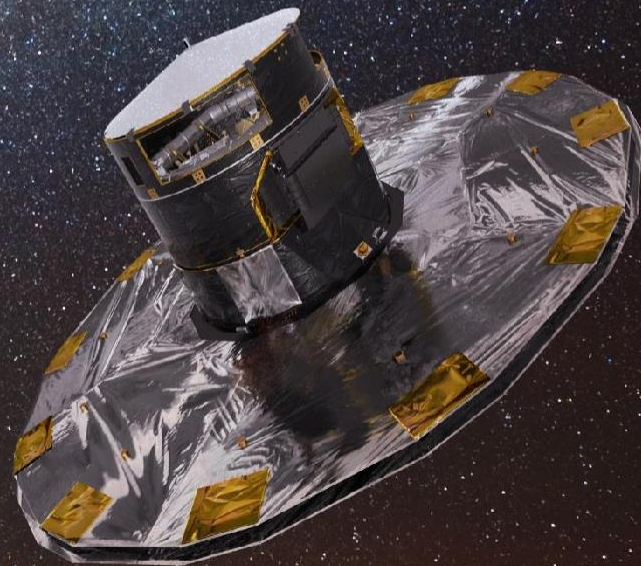
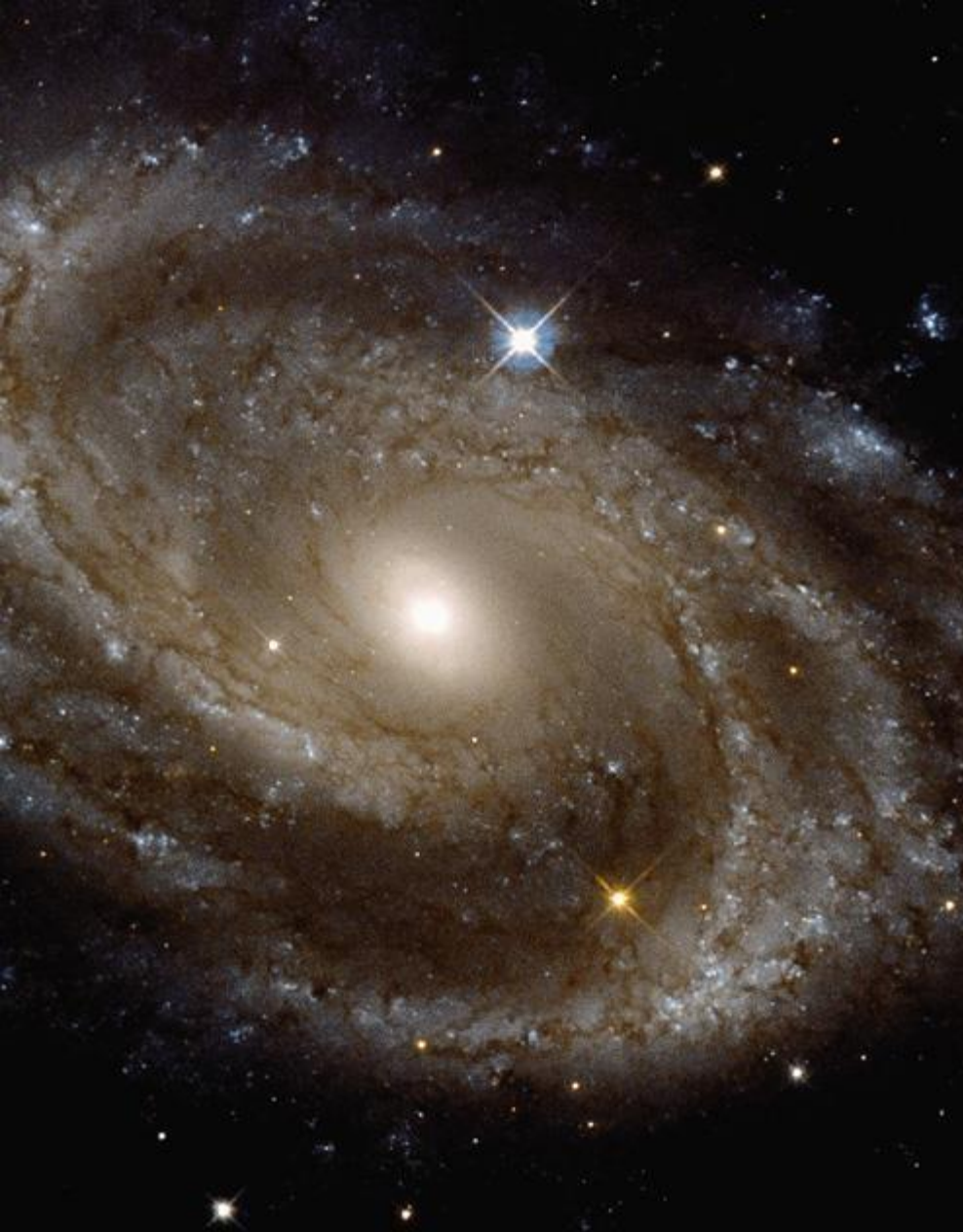


A VIA-LÁCTEA

a nossa Galáxia





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% H, 9% He+elementos pesados)**
- isolado no espaço e mantido junto pela sua própria gravidade.**

Número total estimado de galáxias dentro do nosso universo observável: 100-200 bilhões.

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

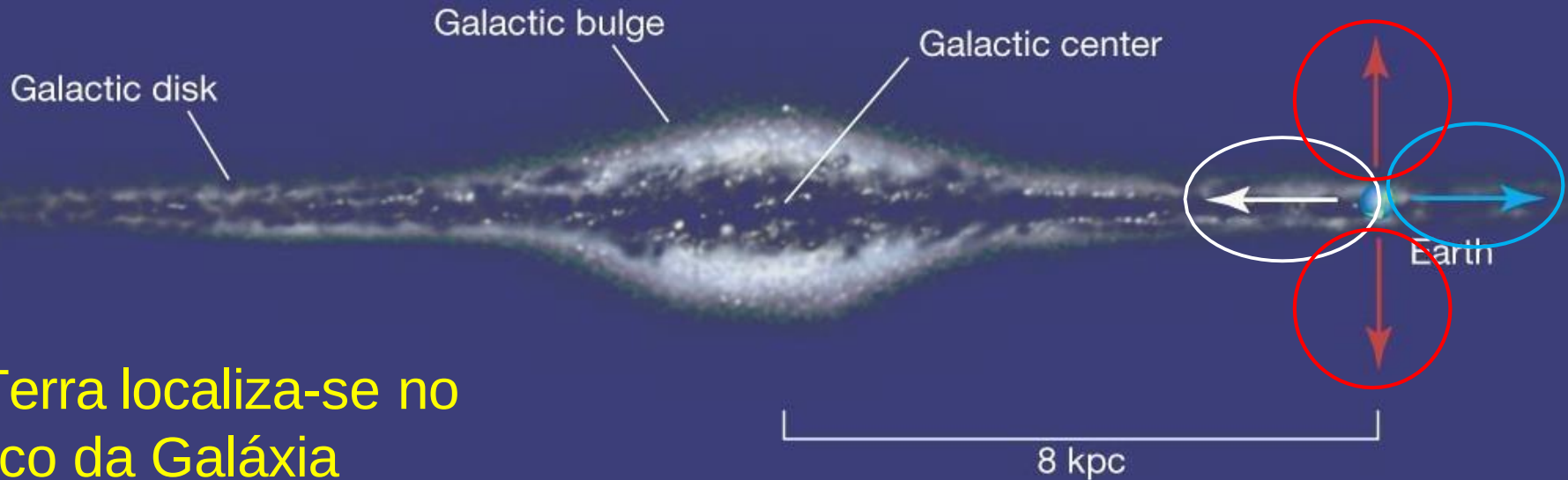


VIA LACTEA

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



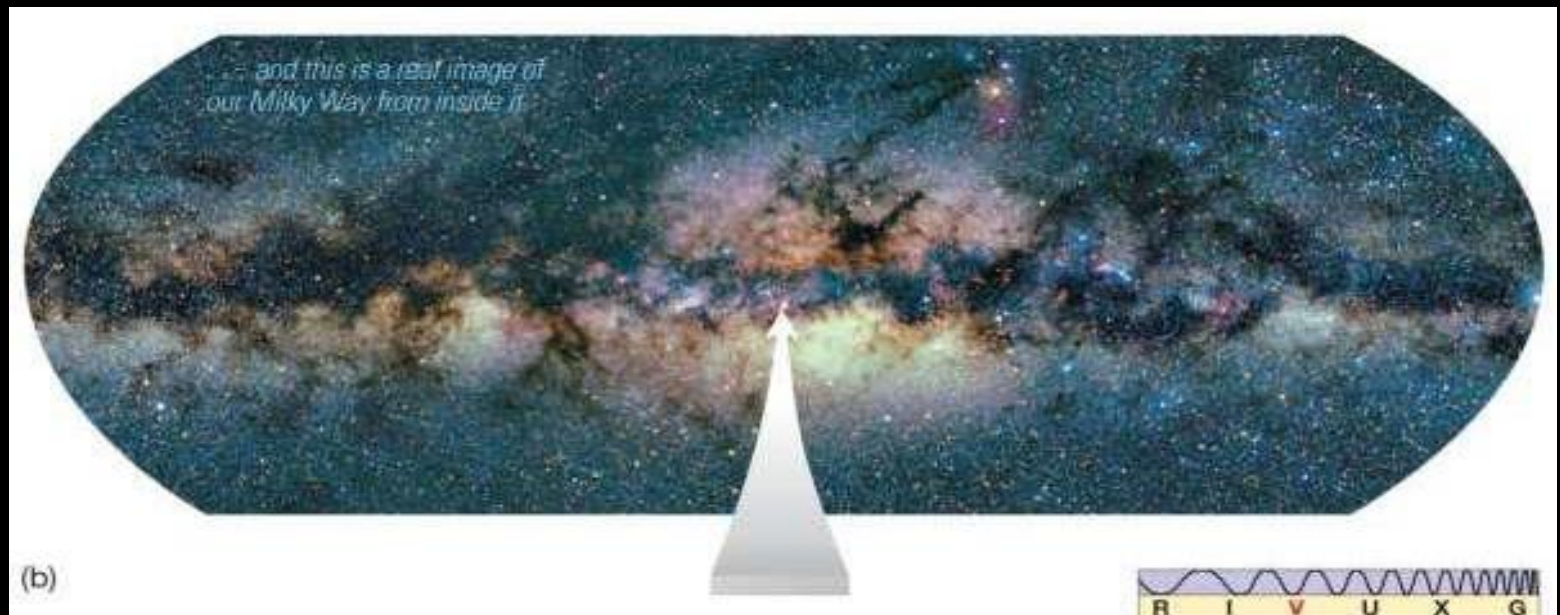
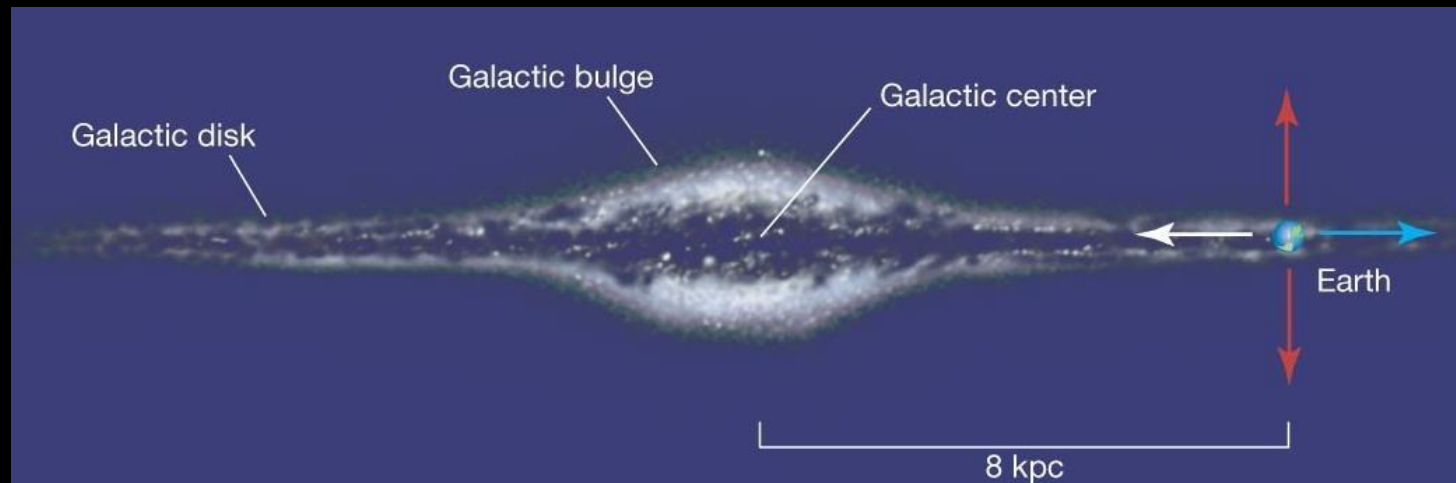
A Terra localiza-se no disco da Galáxia

Como a Galáxia é observada a olho nú da Terra :

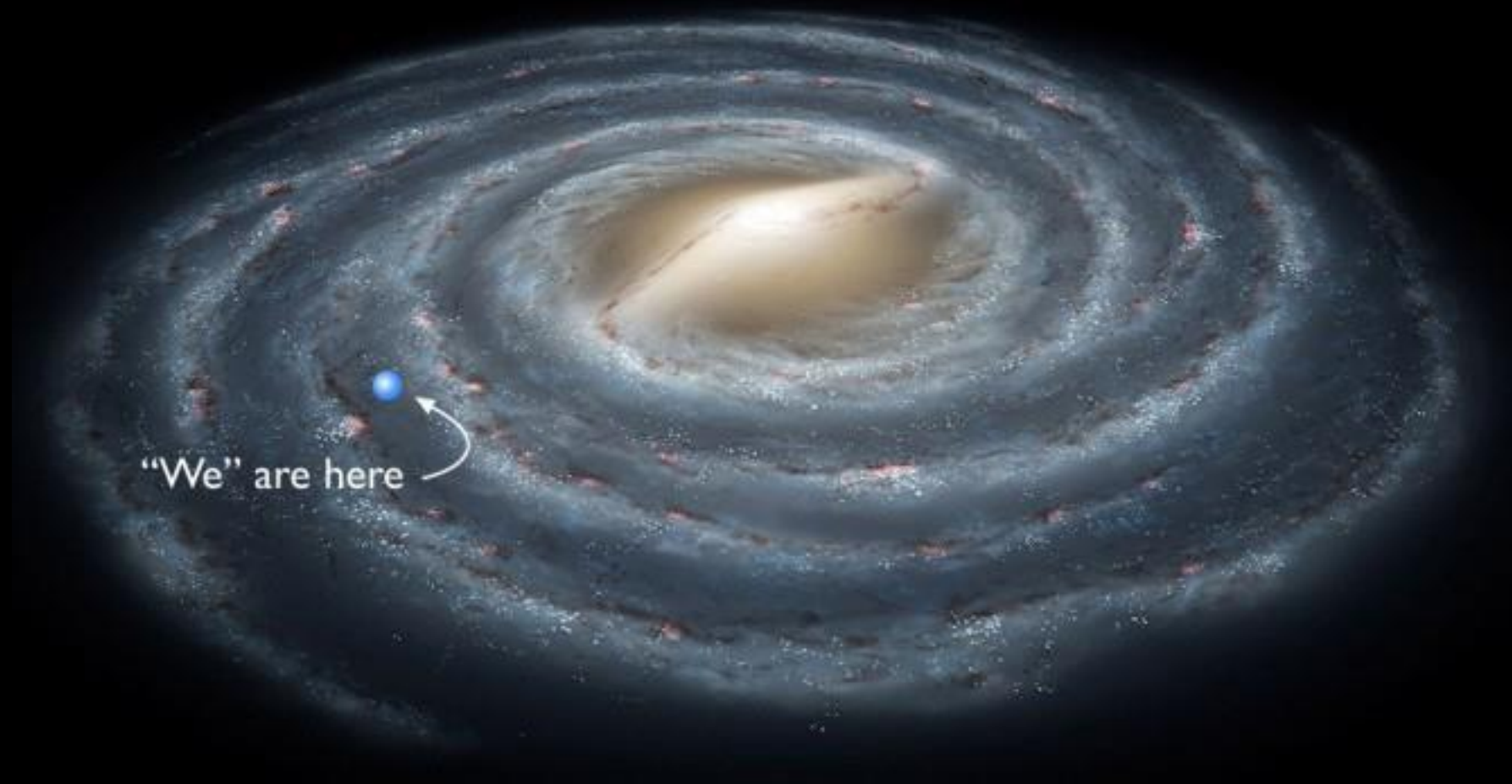
Seta branca → grande número de estrelas contidas numa faixa de luz (VIA LÁCTEA)

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

Setas vermelhas → poucas estrelas são vistas

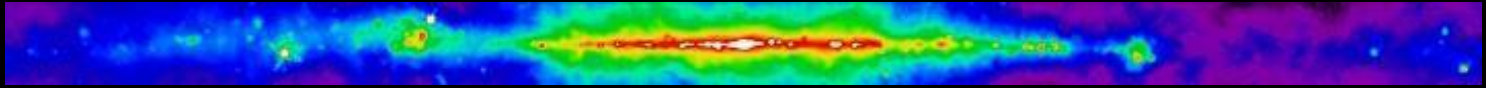


DIREÇÃO SETA BRANCA

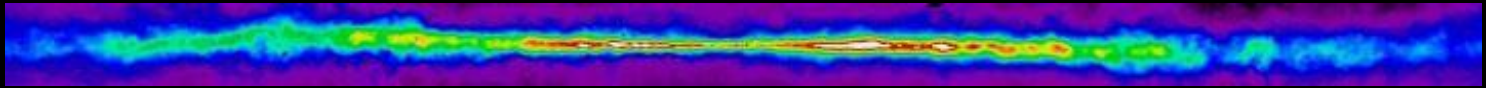


Decifrando a forma da Galáxia

Rádio (0,4 GHz) _



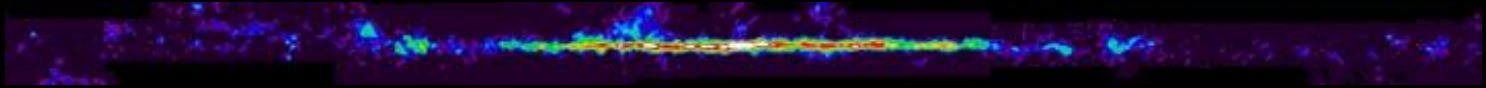
H Atômico (HI) _



Rádio (2,7 GHz) _



H Molecular _



Infravermelho _



IR próximo _



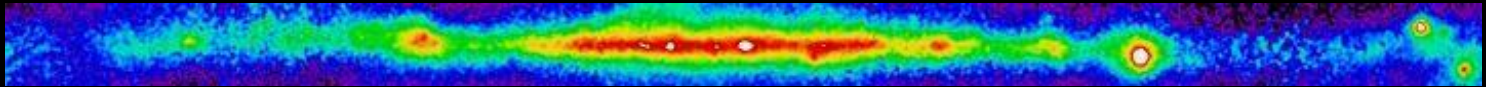
Ótico _



Raios X _



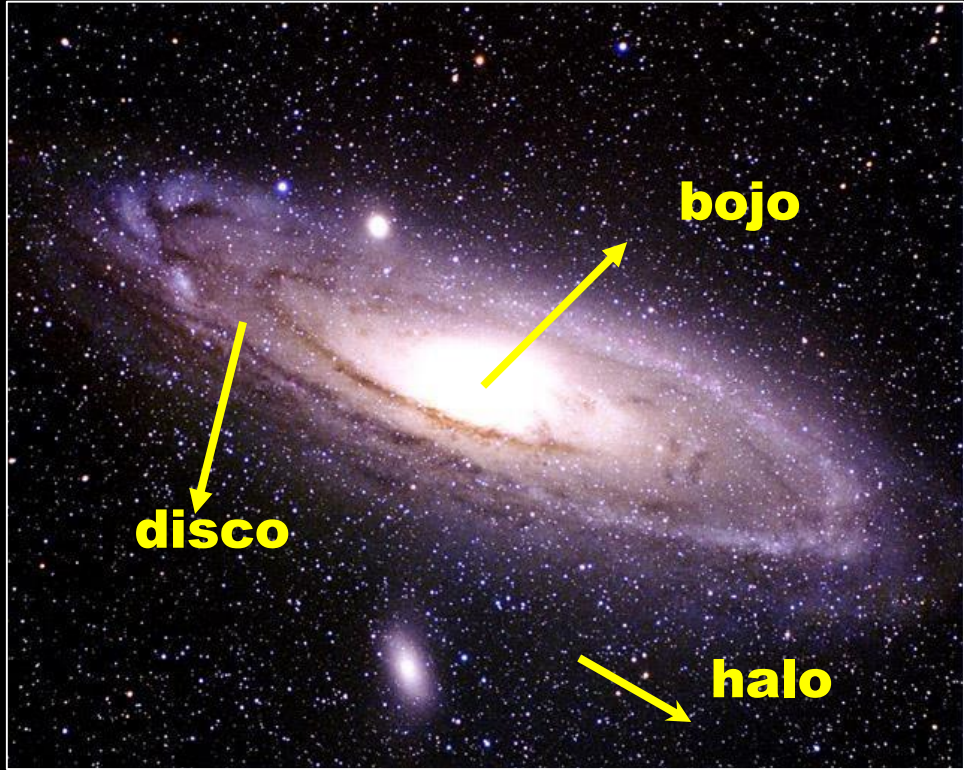
Raios Gama _



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)



NGC 2997



NGC 4565

Medindo a Galáxia por 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 $\sim$ BRILHOS INTRÍNSECOS IGUAIS: DIFERENÇA DE BRILHO $\Rightarrow$ 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

Sol próximo ao centro da distribuição de estrelas 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 ~30 kpc de diâmetro e Sistema solar ~ 8 kpc do centro da galáxia.

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"

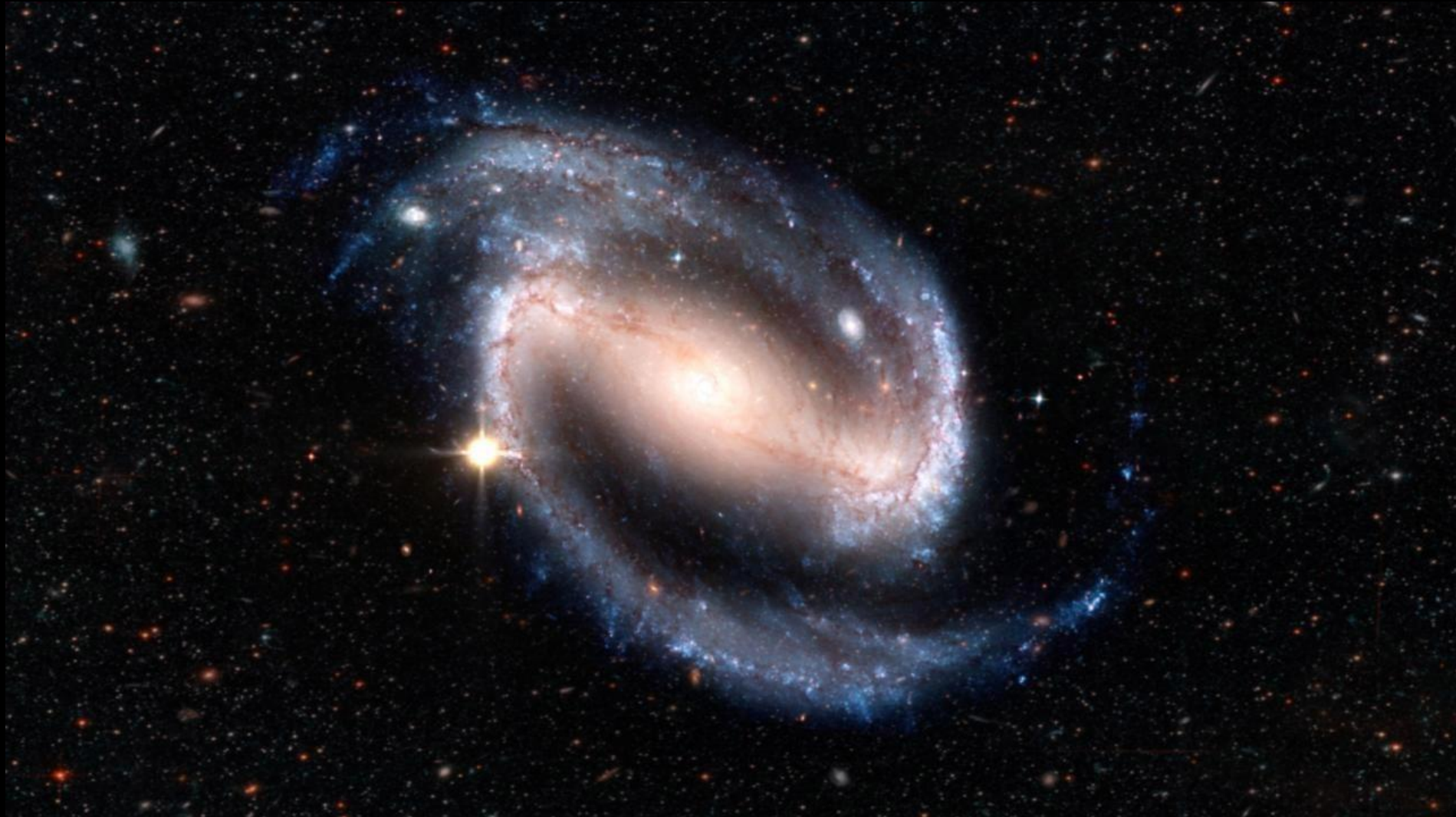
Harlow Shapley: defendeu a hipótese nebular convencional: são objetos da nossa Galáxia .

• 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**





INDICADORES DE DISTÂNCIA: VARIÁVEIS INTRÍNSECAS

classe importante:
Estrelas Variáveis Pulsantes



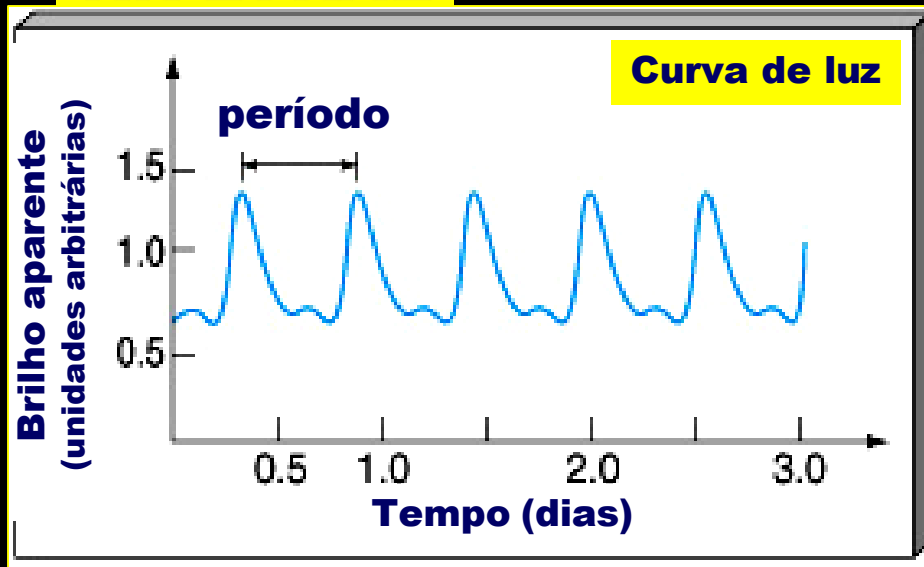
- ❖ **Variam o brilho com períodos bem definidos**
- ❖ **Determinando-se o período $\Rightarrow$ determina-se a luminosidade L**

Estrelas pulsam na fase pós sequência principal $\Rightarrow$ gigante ou supergigante $\Rightarrow$ variação de tamanho e brilho

Dois tipos são bons determinadores de distância na Galáxia e em galáxias vizinhas (denominação em função das primeiras variáveis descobertas na direção das constelações Lira e Cefeus):

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

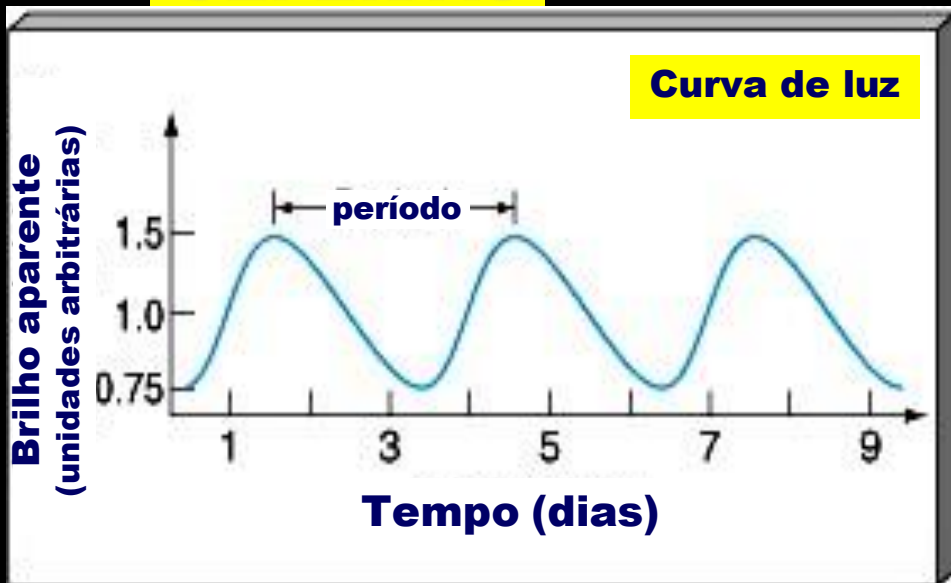
RR LYRAE



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

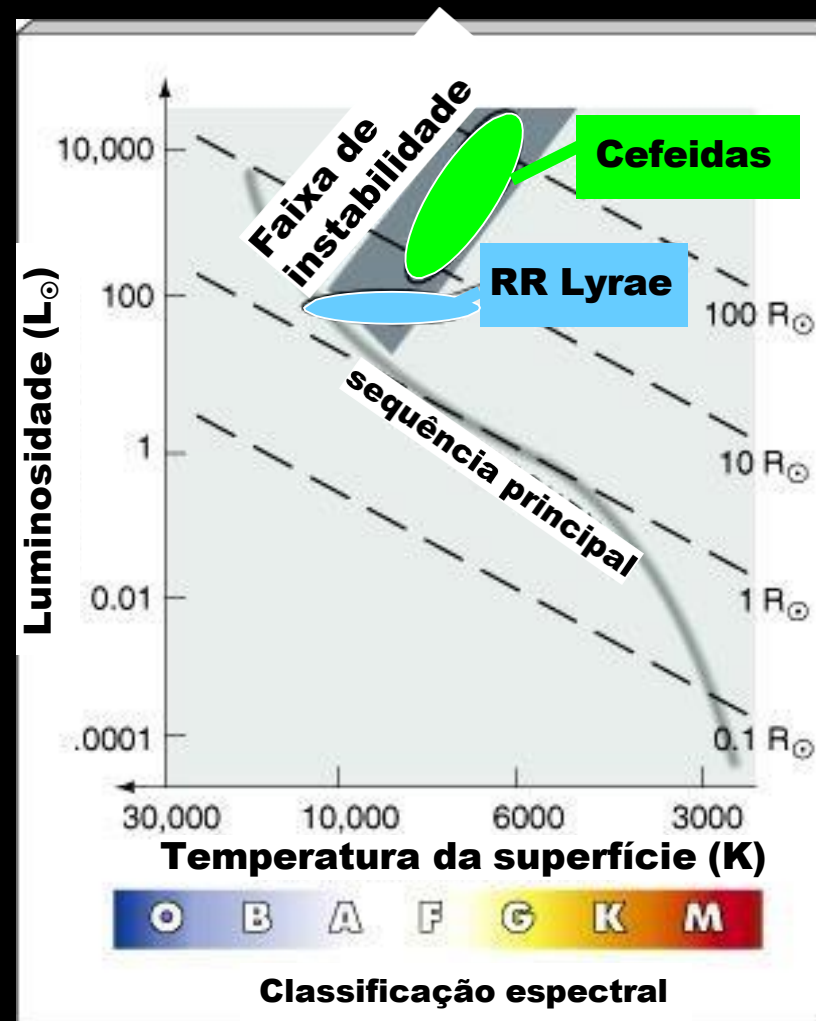
Uma estrela variável pode ser identificada apenas pela variação da luz emitida por ela.

CEFEIDAS



Períodos observados entre diferentes Cefeidas : 1 a 100 dias

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



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

Localização:

Gigantes e supergigantes:

- Jovens nos braços de espirais: aglom. abertos e associações OB
- velhas em aglomerados globulares (mais raras)

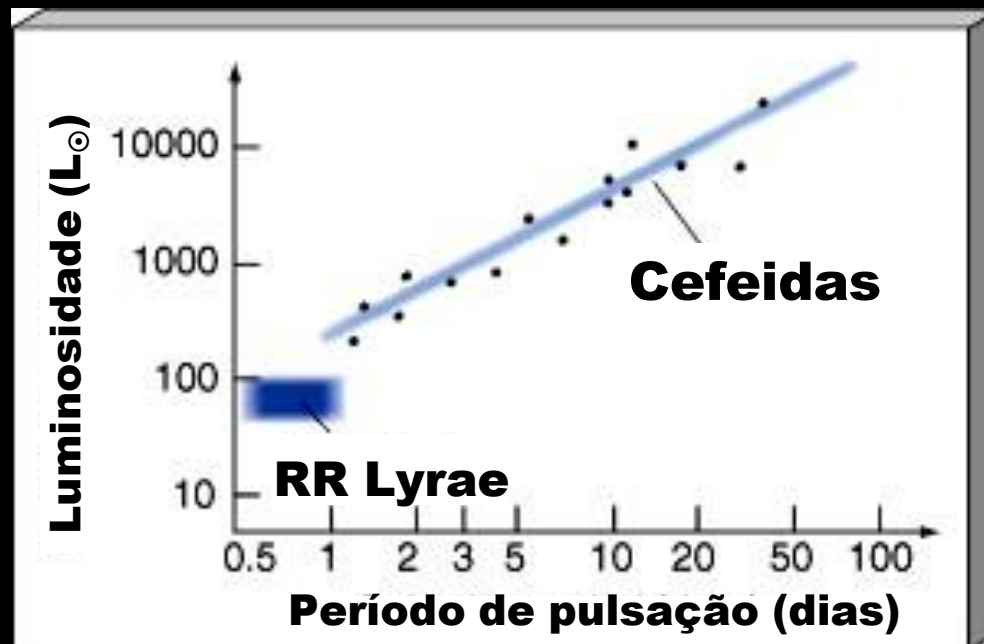
RR Lyrae : estrela de mais baixa massa que evolui para a faixa de instabilidade na fase de gigante.

Localização:

- gigantes velhas encontradas no halo ou em aglomerados globulares

Relação período-luminosidade: Variáveis como “velas padrão”

⇒ para estrelas em que não se pode determinar distância através de paralaxe: se forem variáveis pode-se identificar o tipo de variável e usar o seu período de pulsação para estimar a sua luminosidade máxima.

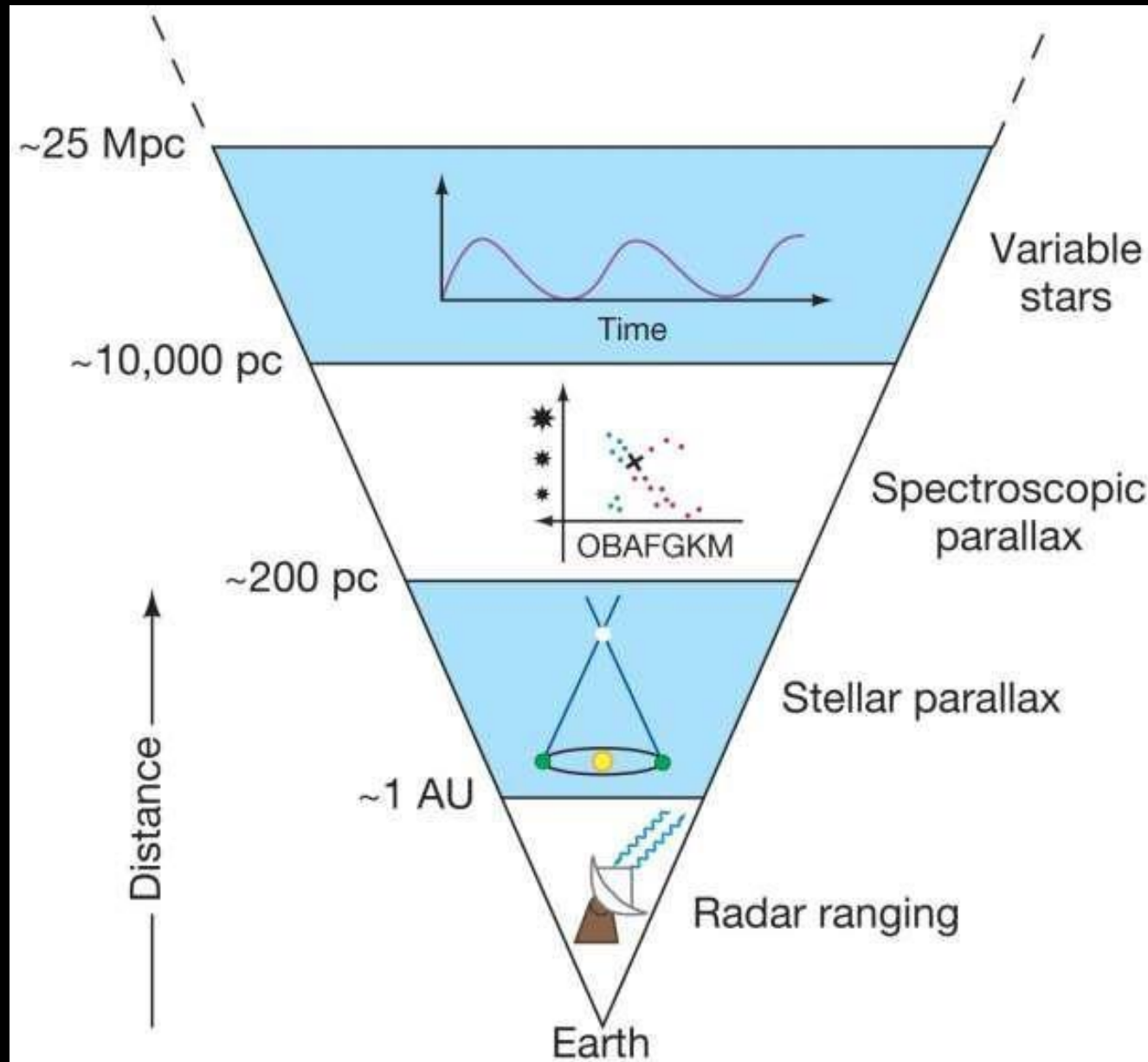


Determinando luminosidade, têm-se magnitude absoluta:

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

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

H. Shapley (começo do século XX) observando as RR Lyrae em aglomerados globulares fez duas importantes descobertas:

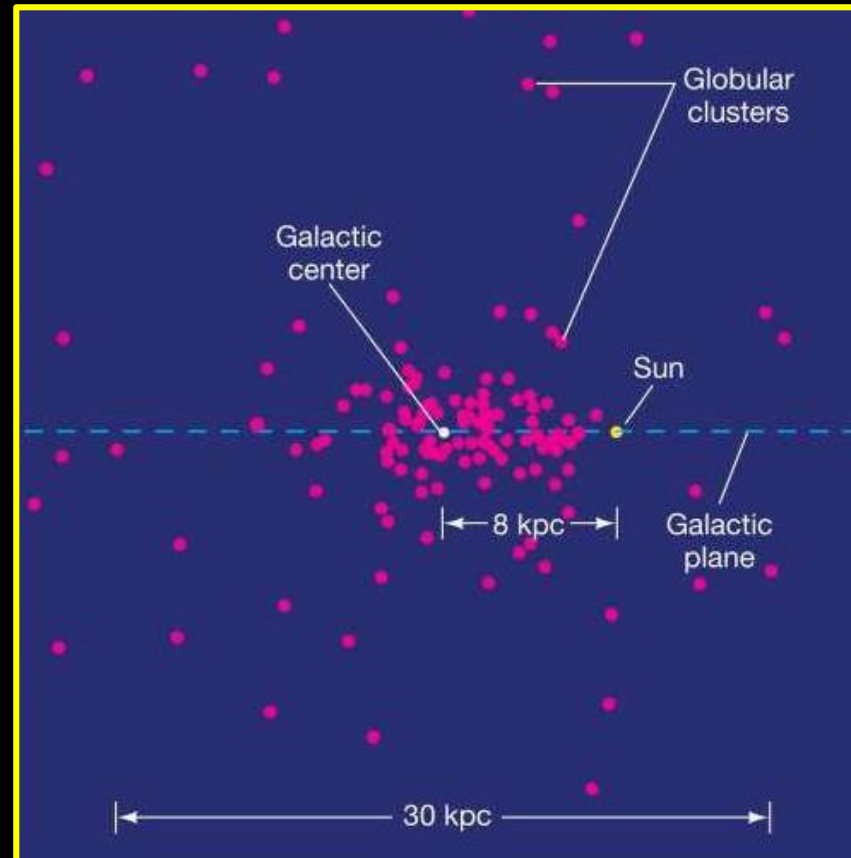
1. A maior parte dos aglomerados globulares está a grande distância do Sol (centenas de pc)
2. Os aglomerados ocupam um volume grande e ~ esférico (diâmetro de ~ 30 Kpc).

A DISTRIBUIÇÃO DOS AGLOMERADOS
REPRESENTA A MÁXIMA EXTENSÃO
DA DISTRIBUIÇÃO DAS ESTRELAS NA
GALÁXIA



HALO DA GALÁXIA

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



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

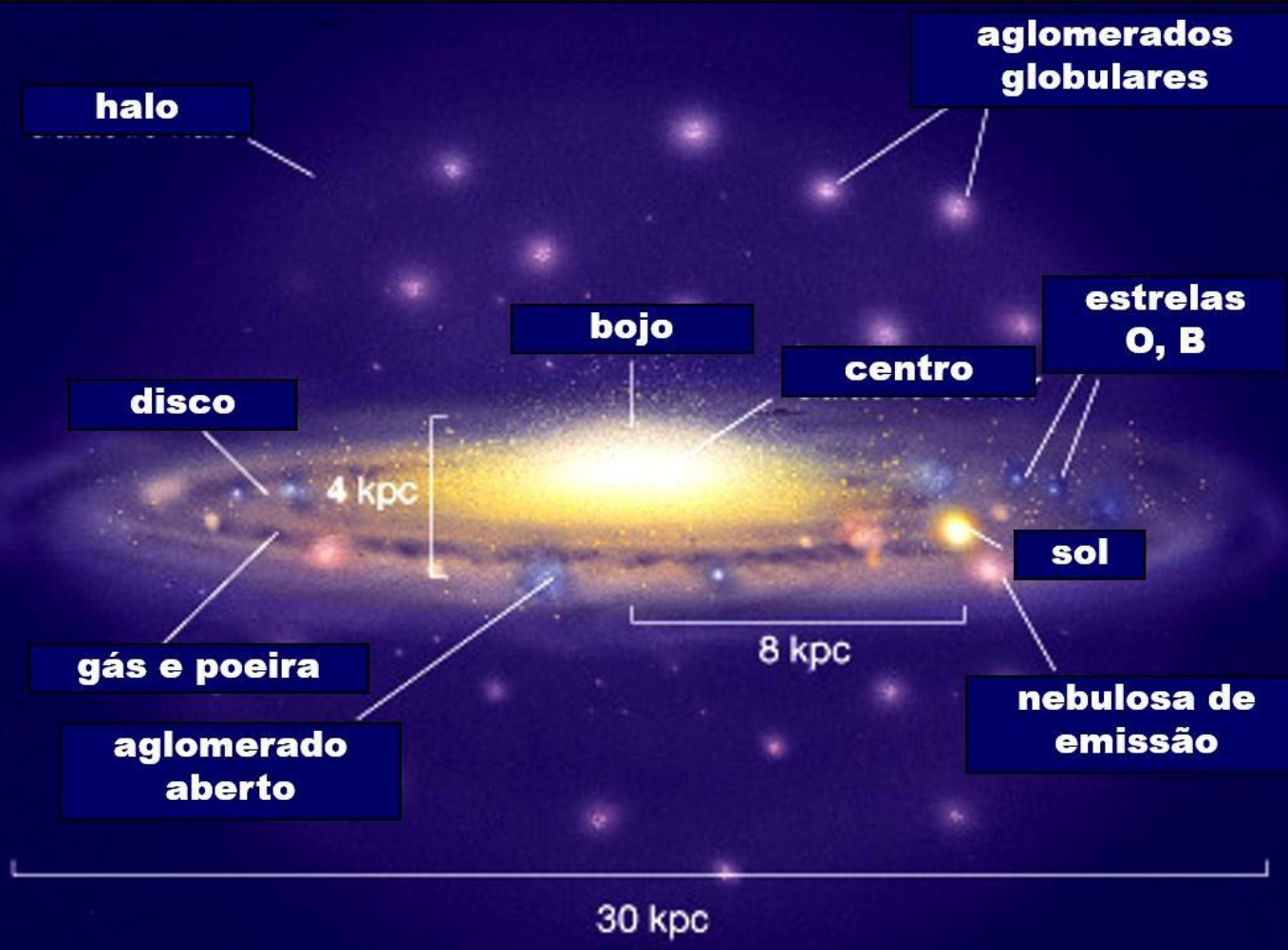
- Somente em 1925 Edwin Hubble usando o telescópio de 2,5 m de Mt Wilson: encontrou estrelas variáveis **CEFEIDAS** em Andromeda e determinou sua distância
- Comprovou que Andromeda está a uma distância muito além da nossa Galáxia: $D=2,5$ milhões de anos-luz ou ~ 800 kpc

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.

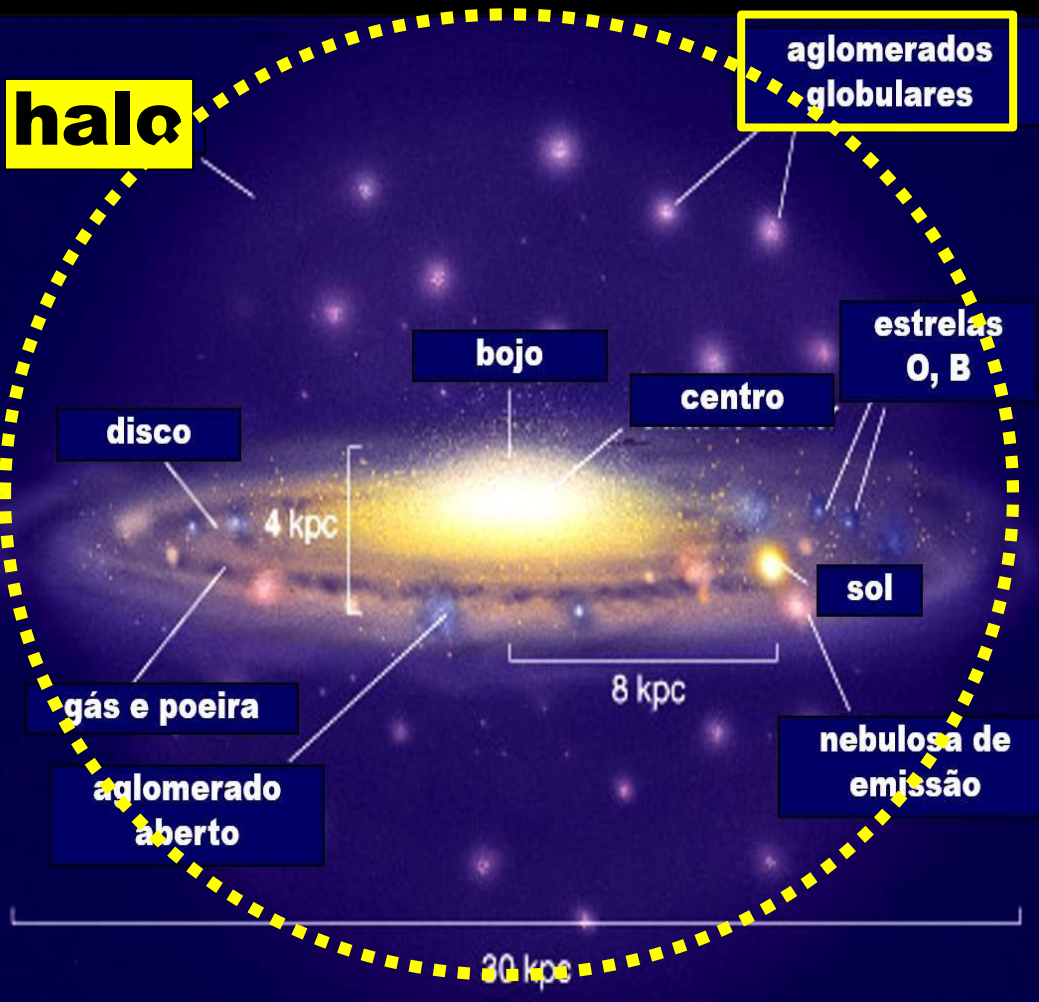


componentes:

- Halo
- Disco
- bojo

HALO

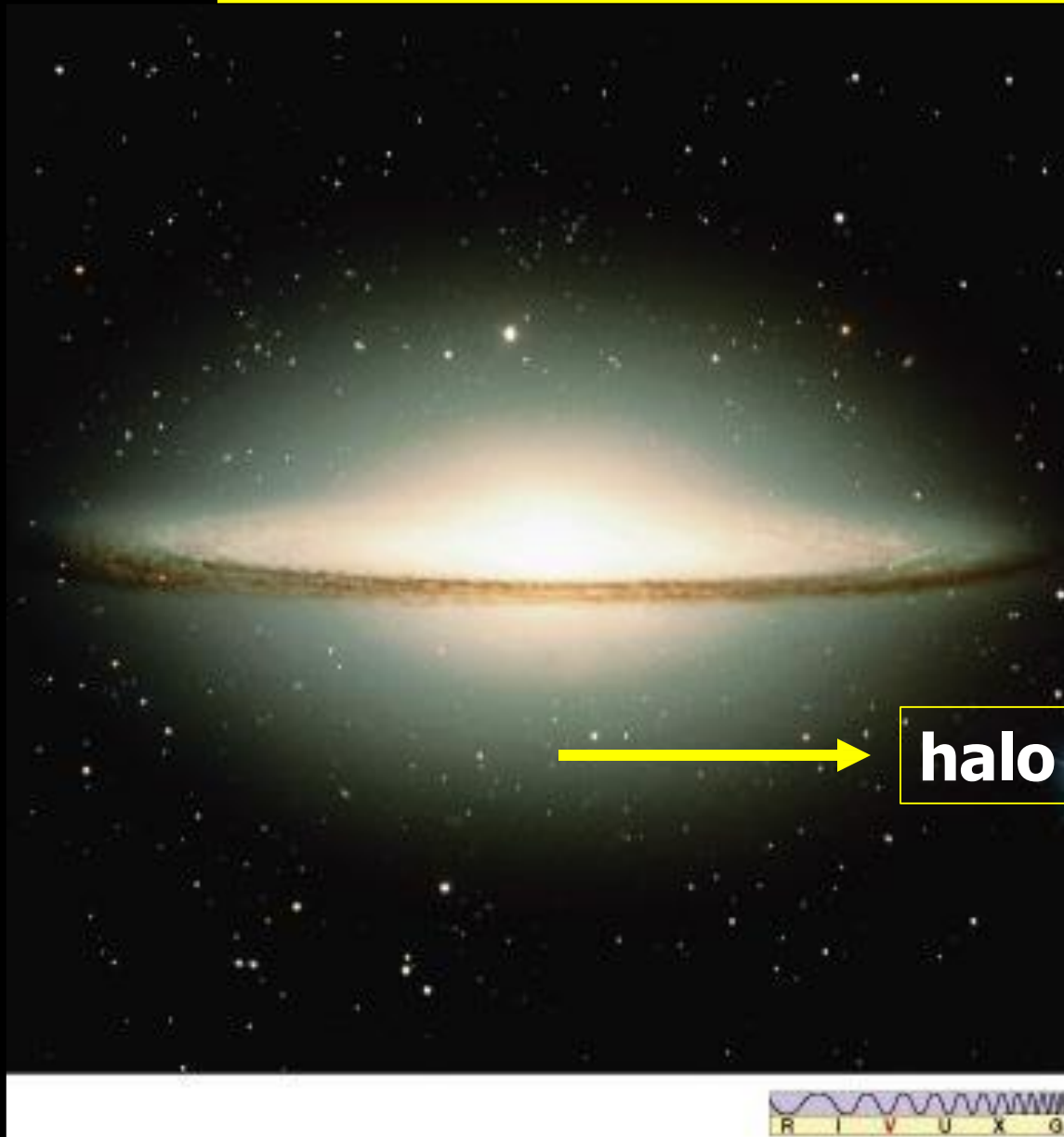
PROPRIEDADES



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

Primeira estrutura a ser formada na Galáxia.

M104 – Galáxia sombreiro



DISCO

PROPRIEDADES

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

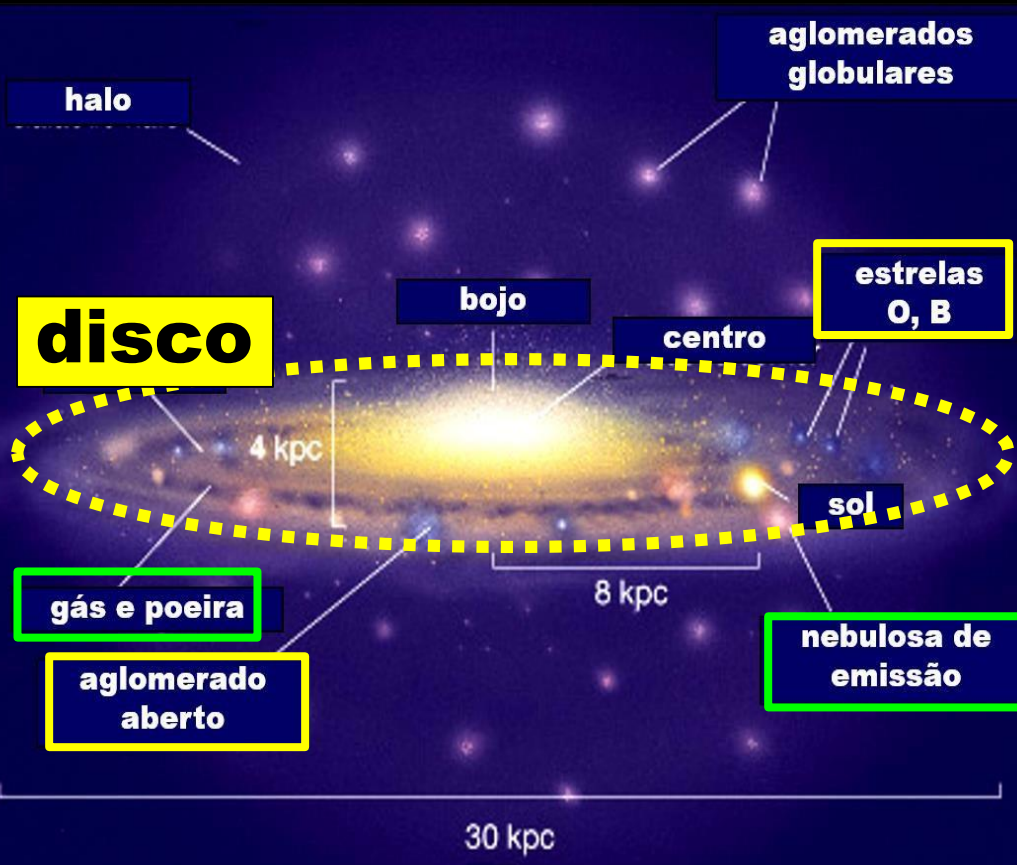
Disco formado após o Halo

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



regiões de formação estelar

Contém braços de espirais (subestrutura)



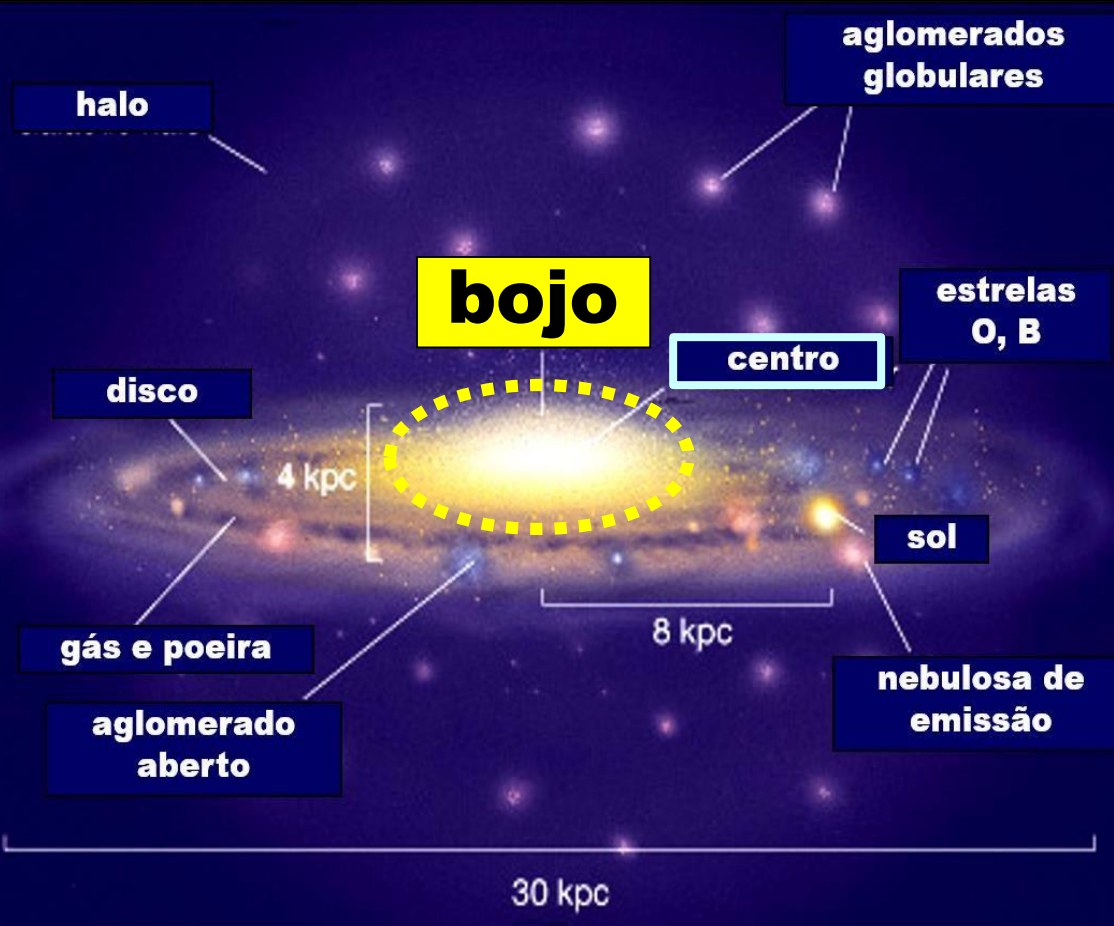
BOJO

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**



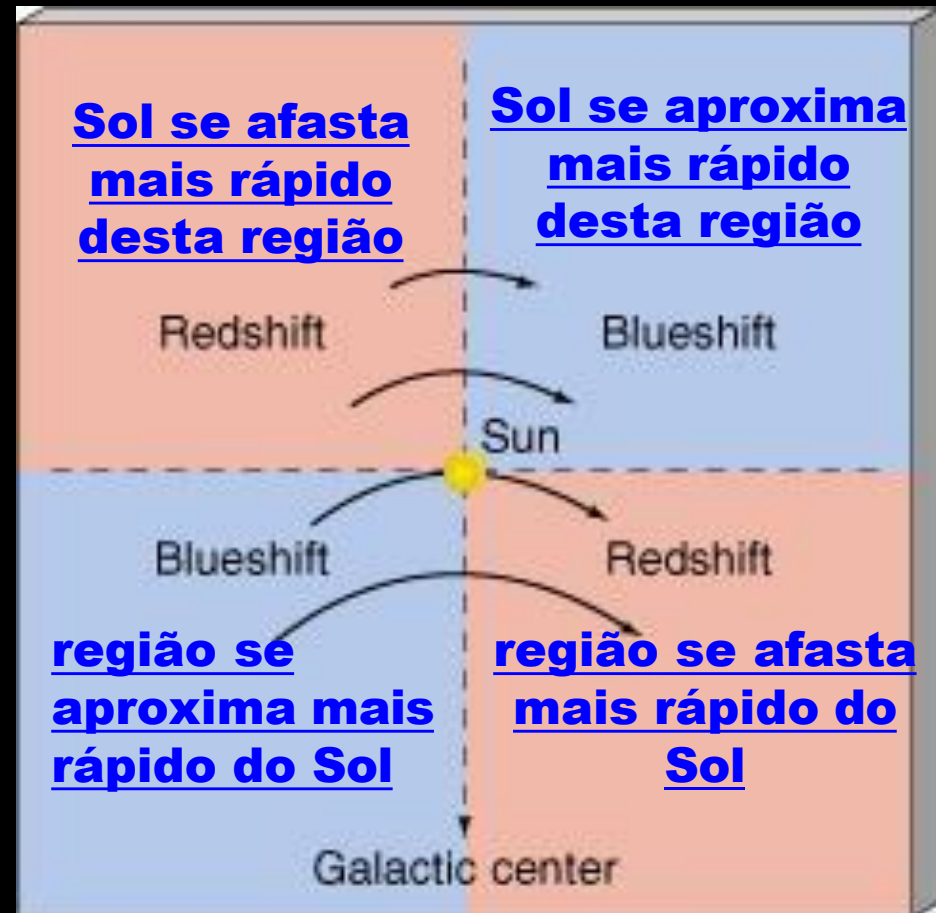
A DINÂMICA DA NOSSA GALÁXIA

Movimento das estrelas, gás e poeira

**Estrelas e gás
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

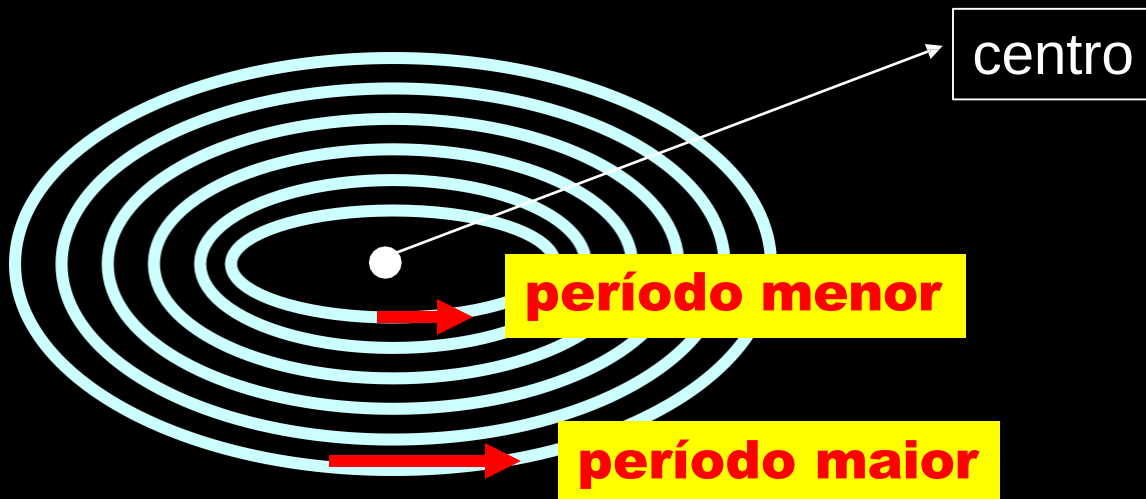
Na vizinhança do Sol a velocidade orbital é de 220 km/s e estamos a 8 kpc do centro.

Supondo uma órbita $\approx$ circular:

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

O material leva $\sim$ 225 milhões de anos para dar 1 volta completa em torno do centro da Galáxia $\Rightarrow$ 1 ANO GALÁCTICO

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



**Disco rota diferencialmente!
(não rota como 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



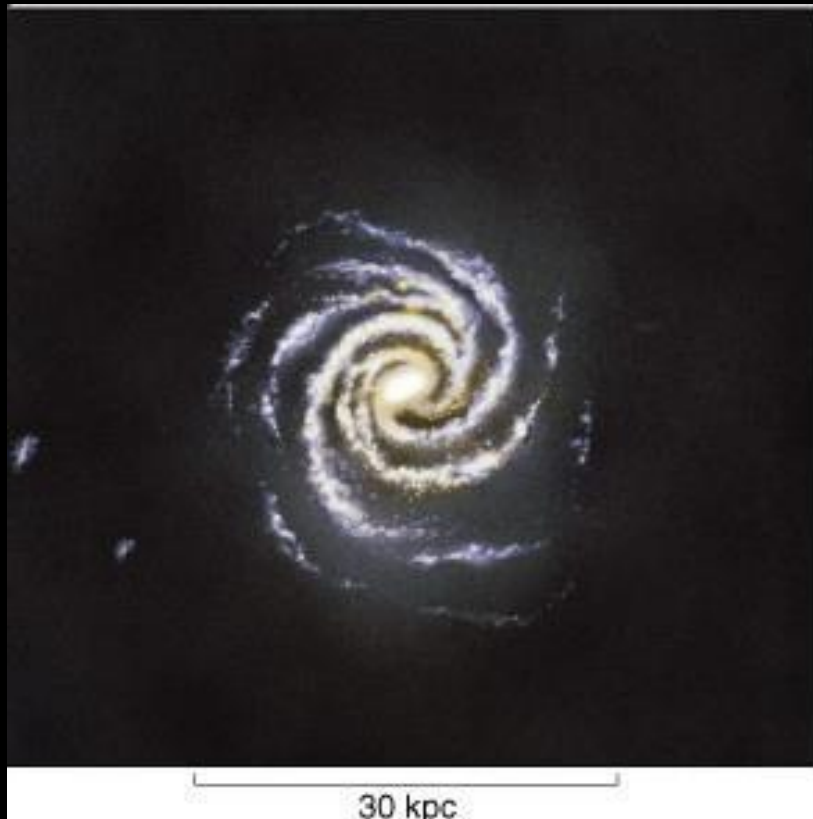
RESUMO DAS PROPRIEDADES OBSERVADAS DAS GALÁXIAS

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

OS BRAÇOS DE ESPIRAIS

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

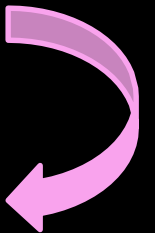
MAPAS DE RÁDIO DA NOSSA GALÁXIA



Diâmetro do disco ~ 30 kpc

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

VIZINHANÇA SOLAR



FORMAÇÃO E DURAÇÃO DOS BRAÇOS DE ESPIRAIS

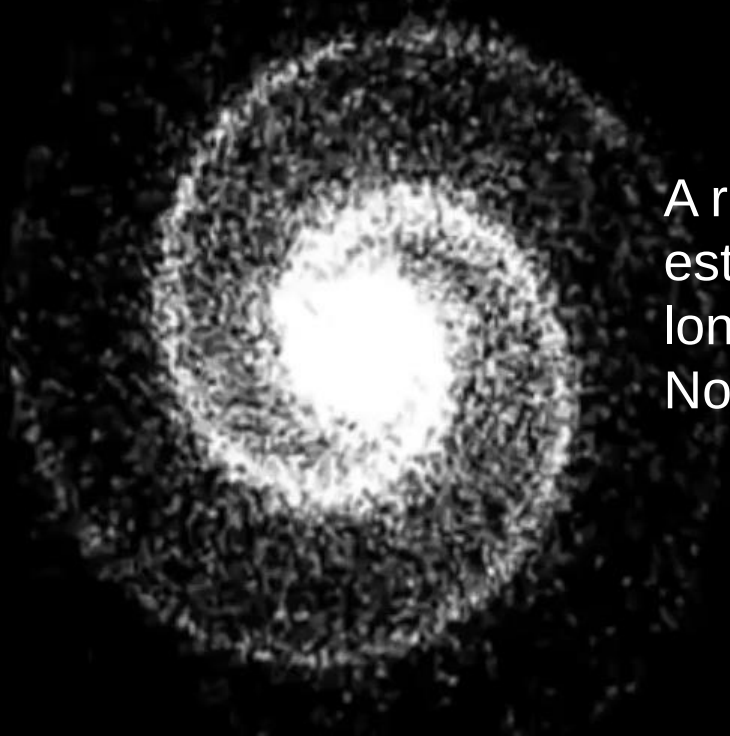
Os braços de espirais são formados por:

- gás
- poeira
- estrelas jovens O e B
- nebulosas de emissão: regiões ligadas à formação recente de estrelas
- 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 desaparecessem rapidamente ao longo do tempo ($\sim 100 \times 10^6$ anos)...
No entanto não é o que se observa.

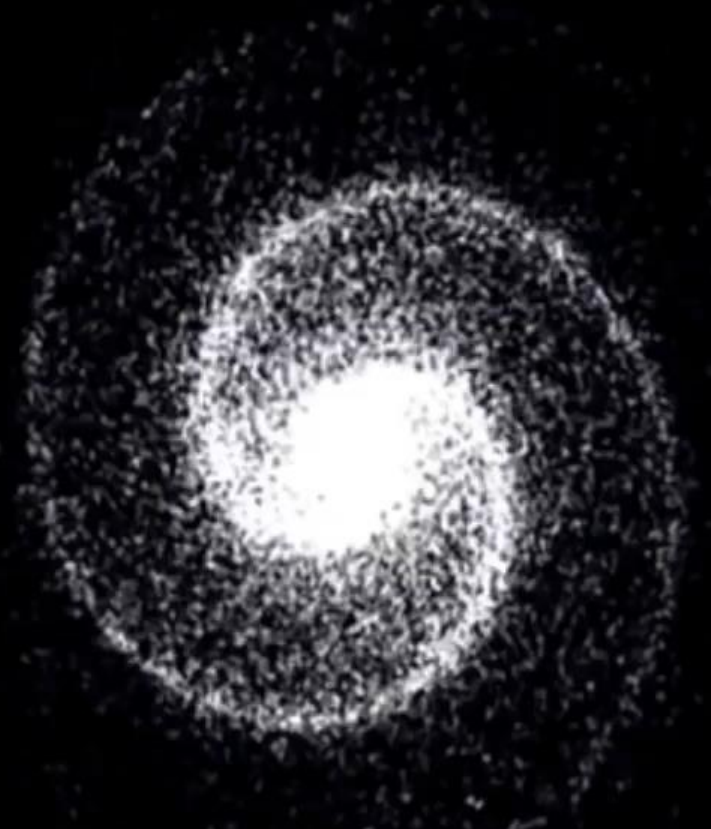
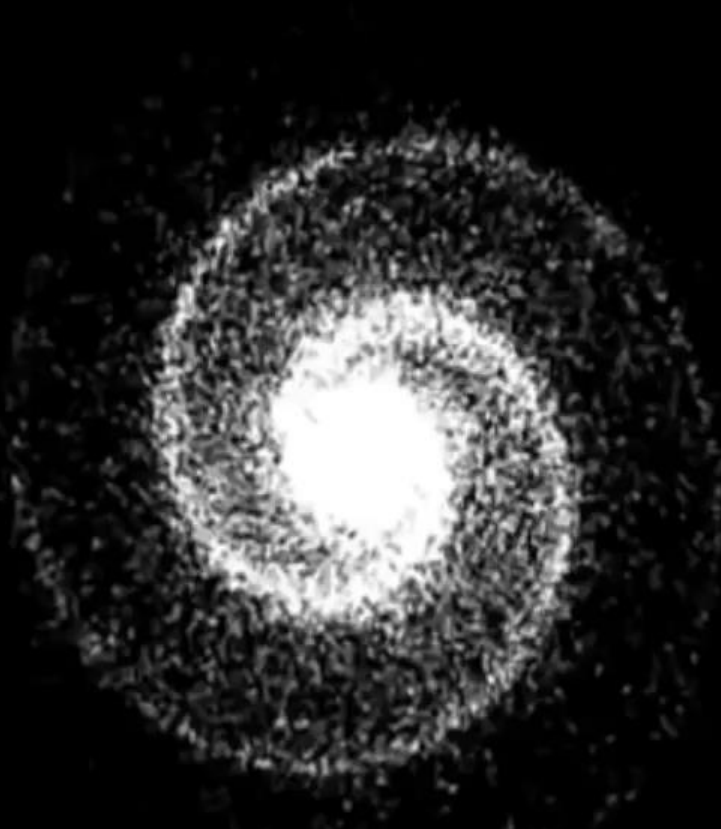
EXPLICAÇÃO: ONDAS ESPIRAIS DE DENSIDADE

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

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:
 $v^2 = GM/R$

Relembrando: força centrípeta = força gravitacional

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

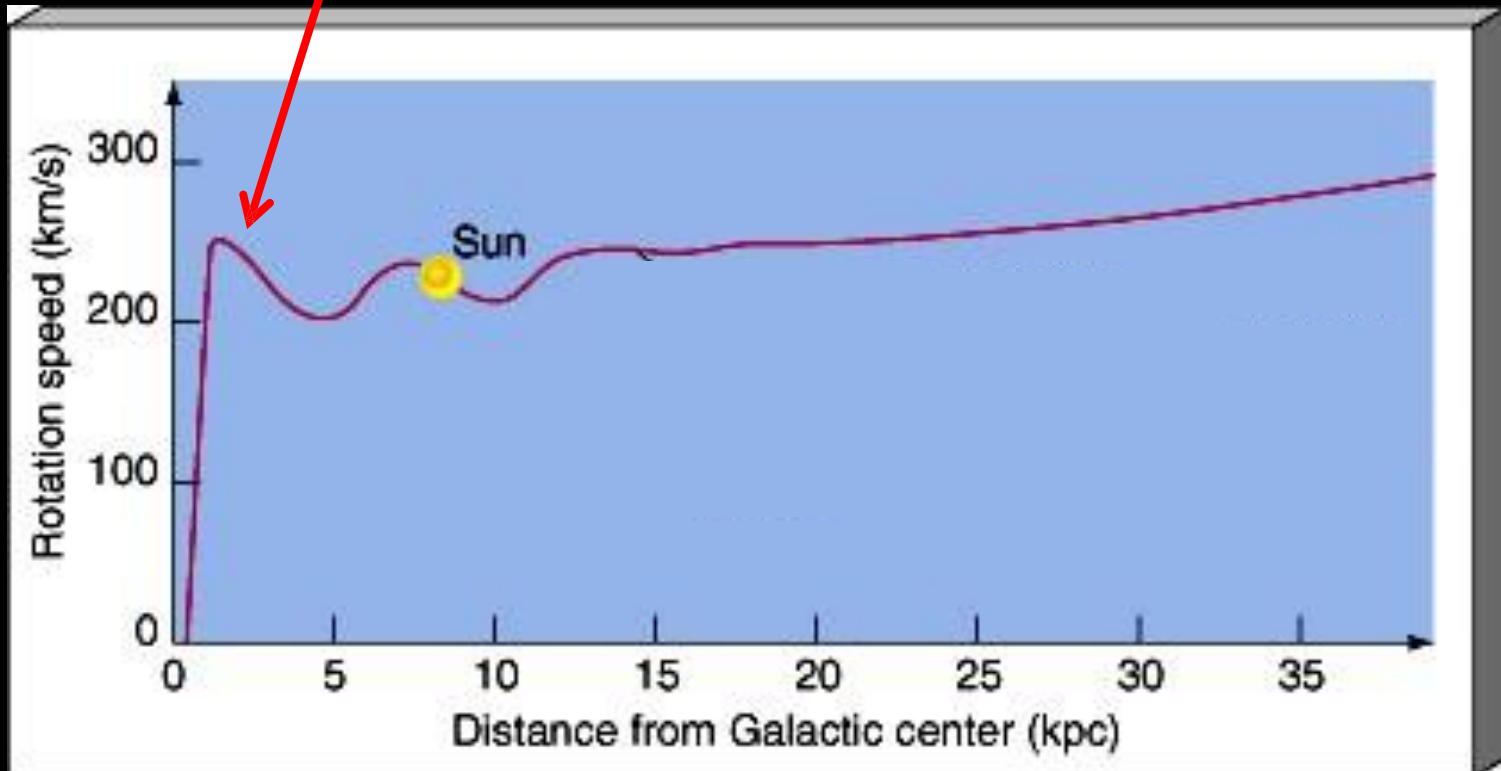
Massa do volume contido na órbita do Sol:
 $r \sim 8 \text{ kpc}$; $v = 220 \text{ km/s} \Rightarrow \sim 9 \times 10^{10} M_{\odot}$

A MASSA DA GALÁXIA

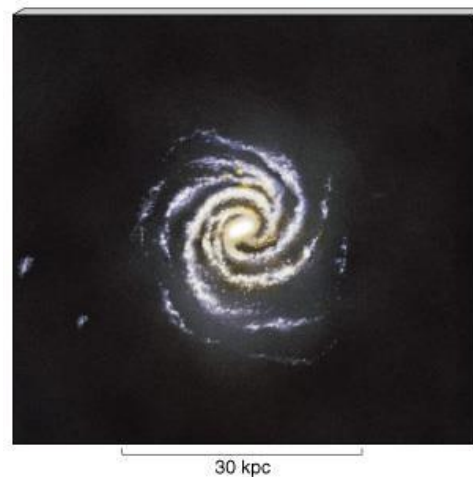
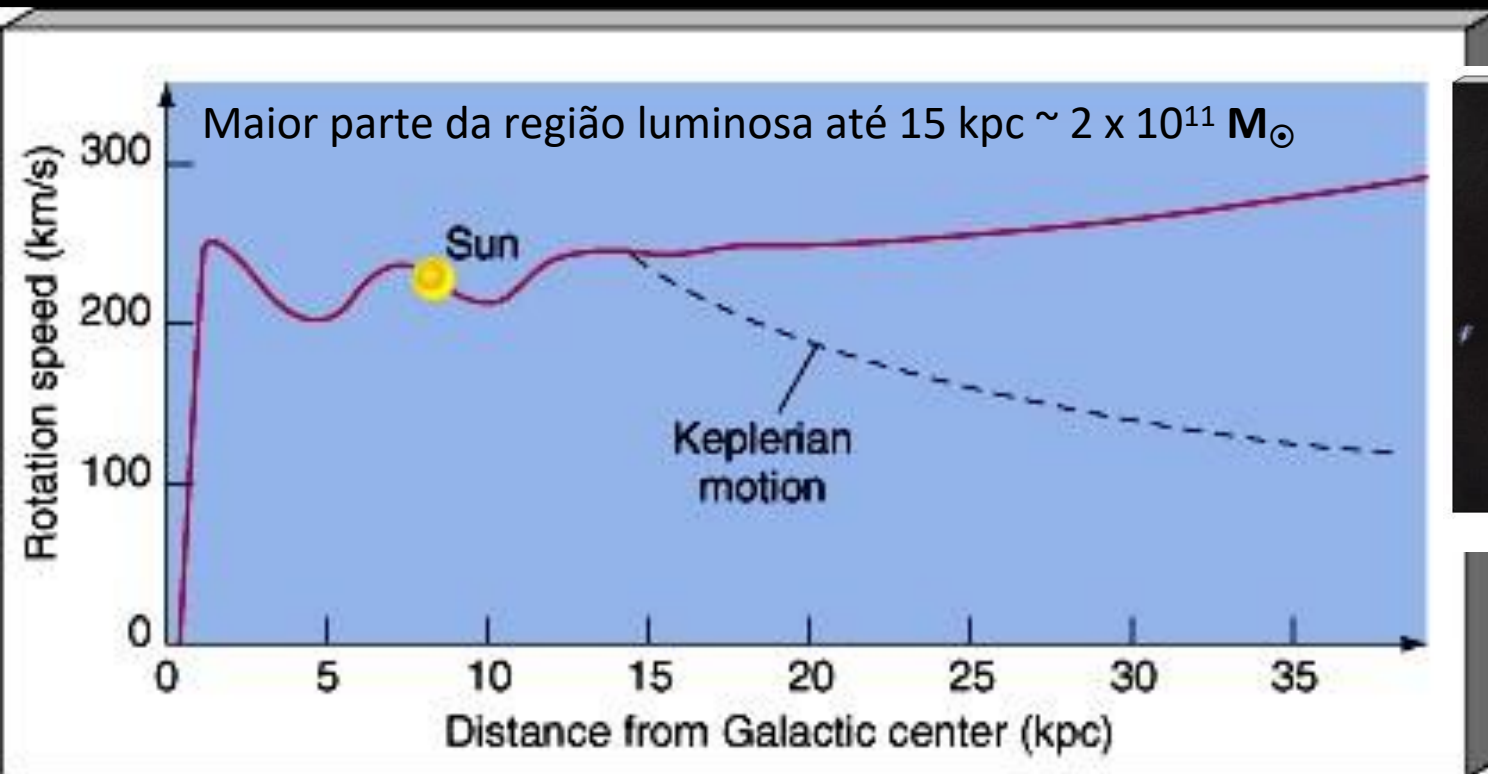
Para medir a maiores distâncias $\Rightarrow$ observações do gás em rádio frequências

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 junto com matéria que não conseguimos medir diretamente

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)**

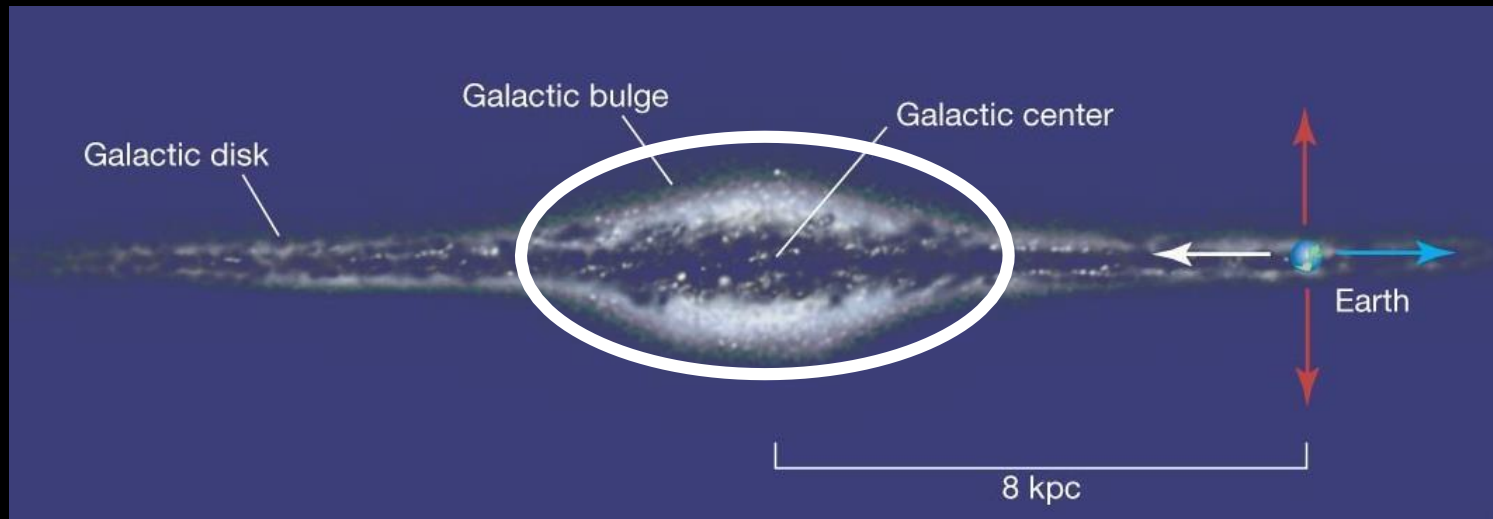
**Weakly Interating Massive Particles
(partículas subatômicas com massa,
mas que não interage com a matéria
ou radiação)**

O CENTRO DA NOSSA GALÁXIA

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.

Solução: observações no IR e rádio



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 parsec^3 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!

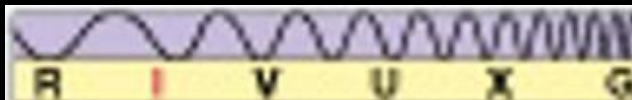
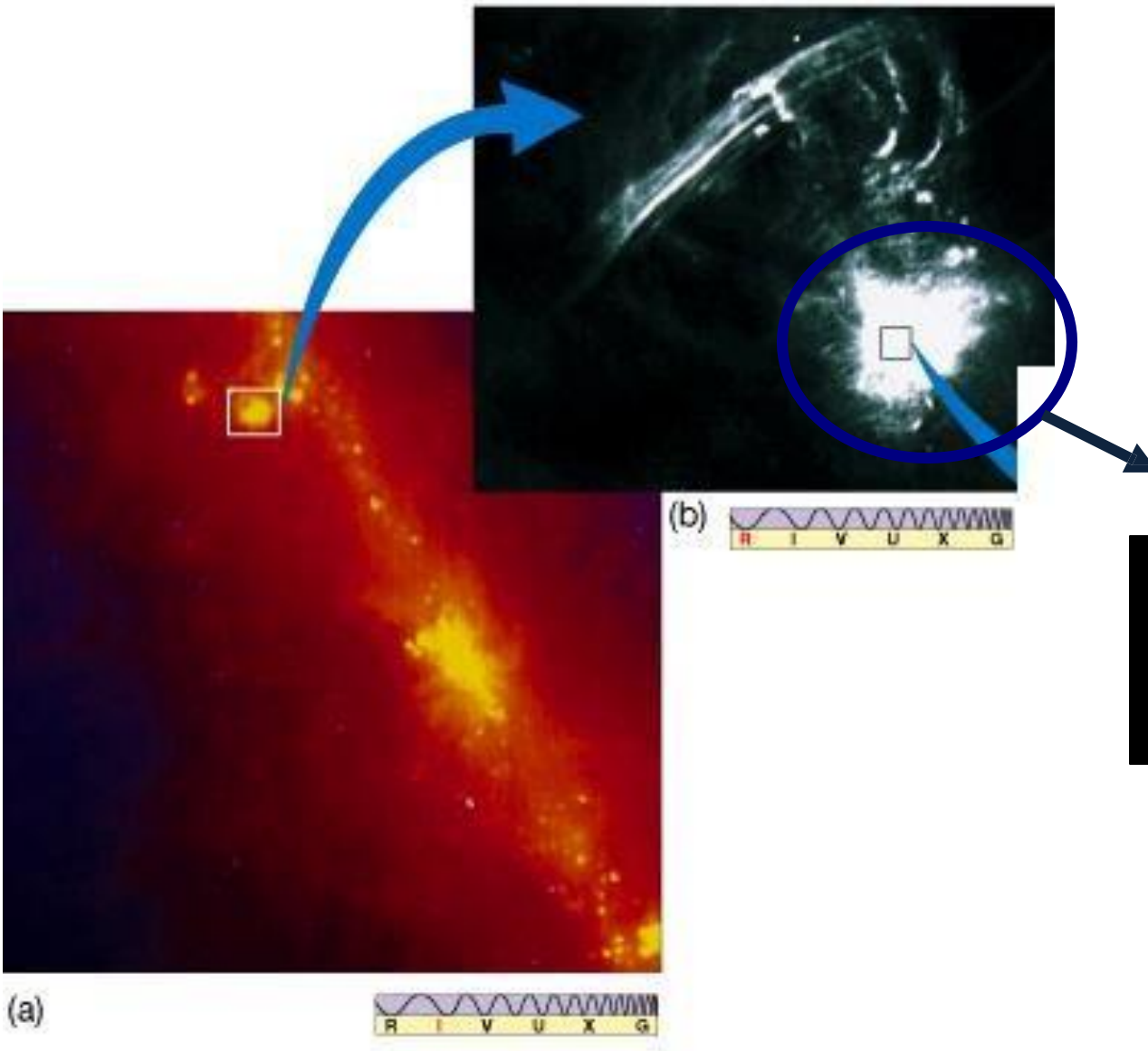
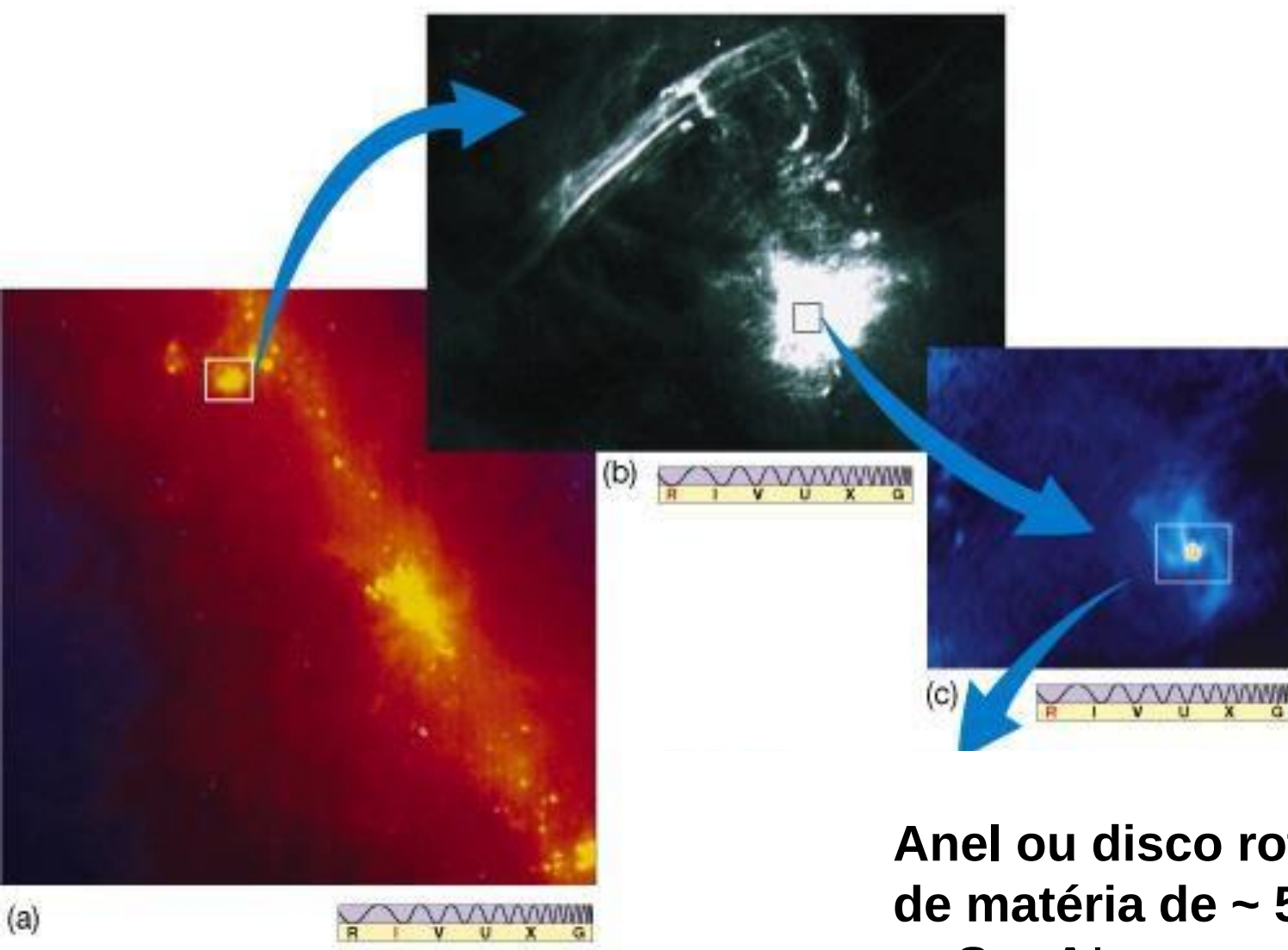


Imagem em rádio mostra zonas ainda mais profundas na direção central da Galáxia: **anel de gás molecular** de ~ 400 pc de diâmetro que contém cerca de $30.000 M_{\odot}$ de material e que rota com velocidade de 100 km/s.



**Fonte brilhante
=
Sagitário A**



**Anel ou disco rotante
de matéria de ~ 5 pc
 $\Rightarrow$ Sgr A*.**

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.



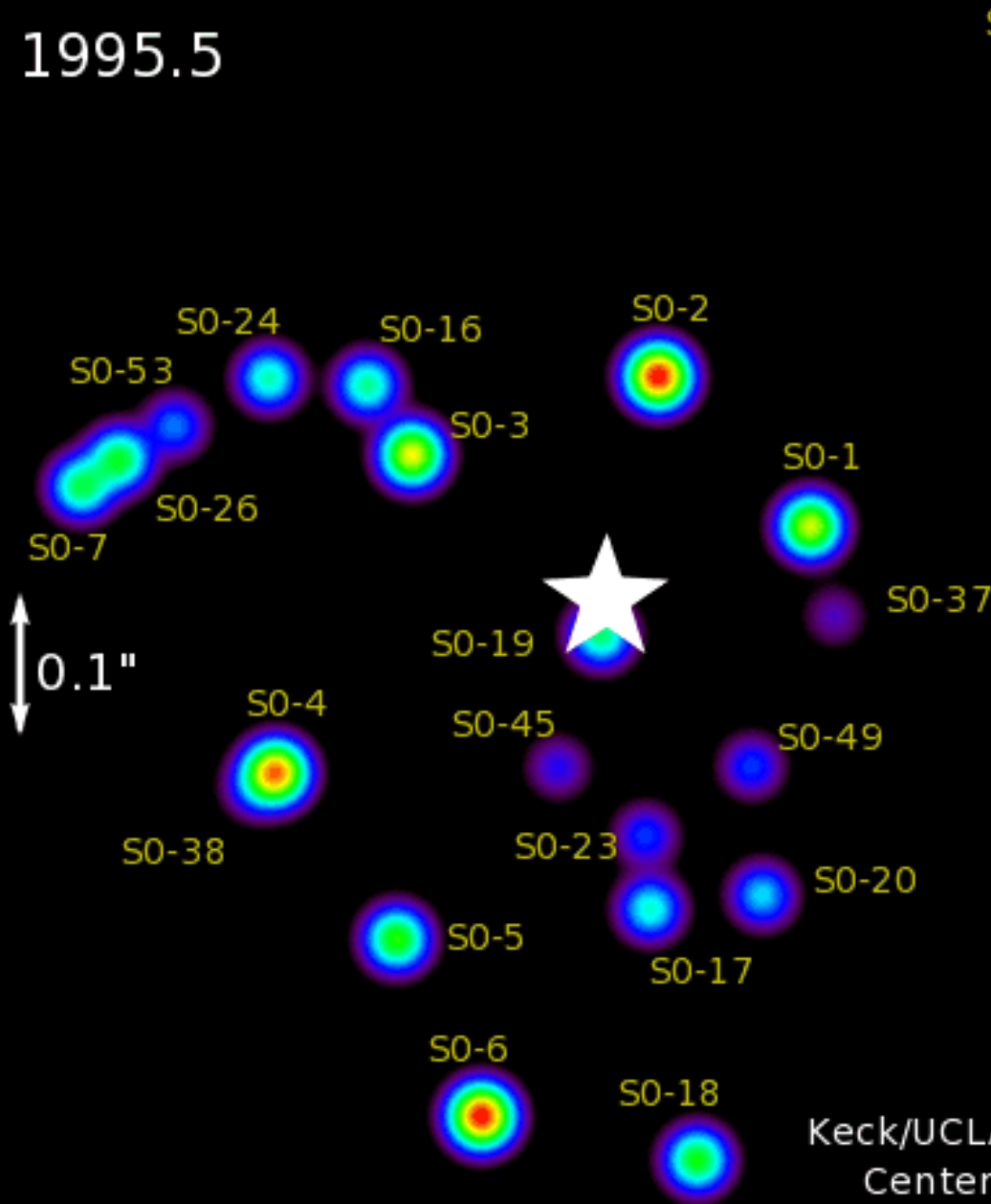
Dada a velocidade do gás, infere-se que para mantê-lo em órbita é necessário que o centro seja bastante massivo $\Rightarrow M > 1$ milhão de $M_{\odot}$!!!

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



S0-8

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

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

Keck/UCLA Galactic
Center Group



NOBELPRISET I FYSIK 2020 THE NOBEL PRIZE IN PHYSICS 2020



KUNGL.
VETENSKAPS-
AKADEMIEN

THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES

Photo: Penrose Institute



Roger Penrose

"för upptäckten att bildandet av svarta hål är en robust förutsägelse av den allmänna relativitetsteorin"

"for the discovery that black hole formation is a robust prediction of the general theory of relativity"

#nobelprize

Photo: Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics



Reinhard Genzel

"för upptäckten av ett supermassivt kompakt objekt i Vintergatans centrum"

"for the discovery of a supermassive compact object at the centre of our galaxy"

Photo: Christopher Doble, UCLA



Andrea Ghez

THE
NOBEL
PRIZE