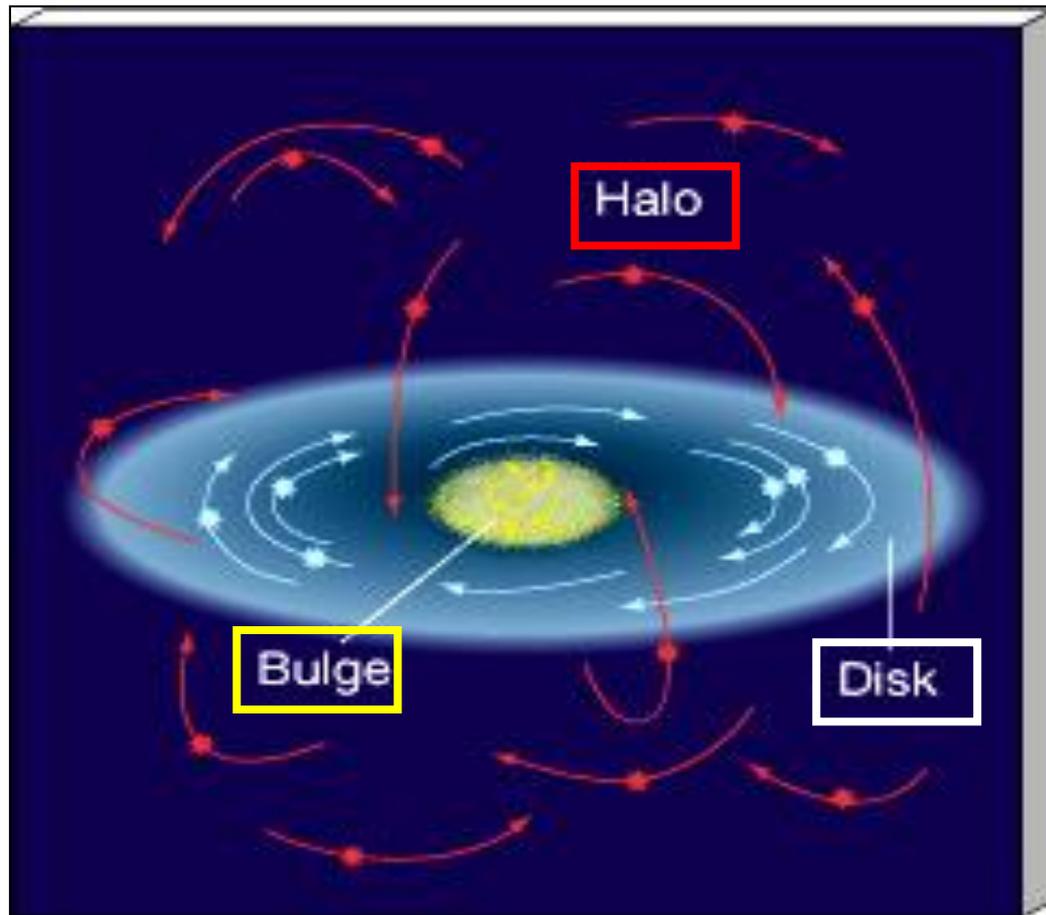
Em outras distâncias em relação ao centro o período orbital é diferente!



$$P = \frac{2\pi r}{v}$$

**Disco rota
diferencialmente!
(não é um corpo
sólido)**

Somente o disco possui movimento orbital ordenado



HALO:

- componente aleatória
- >> componente ordenada
- alta excentricidade

BOJO:

- Componente aleatória menor do que a do halo

Mas >> componente ordenada

RESUMO DAS PROPRIEDADES OBSERVADAS DAS GALÁXIAS

DISCO	HALO	BOJO
Bastante achatado	~ esférico	Um pouco achatado e  alongado no plano do disco
Estrelas velhas e jovens	Somente estrelas velhas	Estrelas velhas e jovens (jovens na região + interna)
Gás e poeira	Não contém gás ou poeira	Gás e poeira nas regiões mais internas
Sítio de formação estelar atual	Não forma estrelas atualmente	Formação estelar nas regiões mais internas
Gás e estrelas movem-se em órbitas ~ elípticas ao longo do plano galáctico	Estrelas possuem órbitas randômicas em 3 dimensões	Estrelas possuem órbitas randômicas mas com alguma rotação em relação ao centro da Galáxia
Braços de espirais	Não contém subestrutura evidente	Anel de gás e poeira perto do centro; núcleo central
Coloração branca com braços de espirais azuis	Coloração avermelhada	Coloração amarela e branca

MODELO SIMPLIFICADO PARA A FORMAÇÃO DA GALÁXIA



(a) Nuvens de gás colapsam pela influência de sua própria gravidade e começam a formar estrelas

as primeiras estrelas e aglomerados globulares são formados ⇒ galáxia ainda possui forma irregular (algumas dezenas de kpc em todas as direções)

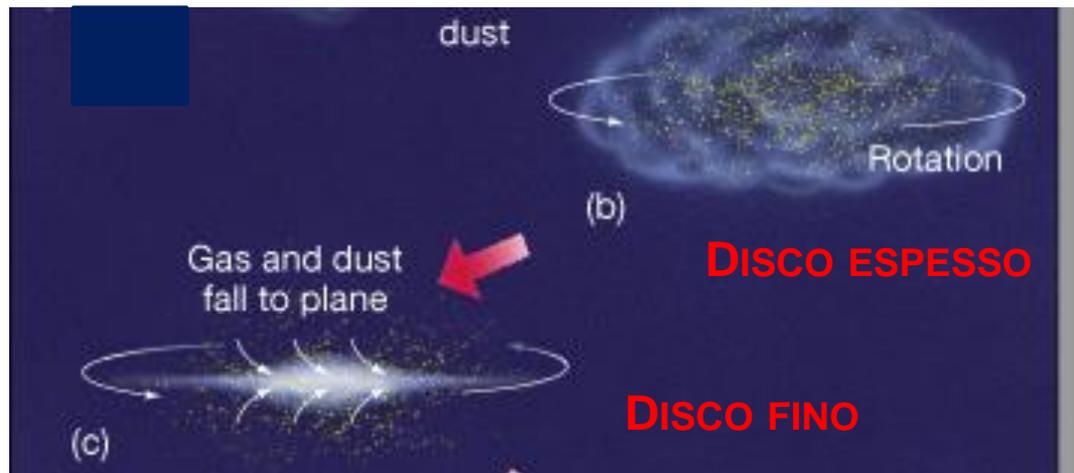


a distribuição e as órbitas das estrelas do halo observadas hoje refletem como estava distribuído o gás na época

Idade do halo ~ 12-15 bilhões de anos

(b) As nuvens de gás e estrelas juntam-se por gravidade e mais estrelas são formadas.

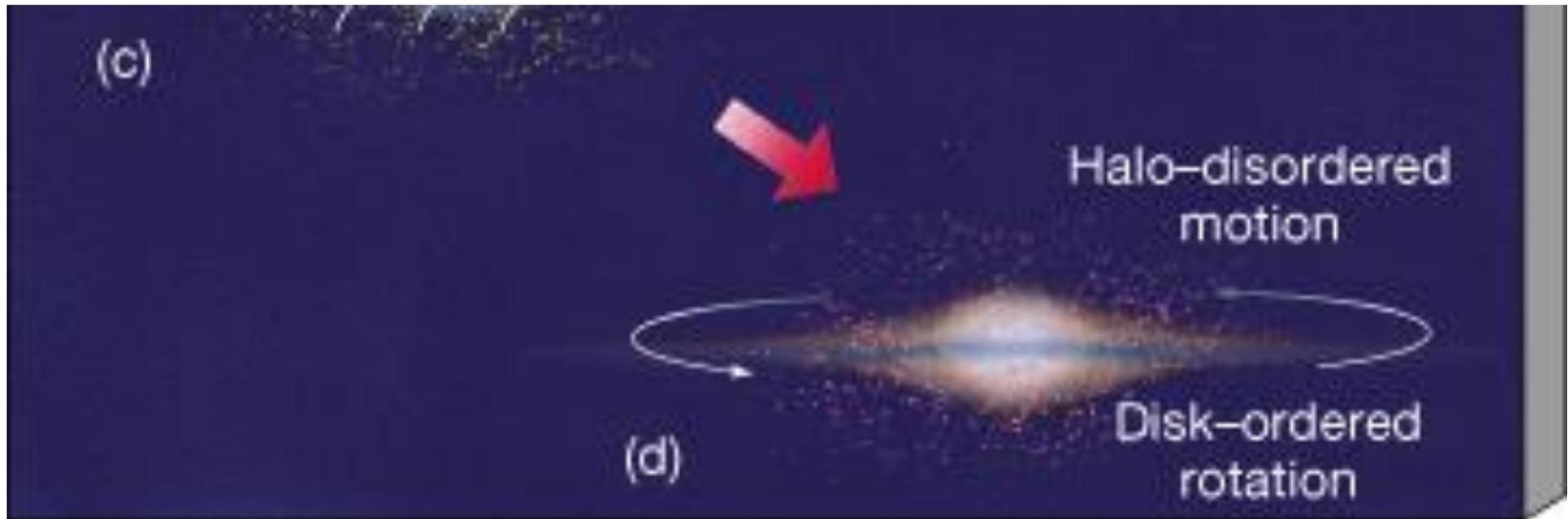
A rotação faz com que a distribuição de gás + estrelas vá se tornando achatada.



Conservação de momentum angular: nuvem diminui de tamanho \Rightarrow velocidade de rotação aumenta

(c) A rotação faz com que haja uma queda de gás e poeira na direção do plano da Galáxia, formando um disco. Nesta fase o halo não forma mais estrelas.

Idade do disco (fino) da Galáxia < 12 bilhões de anos



(d) uma nova geração de estrelas começa a se formar neste disco (disco fino) rotante.



Estas estrelas percorrem órbitas elípticas e ordenadas.

OS BRAÇOS DE ESPIRAIS

A descoberta dos braços de espirais na nossa Galáxia foi feita pelo mapeamento da distribuição do gás na nossa Galáxia através da radiastronomia

MAPAS DE RÁDIO DA NOSSA GALÁXIA

Esboço dos braços de espirais:

- emissão em rádio da linha de 21-cm do H pelo gás interestelar
- emissão em várias outras radiofrequências por nuvens moleculares

A radiação emitida pelo gás ou poeira em grandes comprimentos de onda atravessa todo o meio interestelar sem serem afetados



Pode-se ter medidas das propriedades do meio interestelar a longas distâncias.

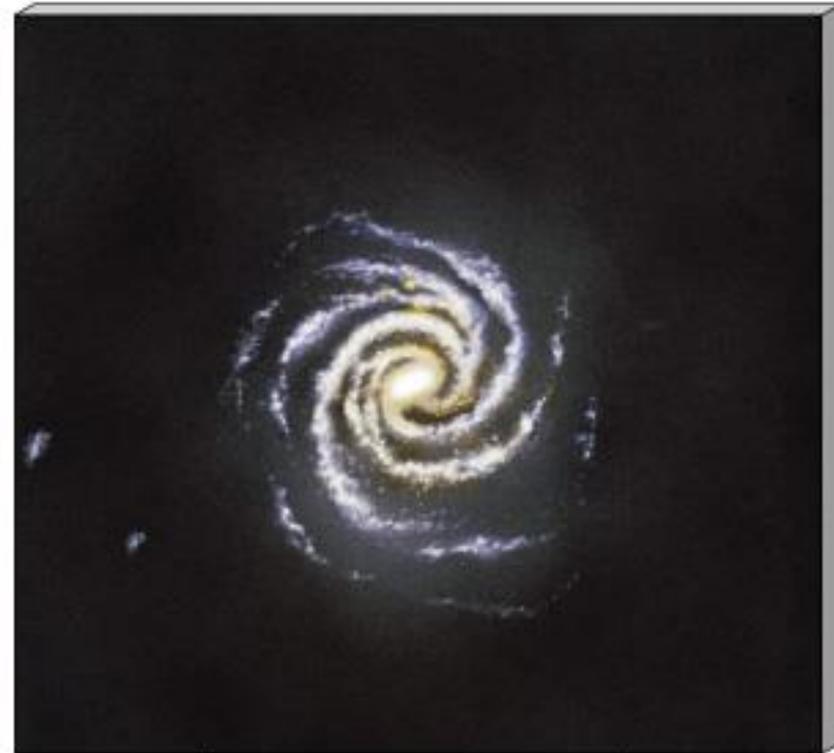


OS BRAÇOS DE ESPIRAIS

Diâmetro do disco ~ 30 kpc

**Espessura ~ 300 pc (estrelas)
~ 140 pc (gás)**

VIZINHANÇA SOLAR



30 kpc

FORMAÇÃO E DURAÇÃO DOS BRAÇOS DE ESPIRAIS

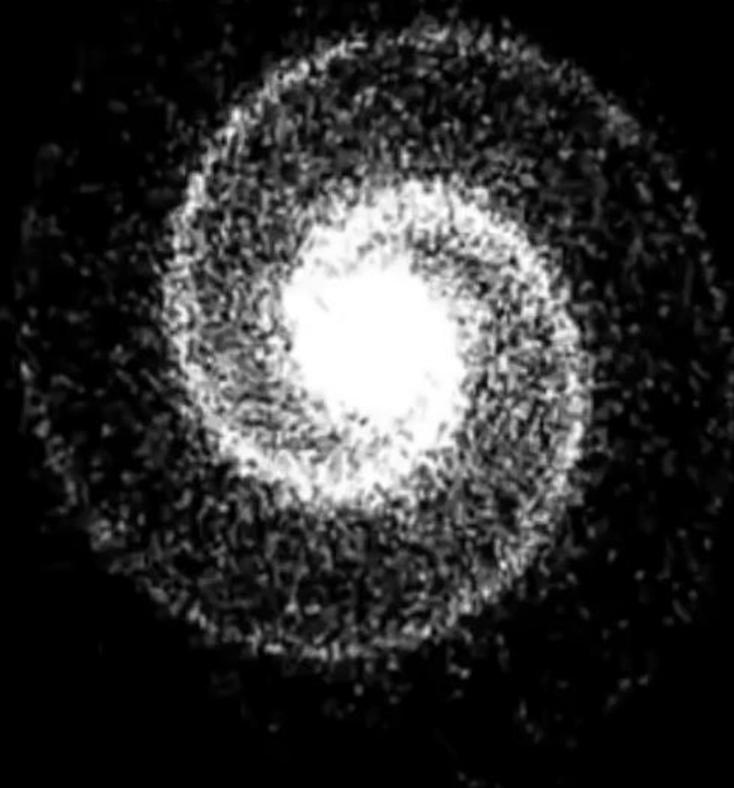
Os braços de espirais são formados por:

- gás
- poeira
- estrelas jovens O e B
- objetos pré-estelares: nebulosas de emissão
- aglomerados abertos recém formados

Conclusão: os braços de espirais são regiões estáticas e densas de gás e poeira onde ocorre a maior parte da formação de estrelas. No entanto esta dedução tem um problema...

Como as estruturas espirais sobrevivem por longos períodos de tempo??

O disco rota diferencialmente



partes internas levam menos tempo para dar uma volta ao redor do centro do que as externas \Rightarrow braços se “enrolariam” com o passar do tempo

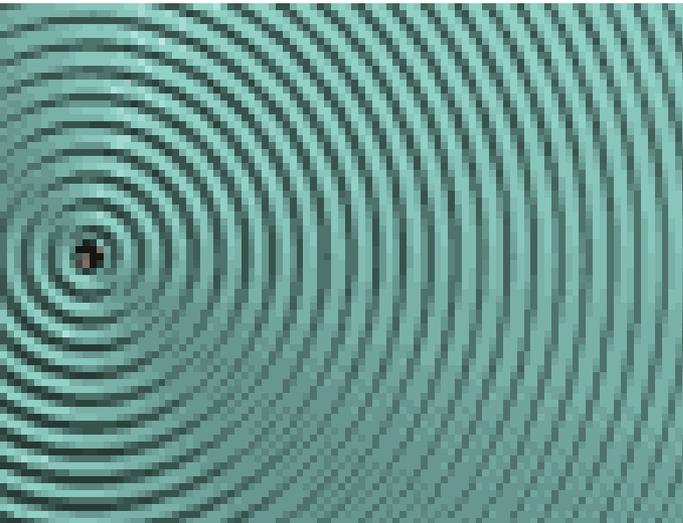
A rotação diferencial faria com que estas estruturas fossem desaparecendo rapidamente ao longo do tempo ($\sim 100 \times 10^6$ anos)... No entanto não é o que se observa.

Explicação de como os braços de espirais se mantêm



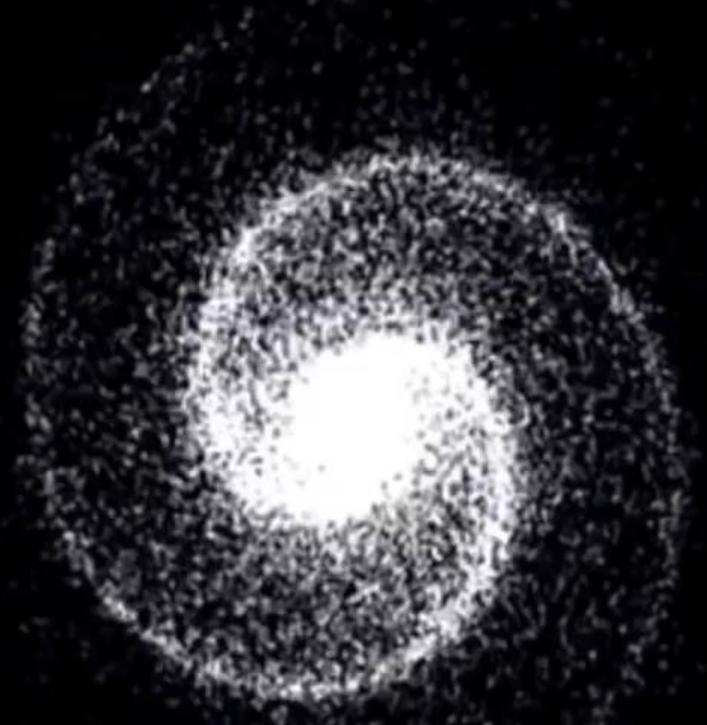
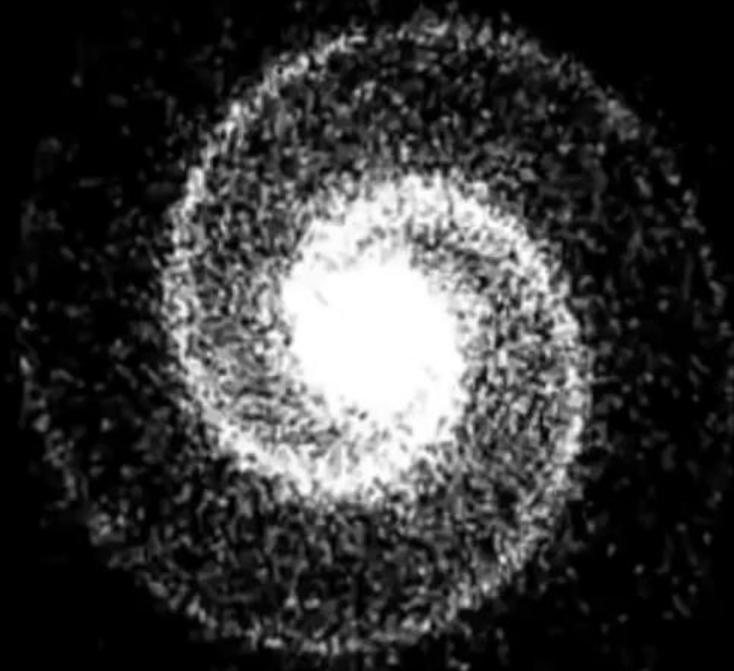
ONDAS ESPIRAIS DE DENSIDADE

os “braços de espirais” na verdade são ondas de pressão que se movem através do disco, comprimindo nuvens de gás e provocando a formação de estrelas



não são grandes massas de matéria estáticas que estão no disco. São somente padrões que se movem através do disco.

Padrões espirais se mantêm intactos apesar da rotação diferencial



Modelo da onda de densidade



Gás e estrelas do disco se movem mais rapidamente do que a onda de densidade

Quando o gás atinge a onda espiral, este gás é comprimido e estrelas podem ser formadas

São observados os padrões espirais contendo estrelas brilhantes recém formadas e nuvem de gás e poeira bastante densas

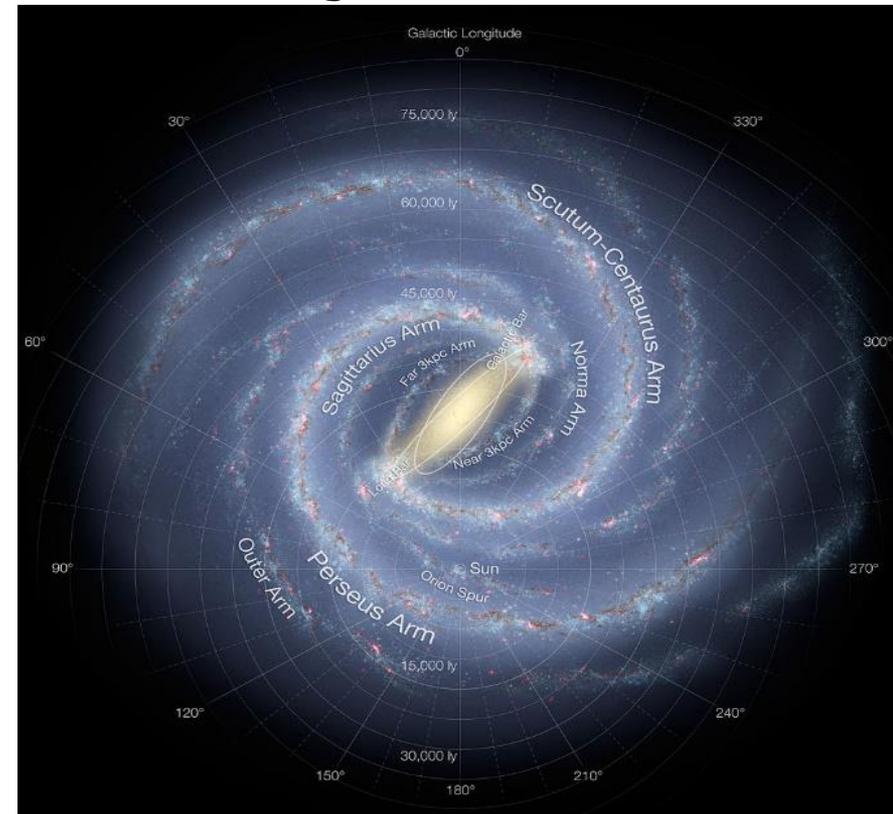
Qual a origem das ondas espirais?

Possibilidades:

(a) O efeito gravitacional de nossas galáxias satélites: NUVENS DE MAGALHÃES e esferoidais anãs

(b) Instabilidades no gás próximo ao bojo galáctico

(c) Presença de barra no bojo galáctico



A MASSA DA GALÁXIA

Para discos de galáxias espirais:
gás e estrelas seguem leis de Newton \Rightarrow a velocidade orbital em torno de um potencial central cresce com a **M central** e decresce com a distância ao centro

$$\frac{mv^2}{R} = \frac{GMm}{R^2} \Rightarrow M = \frac{Rv^2}{G}$$

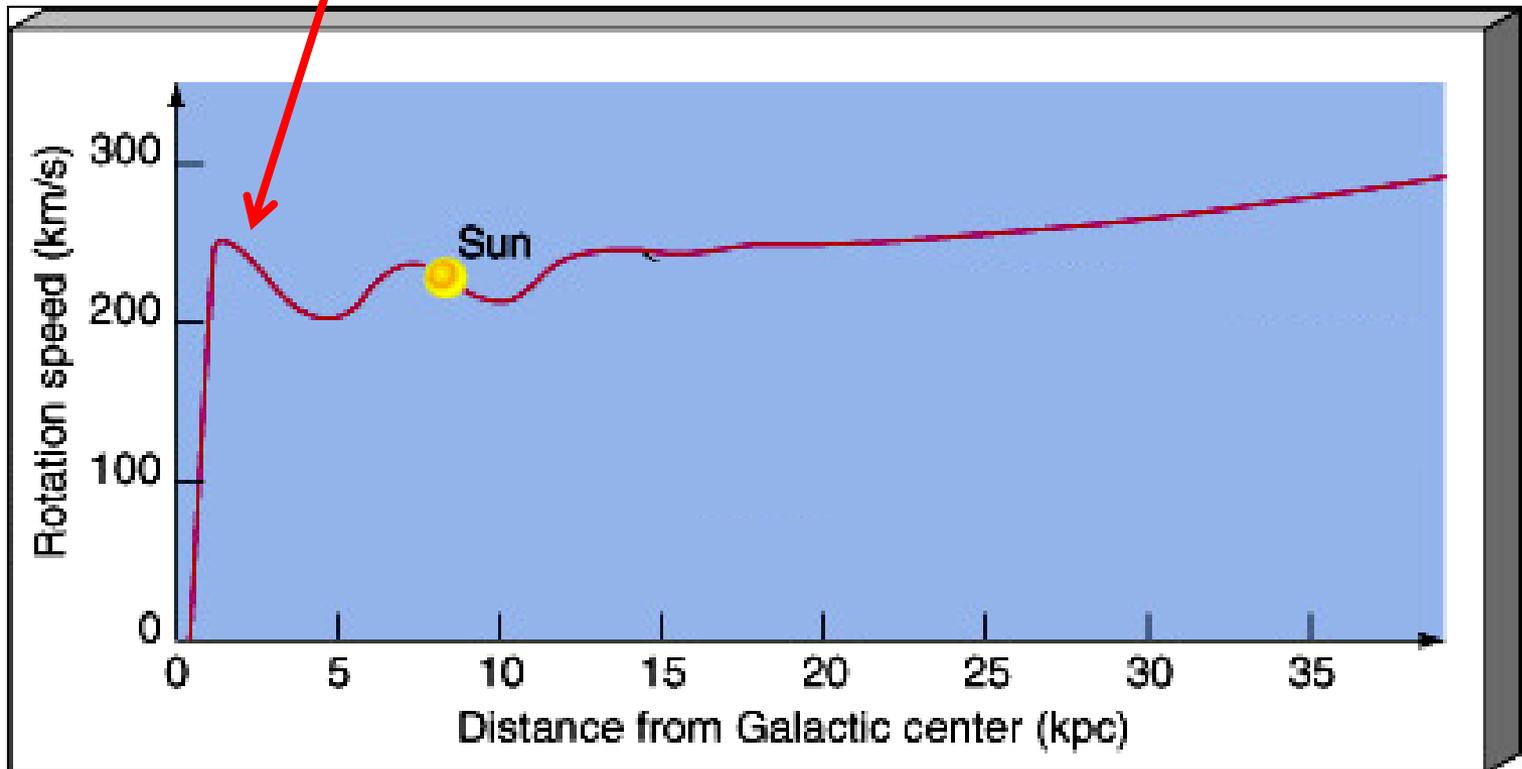
**Massa do volume contido na órbita do Sol:
 $r \sim 8$ kpc ; $v=220$ km/s $\Rightarrow \sim 9 \times 10^{10} M_{\odot}$**

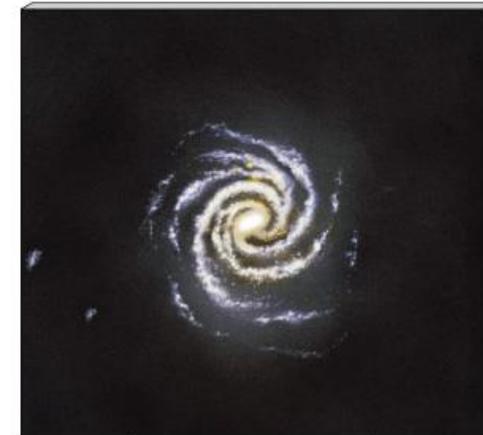
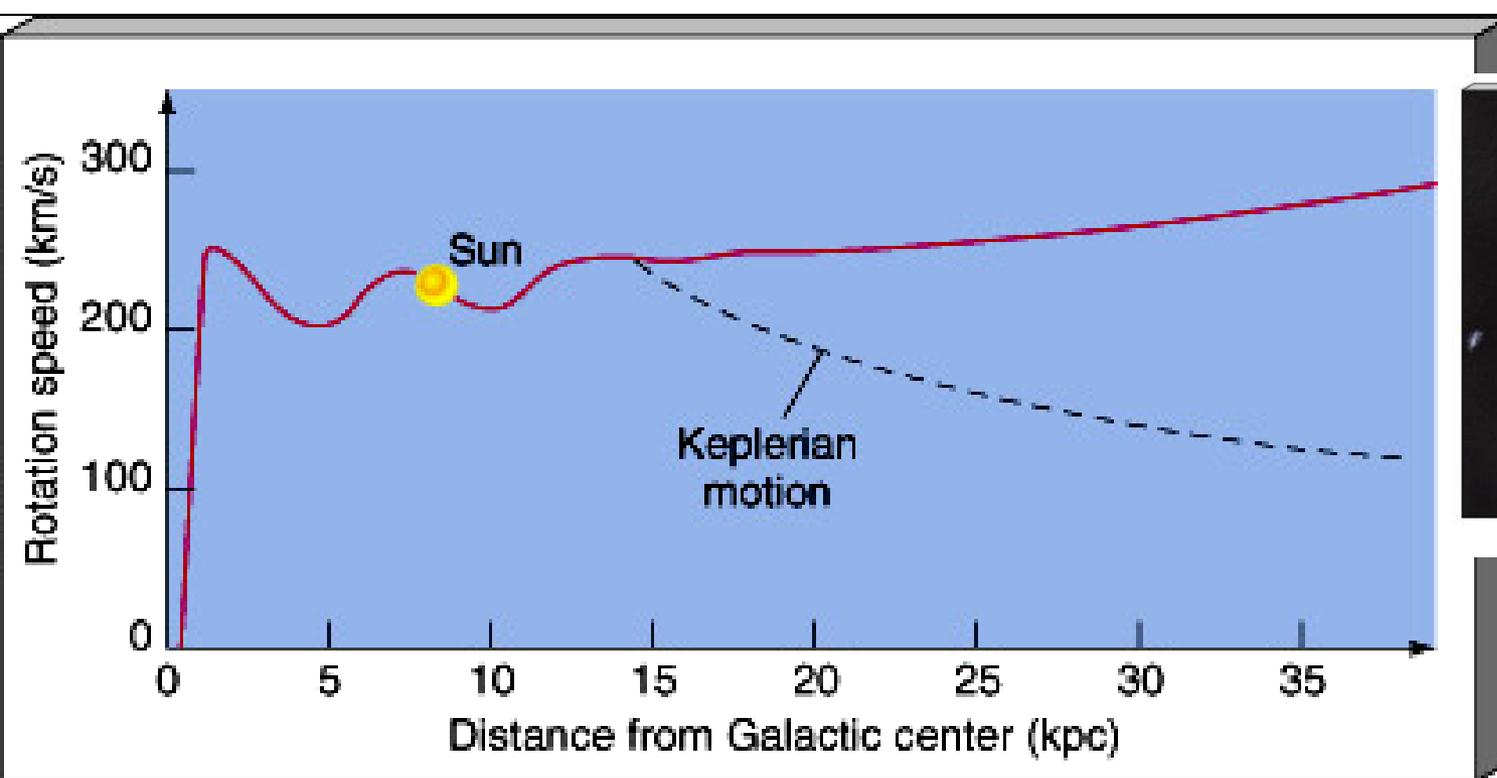
A MASSA DA GALÁXIA

Para medir a maiores distâncias \Rightarrow observações do gás em rádio frequências

↓
velocidade de rotação em cada ponto da Galáxia

curva de rotação





Se toda a massa estivesse concentrada na região luminosa (gás+estrelas) \Rightarrow vel. orbital diminuiria a partir de 15 kpc ($v^2=GM/R$).

Mas até 40 kpc $\sim 6 \times 10^{11} M_{\odot}$ \rightarrow

**região luminosa
cercada por
um halo escuro**

MATÉRIA ESCURA (DARK MATTER)

MATÉRIA ESCURA

- **Não é detectável em quaisquer comprimentos de onda (de raios gama a rádio)**
- **a existência é constatada só gravitacionalmente (ex. curva de rotação)**

**Candidatos a
matéria escura:**

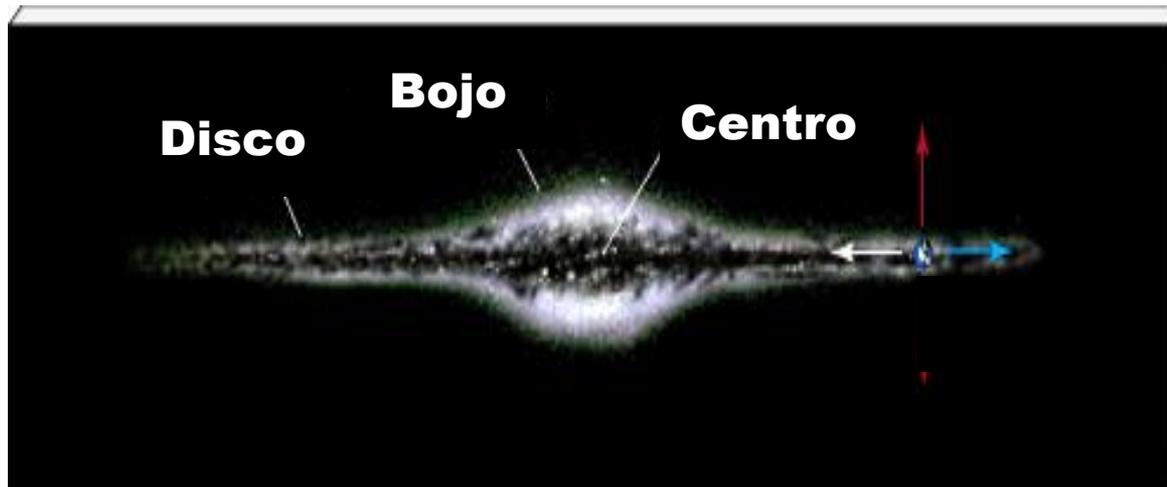
**MAssive Compact Halo Objects
(anãs marrons, anãs brancas, etc)**

**Weakly Interating Massive Particles
(partículas subatômicas com massa,
mas que não interage com a matéria)**

O CENTRO DA NOSSA GALÁXIA

Teoria de formação de galáxias espirais prediz que bojos são densamente populados de estrelas (cerca de bilhões de estrelas)

O bojo da nossa Galáxia é difícil de se observar no visível : entre o nosso campo de visão e o centro da galáxia existe o meio interestelar do disco \Rightarrow obscurece a luz visível vinda das estrelas do bojo.



exceto regiões que chamamos de janelas de Baade (anos 40): regiões onde o meio interestelar do disco não é tão denso e a luz vinda das estrelas do bojo não é tão obscurecida.

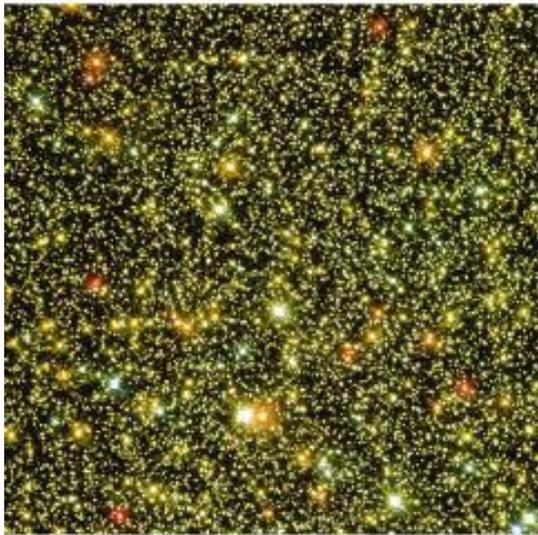


Foto no visível da região na direção do centro da Galáxia (direção da constelação de Sagitário)



O obscurecimento da luz vinda do centro pelo meio interestelar do disco faz com que o nosso campo de visão no visível seja de até apenas $\sim 1/10$ da distância ao centro.

Com observações no infravermelho e rádio pode-se observar regiões mais profundas no bojo.

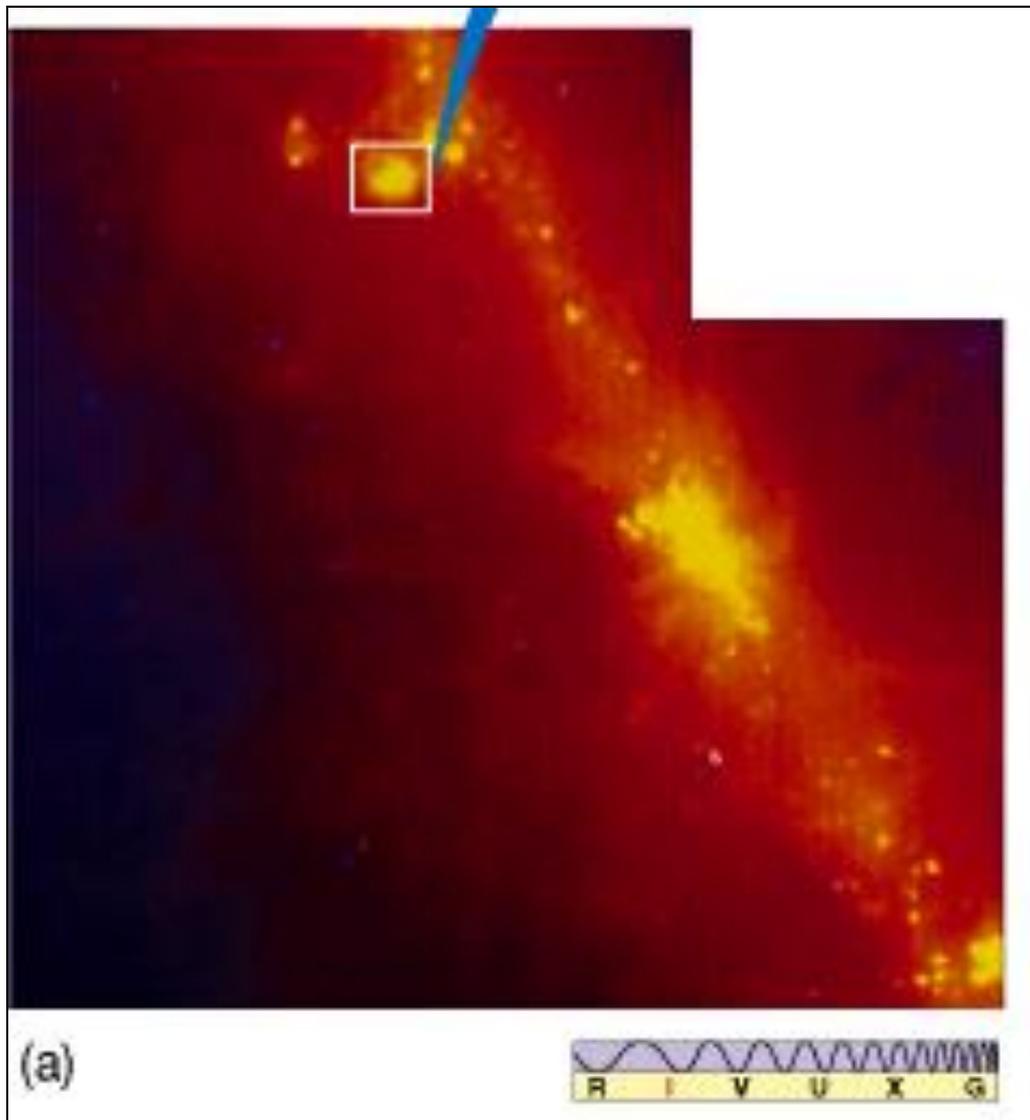


Imagem no infravermelho da direção do centro da Galáxia (direção da const. de Sagitário)

quadrado branco

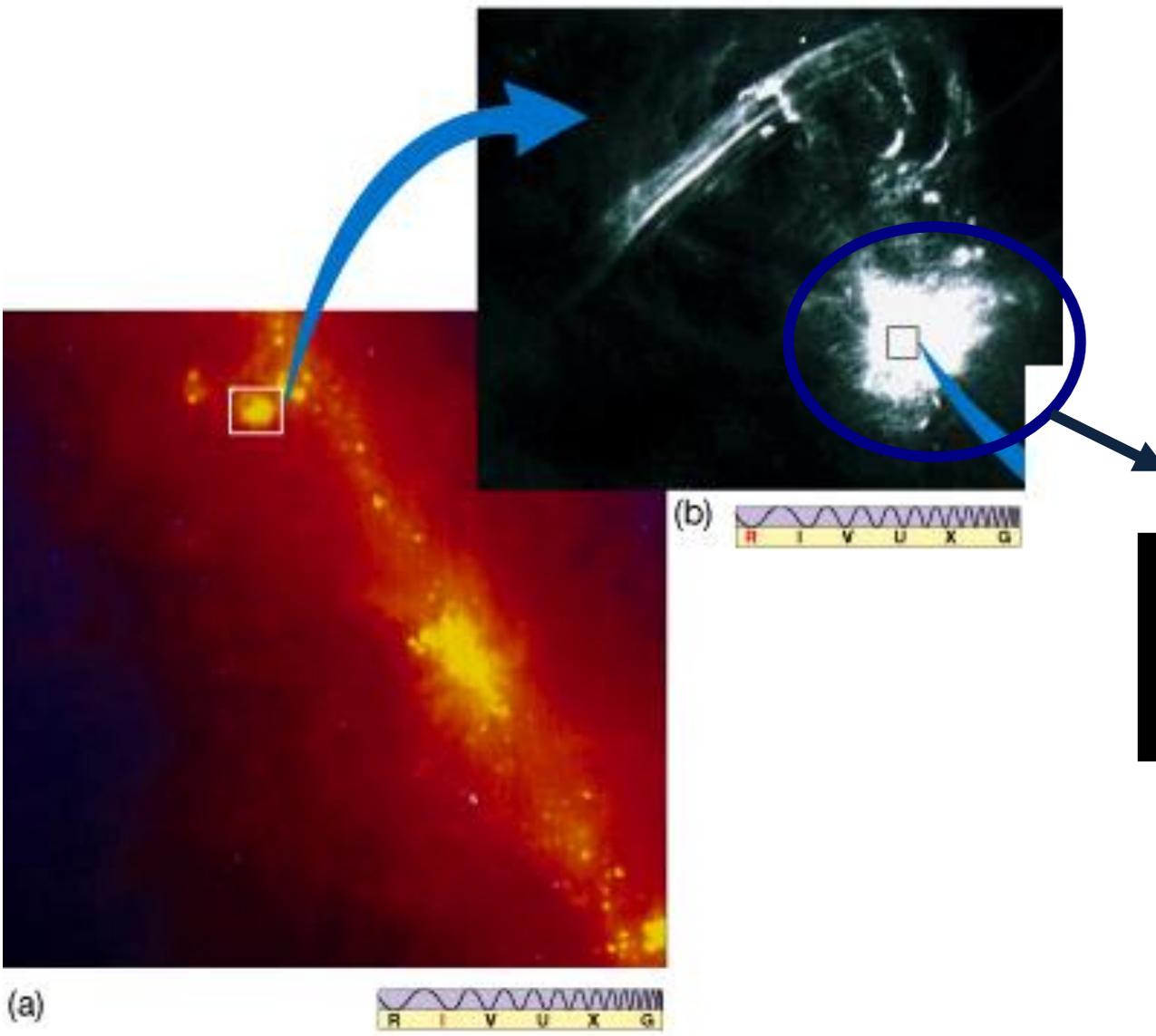
Estas observações indicam uma densidade de ~ 50.000 estrelas por parsec³ na região do quadrado branco



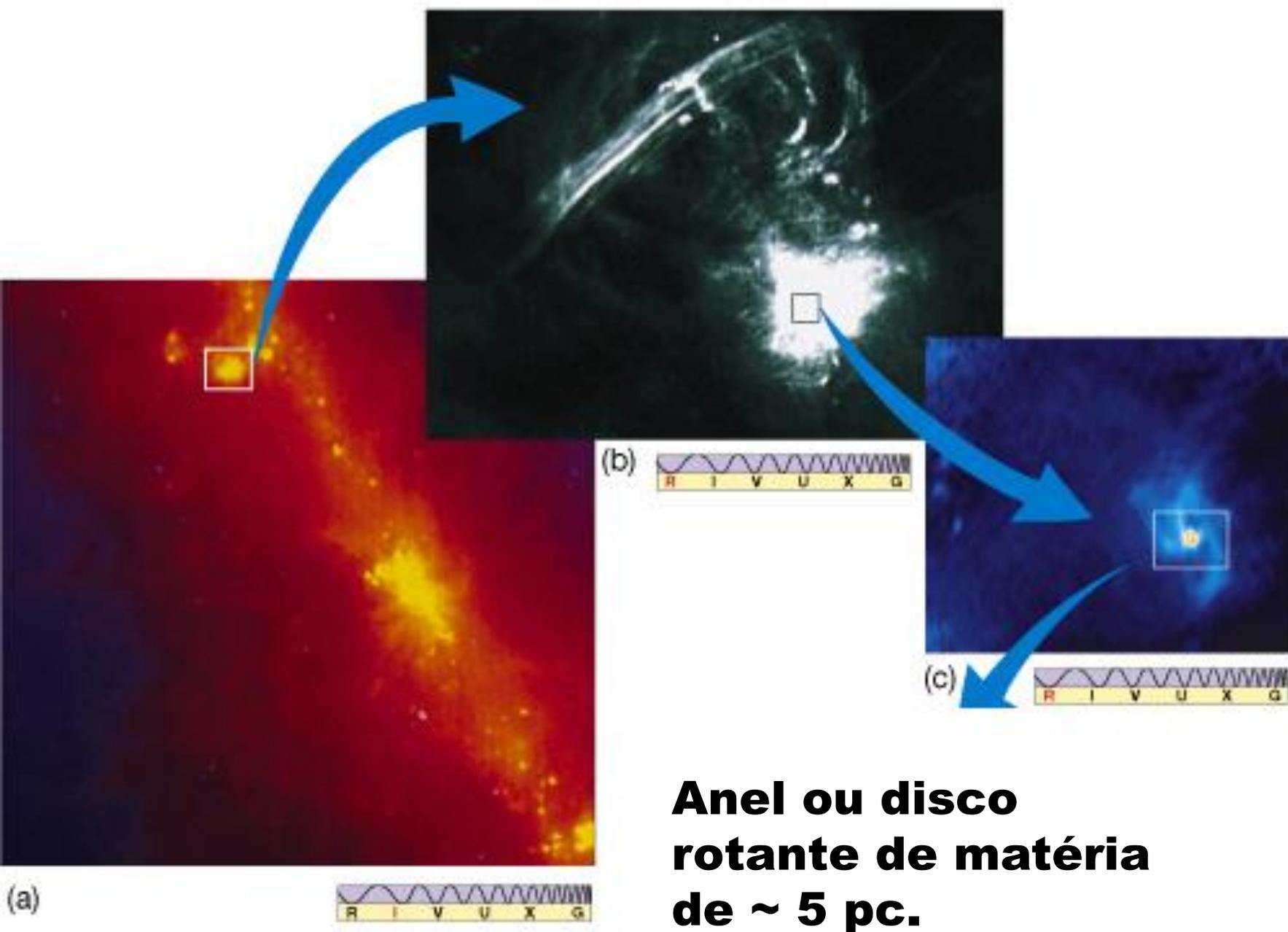
milhões de vezes maior do que a densidade de estrelas na vizinhança solar.

boa probabilidade de haver “encontros de estrelas” ou mesmo colisões!

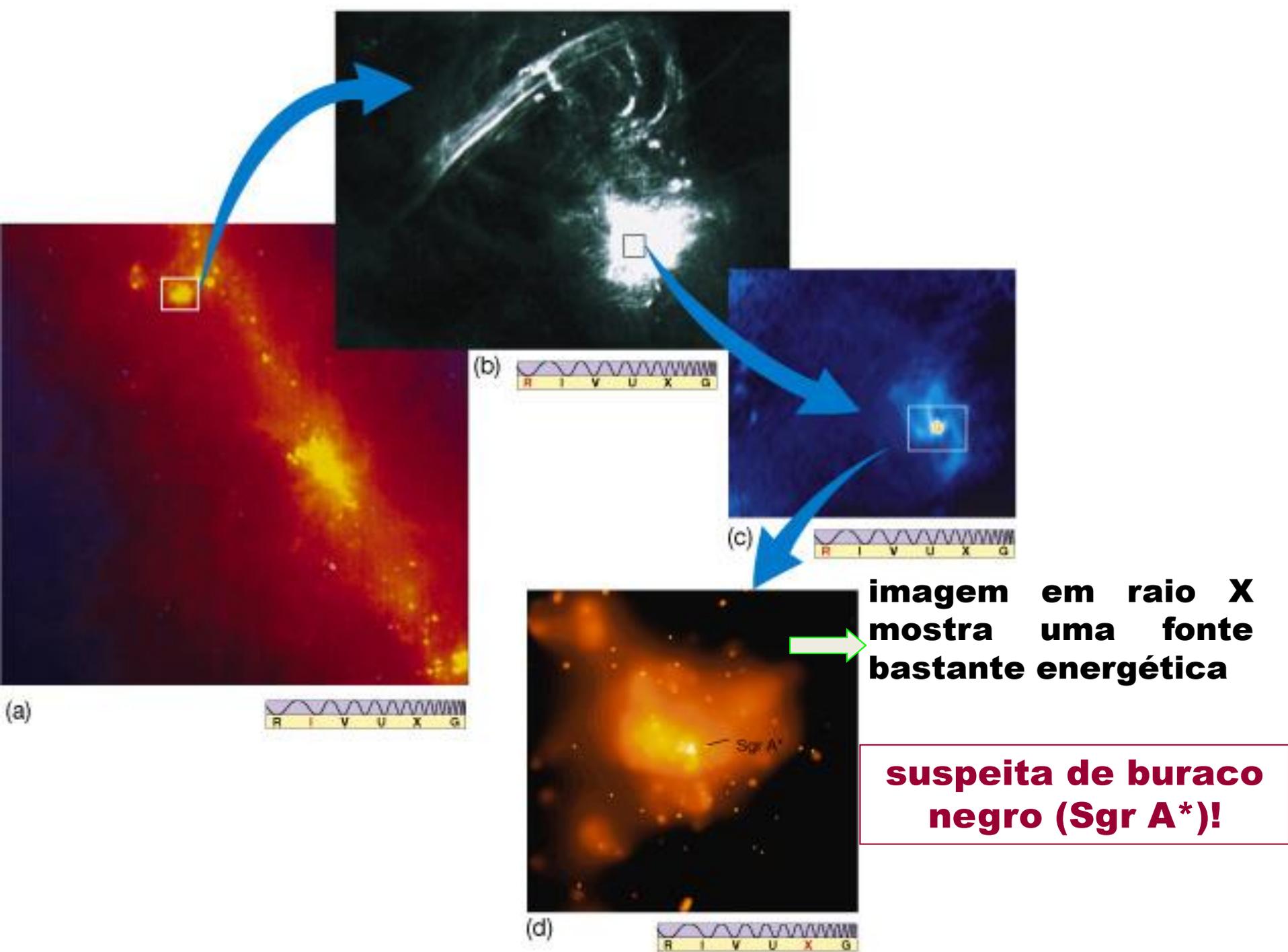
Imagem em rádio mostra zonas ainda mais profundas na direção central da Galáxia: **anel de gás molecular** de ~ 400 pc de diâmetro que contém cerca de $30.000 M_{\odot}$ de material e que rota com velocidade de 100 km/s.



**Fonte brilhante
=
Sagitário A**



Anel ou disco rotante de matéria de ~ 5 pc.



Origem da atividade no centro da galáxia (fonte energética).

Medidas do alargamento das linhas espectrais no infravermelho indicam que o gás da região está se movendo em alta velocidade.



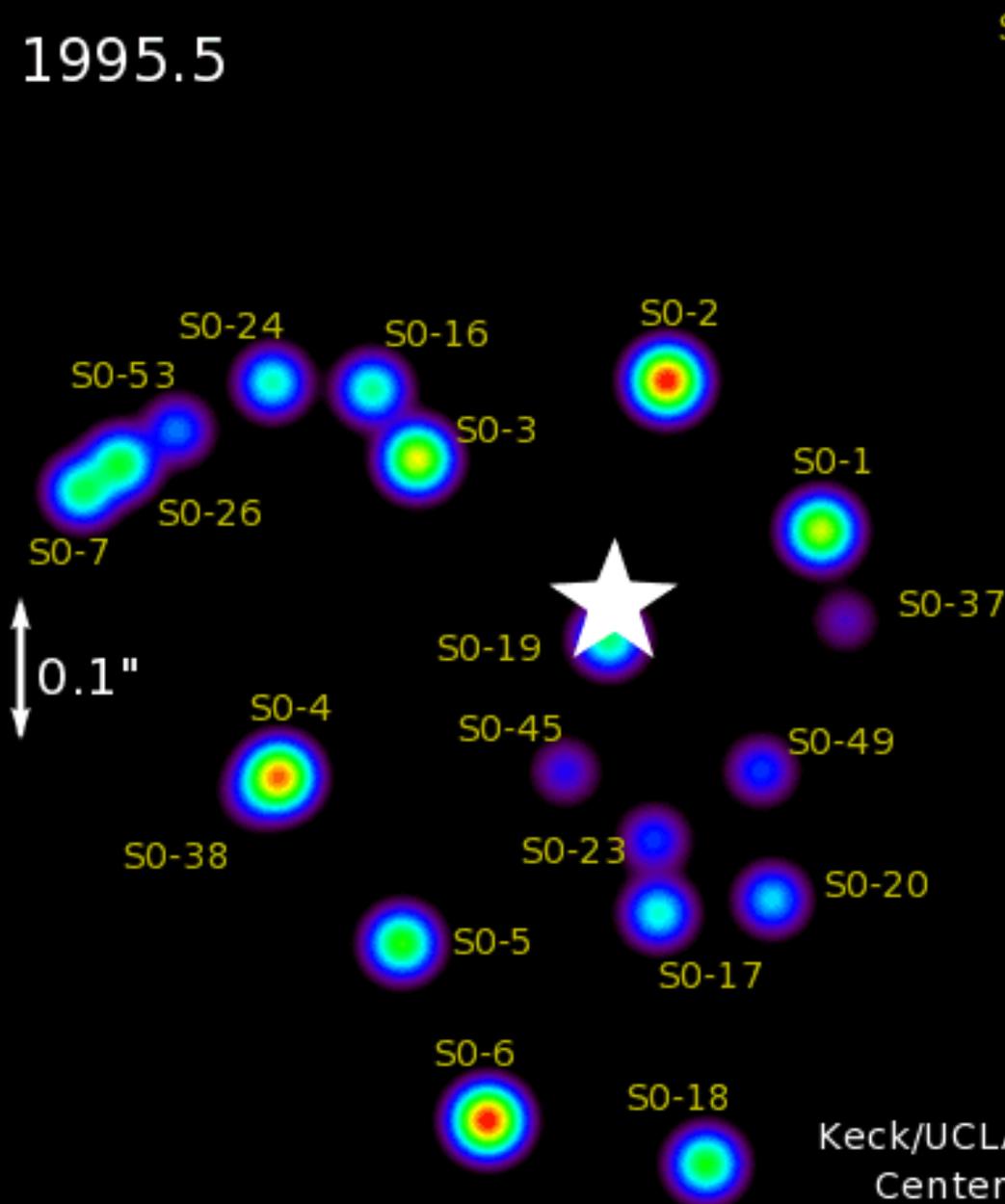
Dada a velocidade do gás, infere-se que para mantê-lo em órbita é necessário que o centro seja bastante massivo $\Rightarrow M > 1$ milhão de M_{\odot} !!!

Estas condições de alta massa e pequeno tamanho de Sgr A* indica fortemente a presença de um buraco negro!

Atenção: a fonte de energia não é o buraco negro em si e sim o disco de matéria que está espiralando ao redor do grande potencial gravitacional do buraco negro.

Medidas em alta resolução da órbita de estrelas próximas a Sgr A*

1995.5



Usando a 3ª lei de Kepler
pode-se estimar a massa do
Buraco Negro central da
Galáxia $M \sim 3,3$ milhões de M_{\odot}

$$M(M_{\odot}) = \frac{\text{raio orbital}^3 (UA)}{\text{período orbital}^2 (\text{anos})}$$

Keck/UCLA Galactic
Center Group