

Astrofísica Moderna

A Via Láctea e o Meio Interestelar

Prof. Aion Viana e Prof. Vitor de Souza

Referencias principais da aula:

“An introduction to modern astrophysics”, B.W.Carroll and D.A. Ostlie

“Astronomia e astrofísica”, K. de Souza Oliveira Filho e Maria de Fátima Oliveira Saraiva

“Fundamentos de Astronomia”, notas de aula da Prof. Elisabete Gouveia dal Pino IAG/USP

A Via Láctea a olho nú



A Via-Láctea com câmera fotográfica

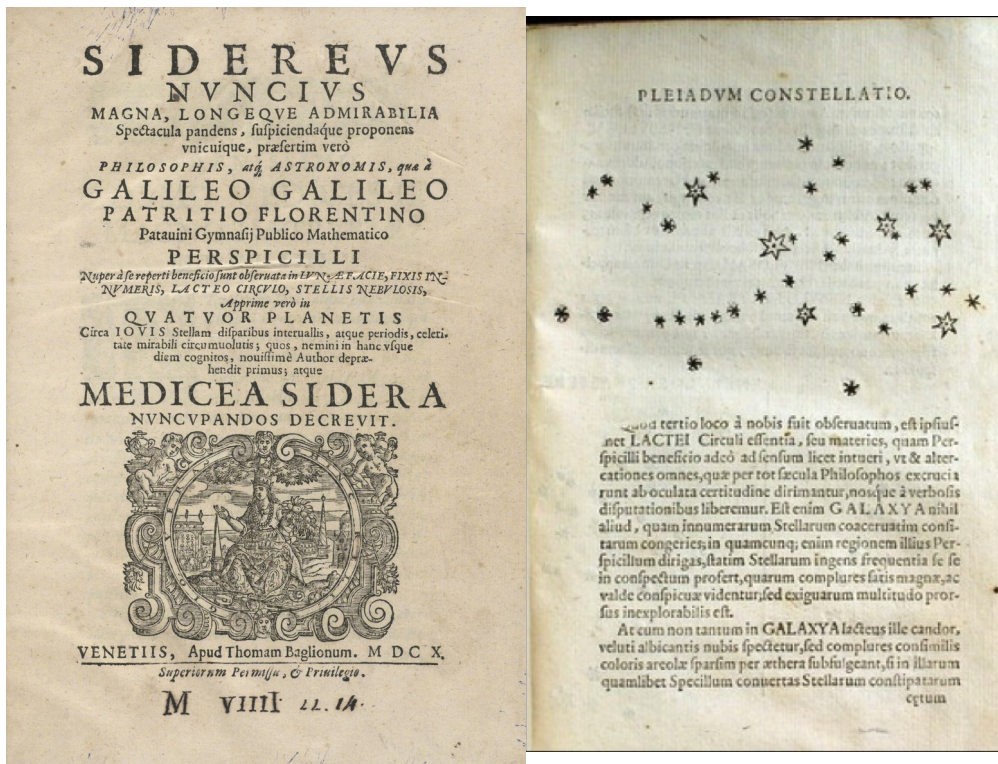


Modelos históricos da Via-Láctea

- Em Meteorologica, **Aristóteles (384-322 aC)** afirma que os filósofos gregos Anaxágoras (c. 500-428 aC) e Demócrito (460-370 aC) propuseram que a **Via Láctea** é o brilho de estrelas não diretamente visíveis devido à sombra da Terra, enquanto outras estrelas recebem sua luz do Sol (mas têm seu brilho obscurecido pelos raios solares)
- O astrônomo persa **Abū Rayhān al-Bīrūnī (973–1048)** propôs que a Via Láctea é *"uma coleção de incontáveis fragmentos da natureza de estrelas nebulosas"*.
- O astrônomo persa **Naṣīr al-Dīn al-Ṭūsī (1201-1274)** em seu Tadhkira escreve: *"A Via Láctea, ou seja, a Galáxia, é composta de um número muito grande de estrelas pequenas, fortemente agrupadas, que, por causa de sua concentração e pequenez, parecem manchas turvas. Por isso, foi comparada à cor do leite. "*

Modelos históricos da Via-Láctea

- **Galileu Galilei (1564 - 1642):** primeiro a notar que a faixa embranquiçada vista a olho nú no céu era composta de estrelas

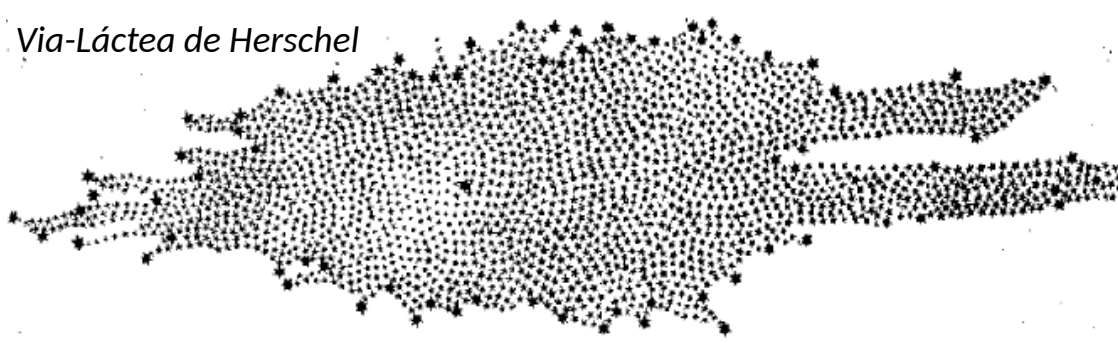


“O próximo objeto que observei é a essência ou substância da Via Láctea. Com a ajuda de um telescópio, qualquer um pode ver isso de uma maneira que atrai tão claramente os sentidos que todas as disputas que atormentaram os filósofos através de tantas eras são eliminadas ao mesmo tempo pela evidência irrefragável de nossos olhos, e somos libertados de longas disputas verbais sobre esse assunto, **pois a galáxia nada mais é do que uma massa de inumeráveis estrelas aglomeradas em grupos.** Em cima de qualquer parte dela que você dirige o telescópio diretamente, uma multidão vasta de estrelas se apresenta em vista; muitos delas são razoavelmente grandes e extremamente brilhantes, enquanto o número de pequenas é muito além da determinação.”

Mensageiro Sideral (Sidereus Nuncius) - Galileu Galilei 1610

Modelos históricos da Via-Láctea

- **William Herschel (1738 - 1822)** : produziu o primeiro mapa da Via-Láctea contando o número de estrelas no céu. Suas hipóteses:
- todas as estrelas tem aproximadamente a mesma magnitude
 - a densidade numérica das estrelas é constante no volume
 - não existe nada entre as estrelas e nós que pode obscurecer os seus brilhos
 - ele era capaz de observar o limite da distribuição de estrelas



- **Conclusão:** a Galáxia é um sistema achatado, sendo aproximadamente 5 vezes maior na direção do plano galáctico do que na direção perpendicular a ele, e o Sol se encontra aproximadamente no centro.

Modelos históricos da Via-Láctea

- **Jacobus C. Kapteyn (1851 - 1922)**: contagem das estrelas registradas em placas fotográficas e determinou as distâncias das estrelas próximas medindo suas paralaxes e movimentos próprios.
 - Via Láctea tinha a forma de um **disco com 20 kpc de diâmetro com o Sol no centro**
- **Harlow Shapley (1885 - 1972)**: estimou distâncias de 93 aglomerados globulares (AG) baseado em estrelas RR Lyrae (variáveis)
 - AGs estão preferencialmente localizados na direção da constelação de Sagittarius a uma distância de 15 kpc => **centro da Via-Láctea (não heliocêntrico!)**
 - Via-Láctea tem 100 kpc de diâmetro (distância dos mais distantes AGs)

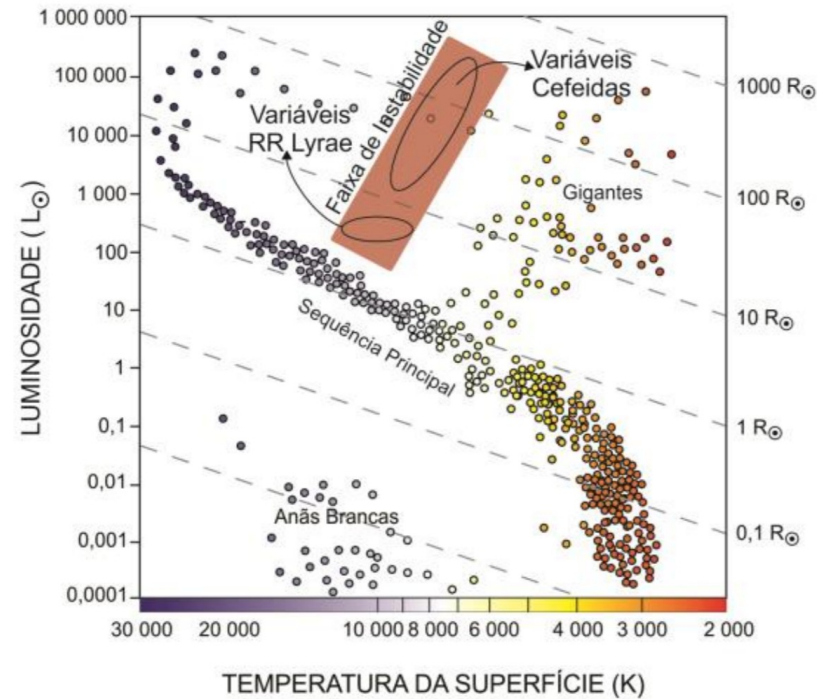
Kapteyn subestimou o tamanho da VL, enquanto Shapley a superestimou
=> **ambos não consideraram extinção interestelar**

Distâncias dentro da Galáxia

Estrelas variáveis pulsantes:

➤ RR Lyrae

- estrelas evoluídas com massas entre 0,5 e 0,7 MSol,
- muito comuns em aglomerados globulares.
- **magnitude absoluta conhecida em torno de $M_V = 0,6 \pm 0,3$.**



Distâncias dentro da Galáxia

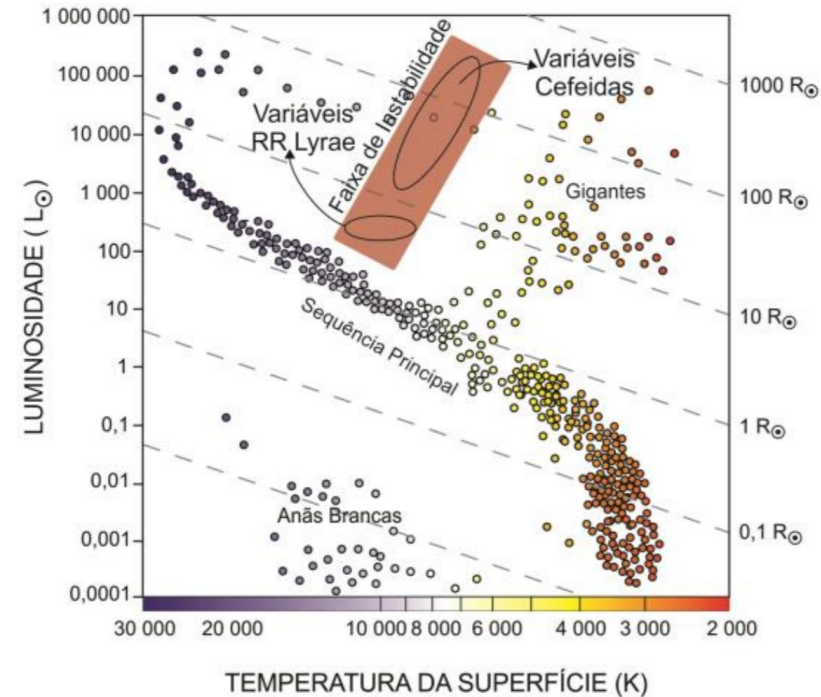
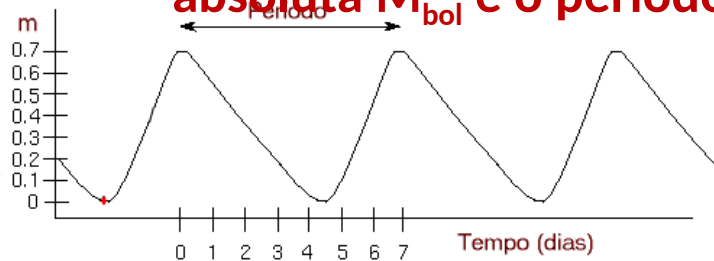
Estrelas variáveis pulsantes:

➤ RR Lyrae

- estrelas evoluídas com massas entre 0,5 e 0,7 M_{Sol} ,
- muito comuns em aglomerados globulares.
- **magnitude absoluta conhecida em torno de $M_V = 0,6 \pm 0,3$.**

➤ Cefeidas

- supergigantes com massas entre 3 e 18 M_{Sol}
- **relação entre a magnitude bolométrica absoluta M_{bol} e o período P conhecida**

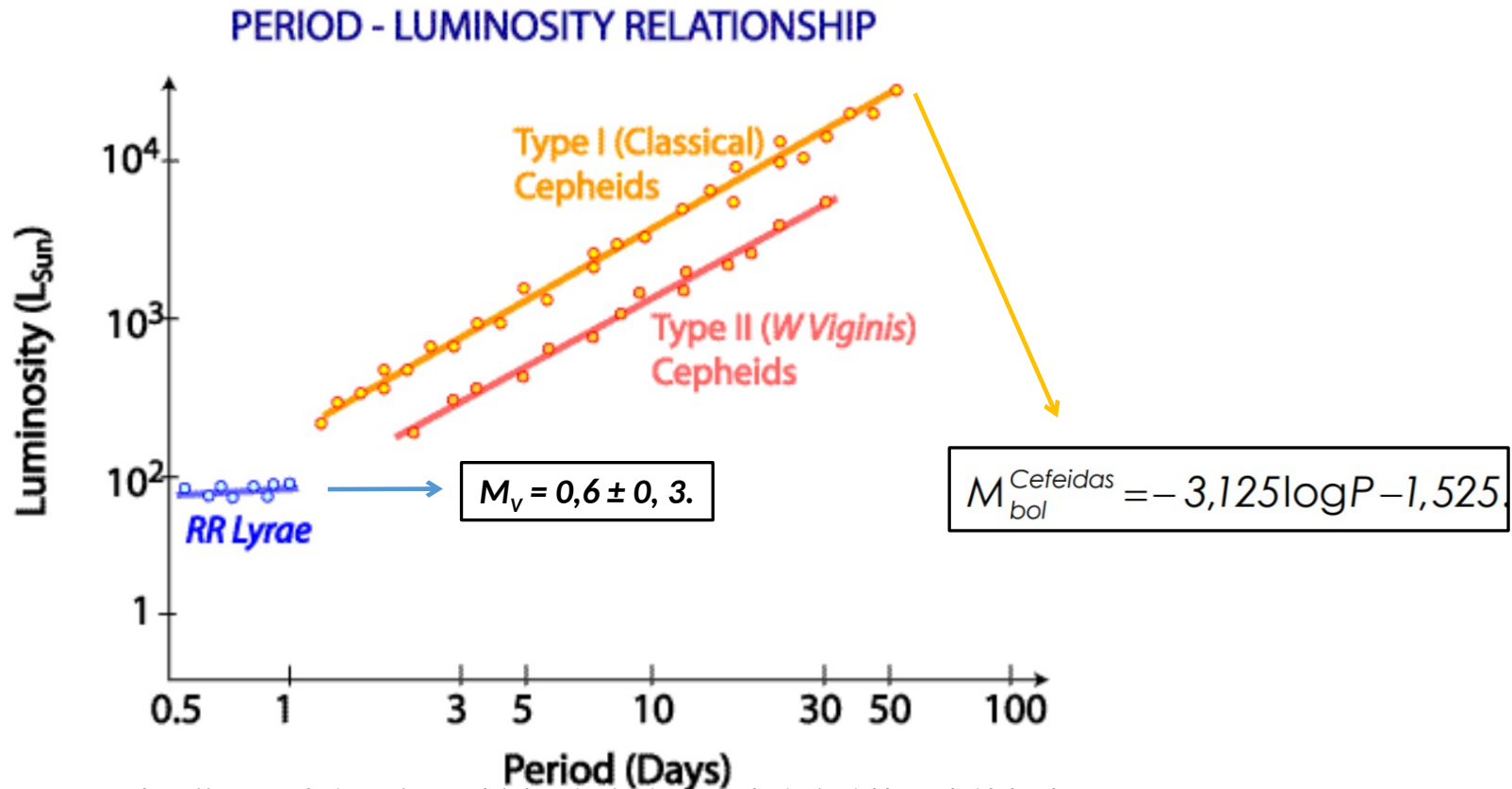


Estrelas RR Lyrae no aglomerado Globular M3



Distâncias dentro da Galáxia

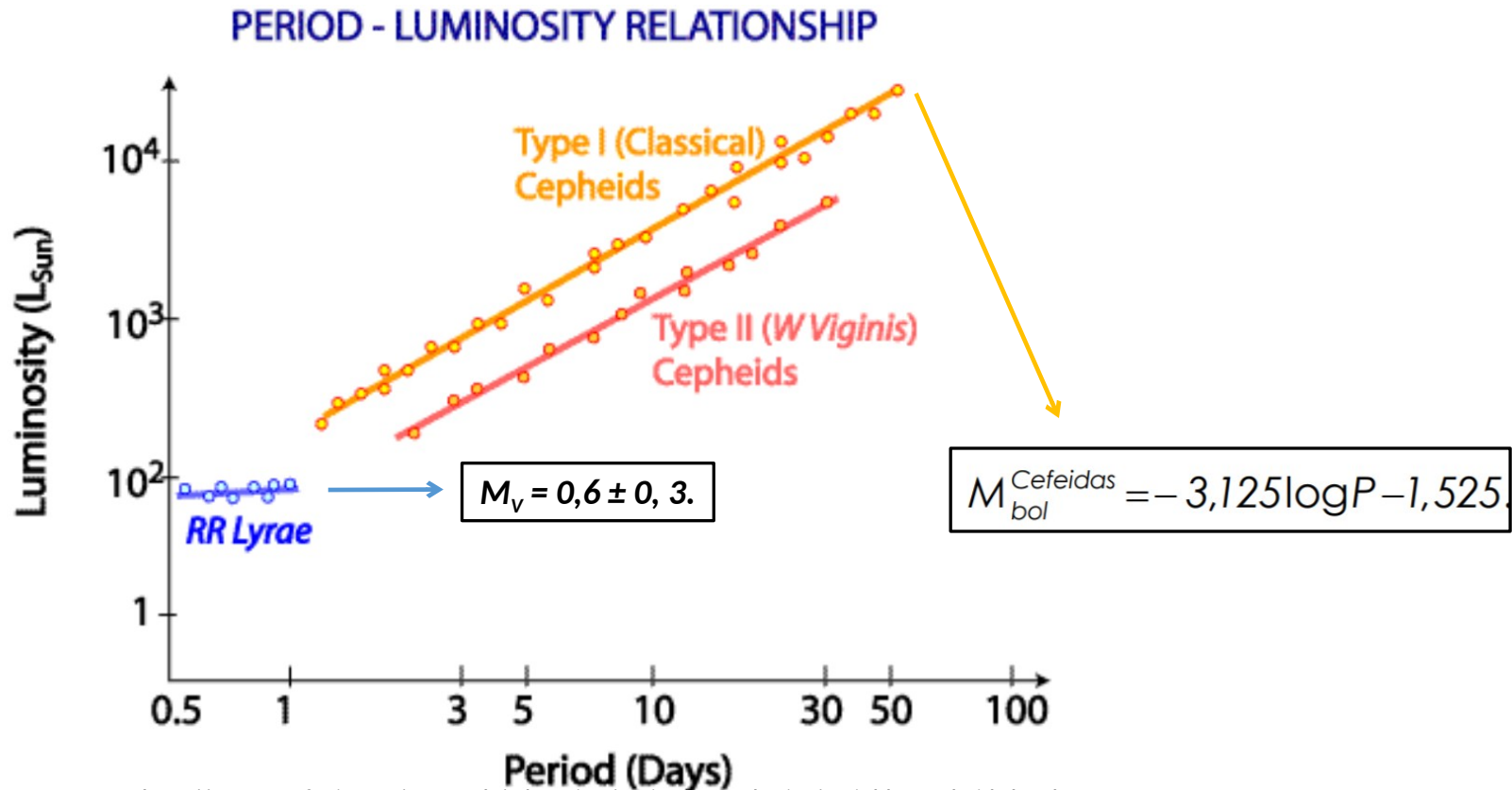
Em ambos tipos de estrelas podemos calcular sua magnitude (ou luminosidade)



http://www.atnf.csiro.au/outreach/education/senior/astrophysics/variable_cepheids.html

Distâncias dentro da Galáxia

Em ambos tipos de estrelas podemos calcular sua magnitude (ou luminosidade)



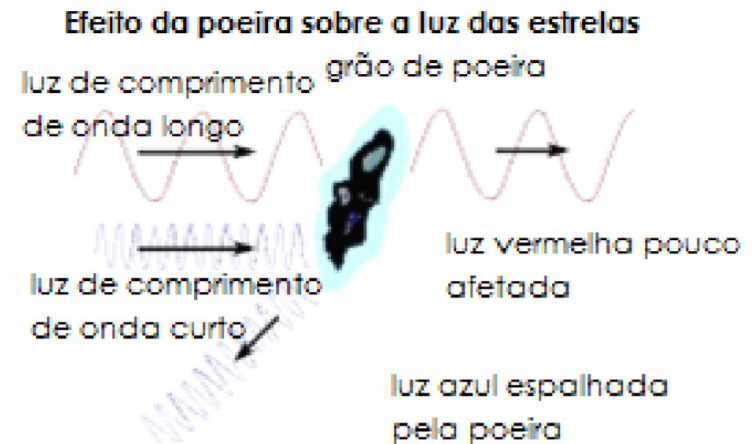
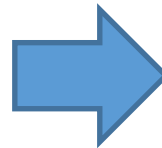
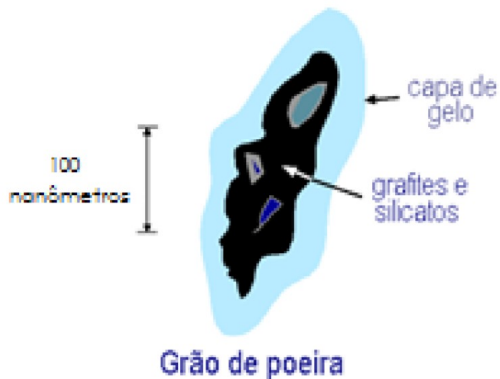
Conhecendo a magnitude absoluta podemos calcular a distância



$$m - M = 5 \log \left(\frac{d}{10} \text{pc} \right)$$

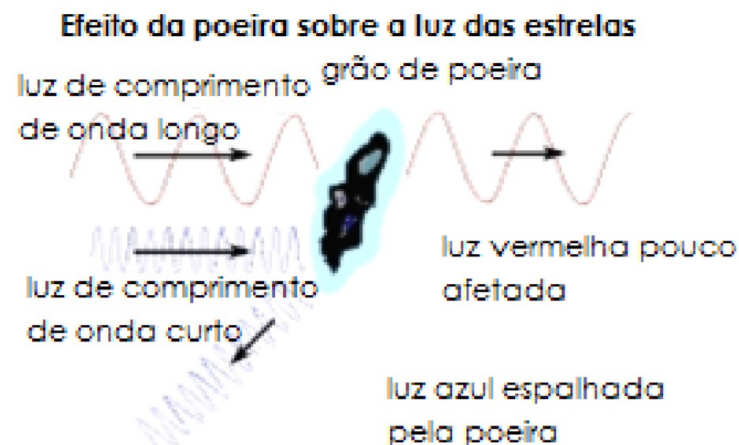
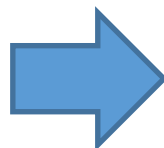
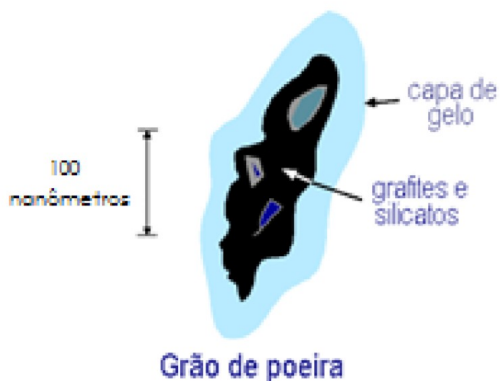
Extinção interestelar

- O meio interestelar contém poeira, que absorve e avermelha a luz das estrelas
- Somente no séc. XX começamos a entender sua natureza e estrutura:



Extinção interestelar

- O meio interestelar contém poeira, que absorve e avermelha a luz das estrelas
- Somente no séc. XX começamos a entender sua natureza e estrutura:



Essa diminuição do brilho aparente é chamado de **extinção**, e afeta a fórmula de magnitude vs distância:

$$m - M = 5 \log \left(\frac{d}{10} \text{ pc} \right) + A_\lambda \quad \Rightarrow \quad d = 10^{(m - M - A_\lambda + 5)/5} = d' 10^{-A_\lambda/5}$$

onde d' é a distância ignorando extinção e A_λ é a extinção em magnitudes, tipicamente igual a 1 magnitude/kpc na Via-Láctea (mas pode variar muito dependendo se na linha de visão há nebulosas e nuvens de gás)

Extinção interestelar

Exemplo: supondo uma estrela com $m = +8.2$ e $M = -4.0$

- Tomando $A_\lambda = 0 \rightarrow d' = 10^{(m - M + 5)/5} = 2800 \text{ pc}$

- Tomando $A_\lambda = kd$, com $k = 10^{-3} \text{ mag/pc}$ e d em pc:

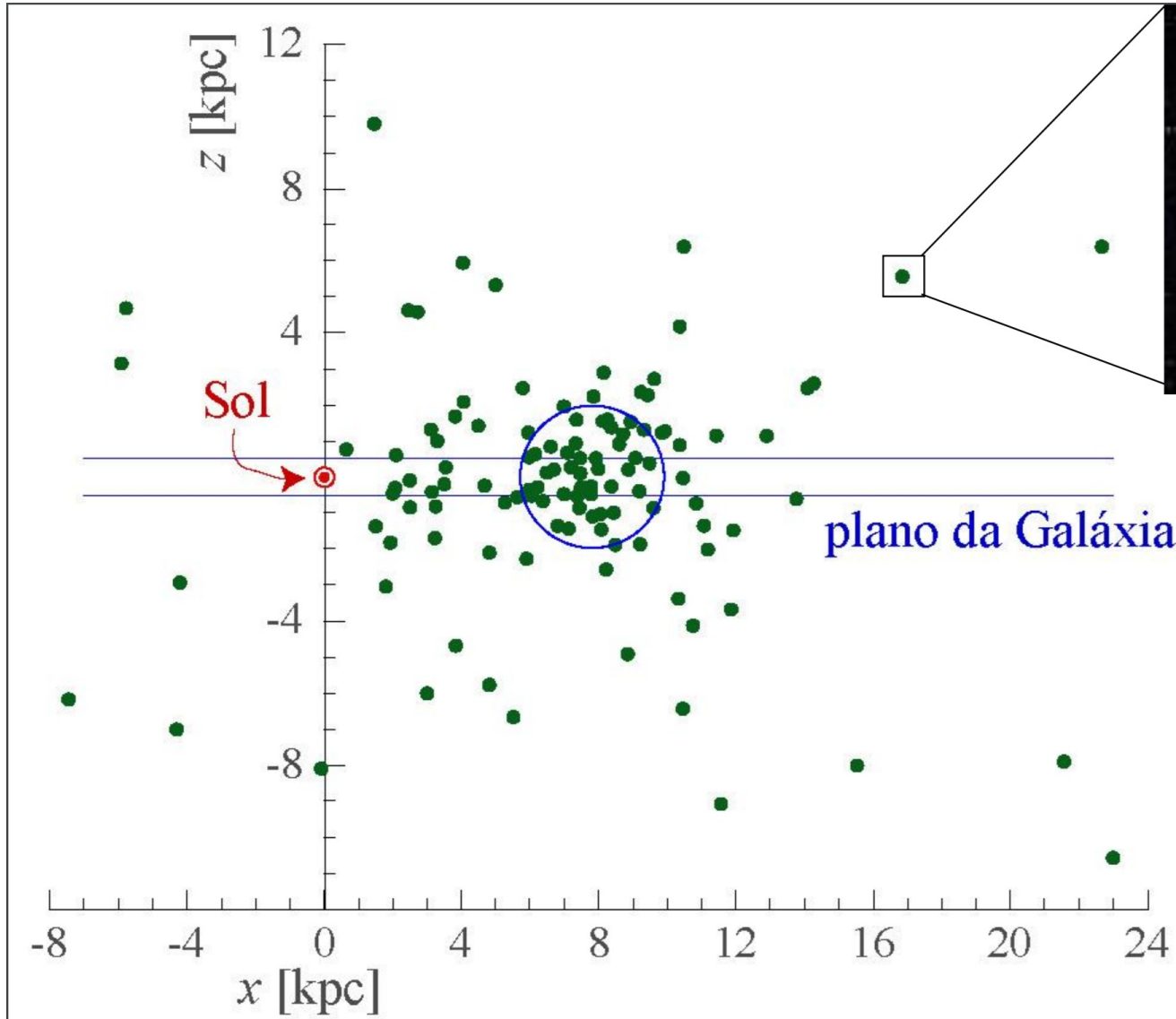
$$d = 10^{(m - M - kd + 5)/5} = 2800 \times 10^{-kd/5} \text{ pc}$$

Iteração ou gráfico

$$d = 1400 \text{ pc}$$

Ignorando efeito da poeira, superestimamos as distâncias

Distribuição de aglomerados globulares



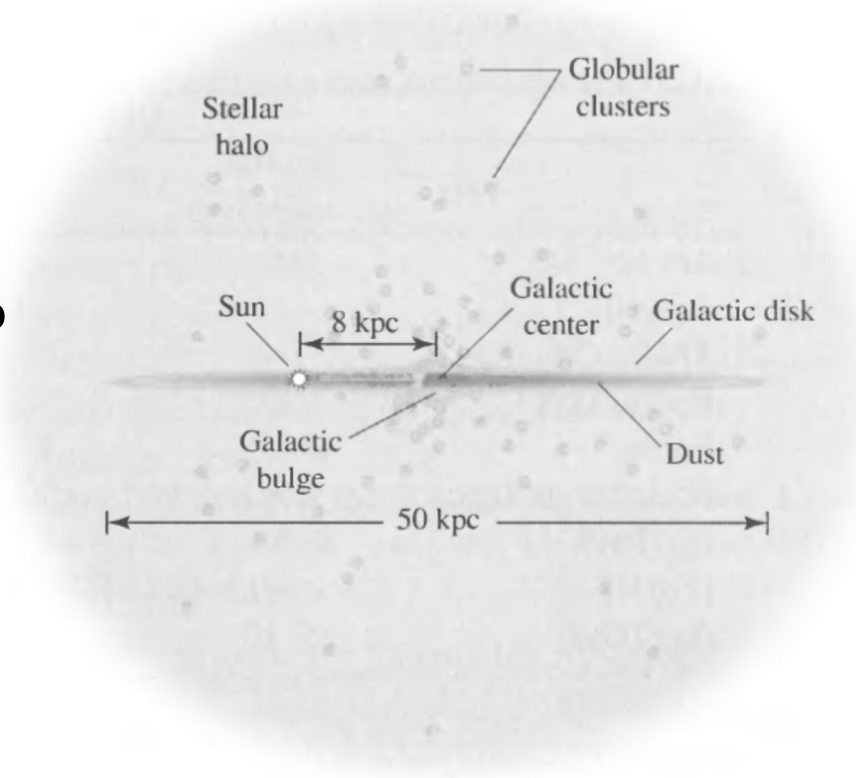
Distância do centro galáctico corrigido por extinção interestelar:

$$d = 8.0-8.5 \text{ kpc}$$

Morfologia da Via-Láctea

A Via Láctea é uma galáxia espiral, composta de mais de 100 bilhões de estrelas, além de gás e poeira organizados em quatro componentes principais:

- O **disco**, que contém a maioria das estrelas, incluindo o Sol, e virtualmente todo o gás e poeira. Espessura estimada de 300 pc (fino: 1/100 do diâmetro) e diâmetro de 50 kpc.
- O **bojo** é uma região esférica de de extensão ~6kpc no plano do disco e ~4kpc na direção perpendicular.
- Um **halo estelar** formado pelos aglomerados globulares. Raio estimado >100 kpc
- um **halo de matéria escura**, de forma esférica, que é maior do halo estelar. Raio estimado > 230 kpc



Disco fino e disco grosso

- **Disco fino:** estrelas relativamente jovens, poeira e gas, com uma espessura estimada de $z_{\text{thin}} \sim 300$ pc e com formação estelar recente
- **Disco grosso:** estrelas mais velhas, com uma espessura estimada de $z_{\text{thick}} \sim 1000$ pc, e uma densidade de estrelas de somente 8.5% do disco fino:

$$n(z, R) = n_0 \left(e^{-z/z_{\text{thin}}} + 0.085 e^{-z/z_{\text{thick}}} \right) e^{-R/h_R}$$

onde

R é a distancia em relação do Centro Galáctico

$n_0 \sim 0.02$ estrelas pc⁻³ para magnitudes absolutas entre $4.5 \leq M_V \leq 9.5$

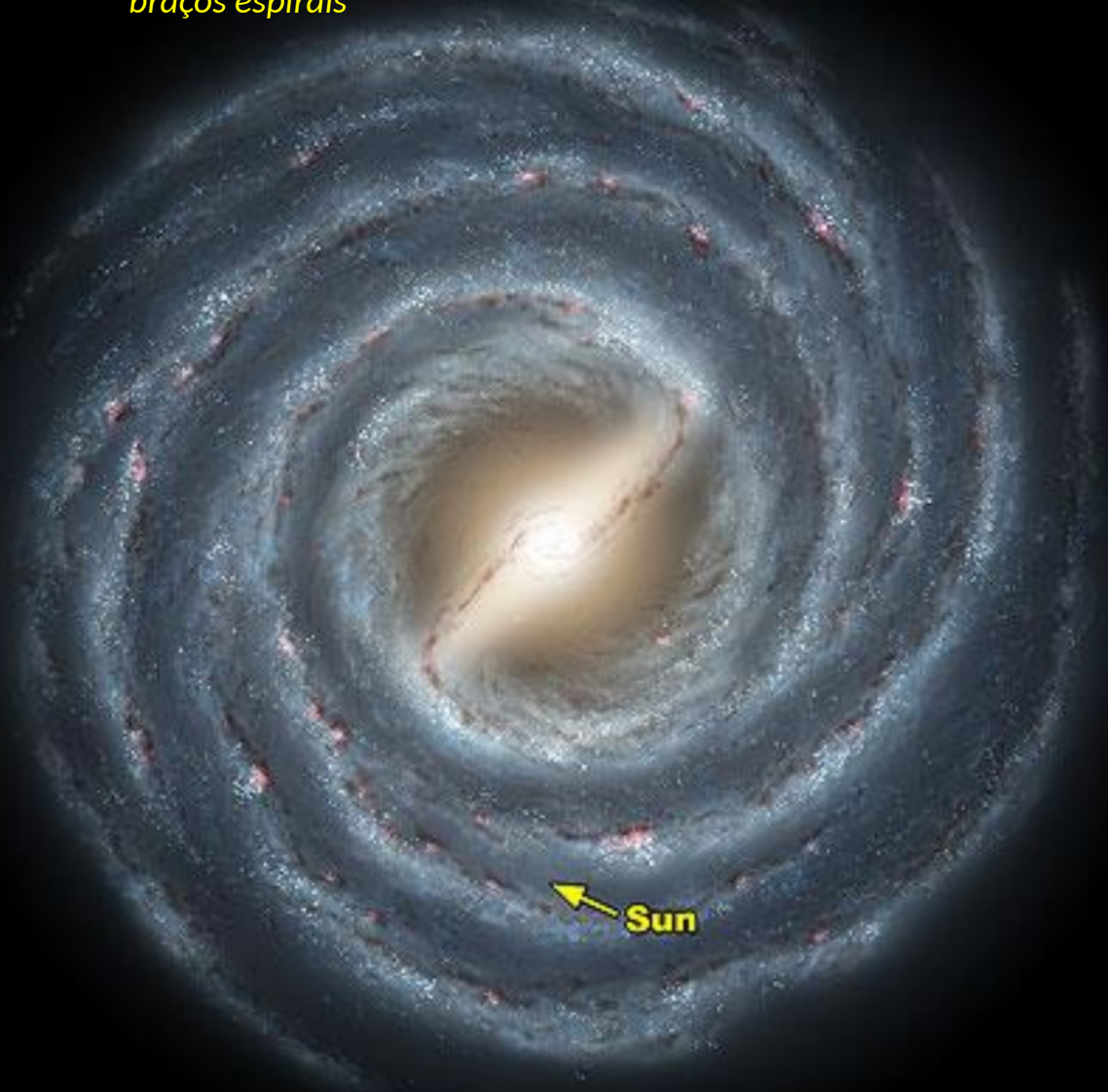
h_R é o extensão do raio (~ 25 kpc)

Estrutura Espiral

Mapeadores da estrutura espiral:

- estrelas O e B, regiões HII, excitadas por estas estrelas quentes, e estrelas cefeidas variáveis.
- linha de 21 cm do hidrogênio neutro

Concepção artística da Via Láctea, mostrando a estrutura em braços espirais



Estrutura Espiral

Mapeadores da estrutura espiral:

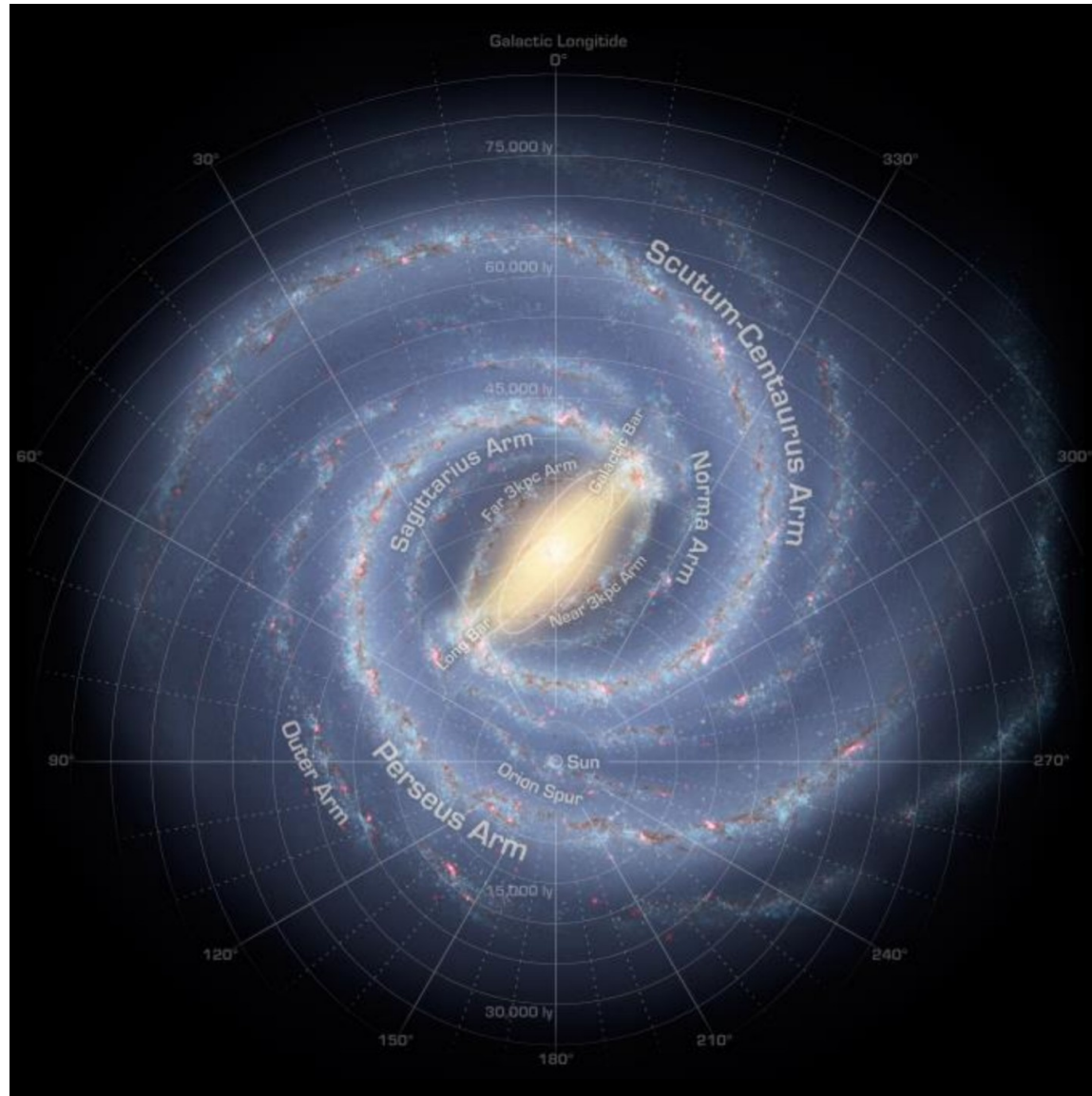
- estrelas O e B, regiões HII, excitadas por estas estrelas quentes, e estrelas cefeidas variáveis.
- linha de 21 cm do hidrogênio neutro



Estrutura Espiral

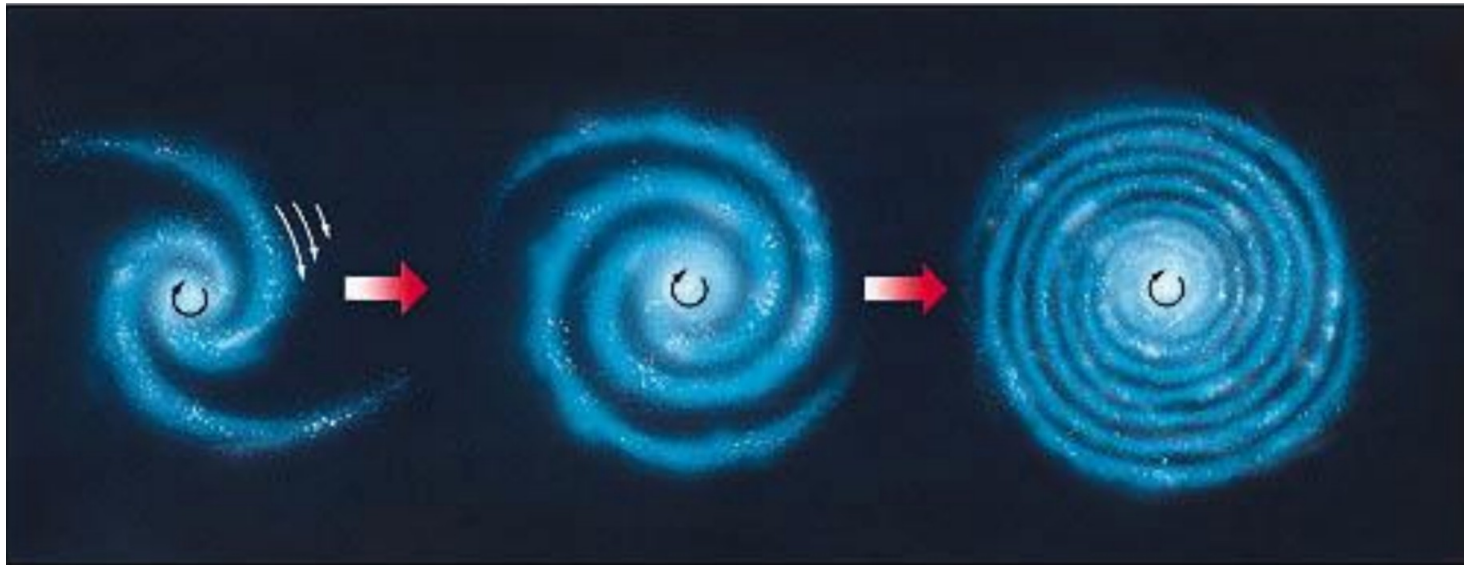
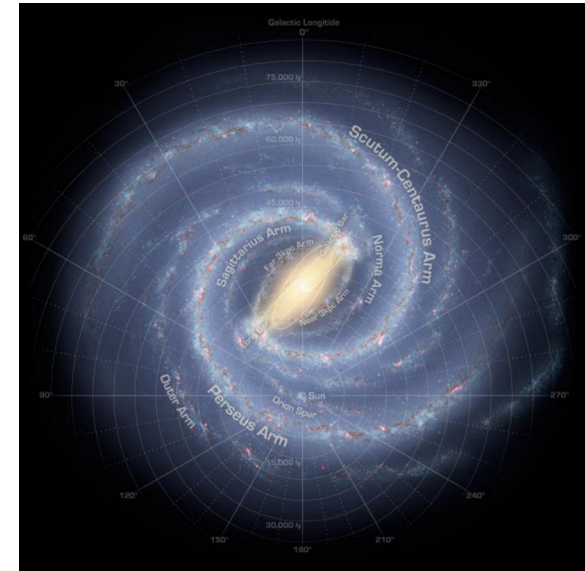
➤ Observações recentes, no infravermelho: dois braços principais – o braço de Scutum-Centaurus e o braço de Perseus – e outros braços menores

➤ O Sol está na borda interna de um braço pequeno chamado "braço de Órion"



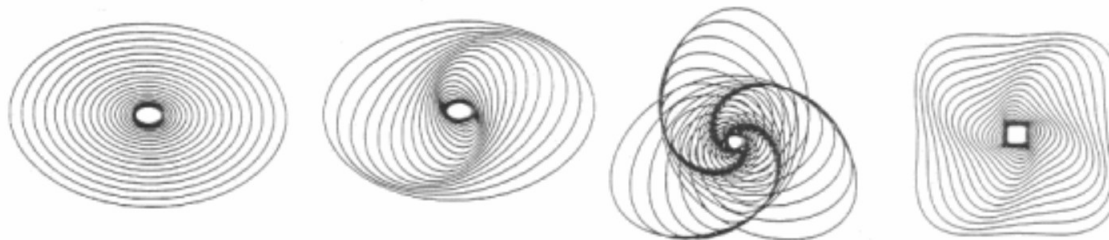
Persistência da estrutura Espiral

Como se explica a manutenção da estrutura espiral? A rotação diferencial: qualquer padrão espiral ligado ao material do disco não poderia sobreviver por muito tempo - os braços se enrolariam completamente em alguns períodos de rotação da galáxia $\sim 100 \times 10^6$ anos



Persistência da estrutura espiral

- Os braços espirais não podem ser regiões materiais girando juntamente com o restante do disco galáctico.
- O cenário mais aceito para explicar a persistência dos braços espirais: supõe a **existência de ondas de densidade = ondas de compressão de gás que se movem pelo disco galáctico, comprimindo nuvens interestelares provocando formação estelar à medida que passam**
- Os braços: formados por núvens de gás densas e estrelas recém formadas - seriam criados pela passagem de ondas de densidade
- **Os braços espirais correspondem apenas à passagem das ondas pelas estrelas e não transportam grandes quantidades de massa.**



Estrutura Espiral: questões em aberto

- Qual é a origem das ondas de densidade?
- Explosões de SN poderiam produzir ondas de densidade e comprimir o MIS: só formariam pedacos dos braços, não toda a estrutura.
- O que teria criado a primeira faixa de formação de estrelas, a qual teria dado continuidade ao avanço dos braços espirais?

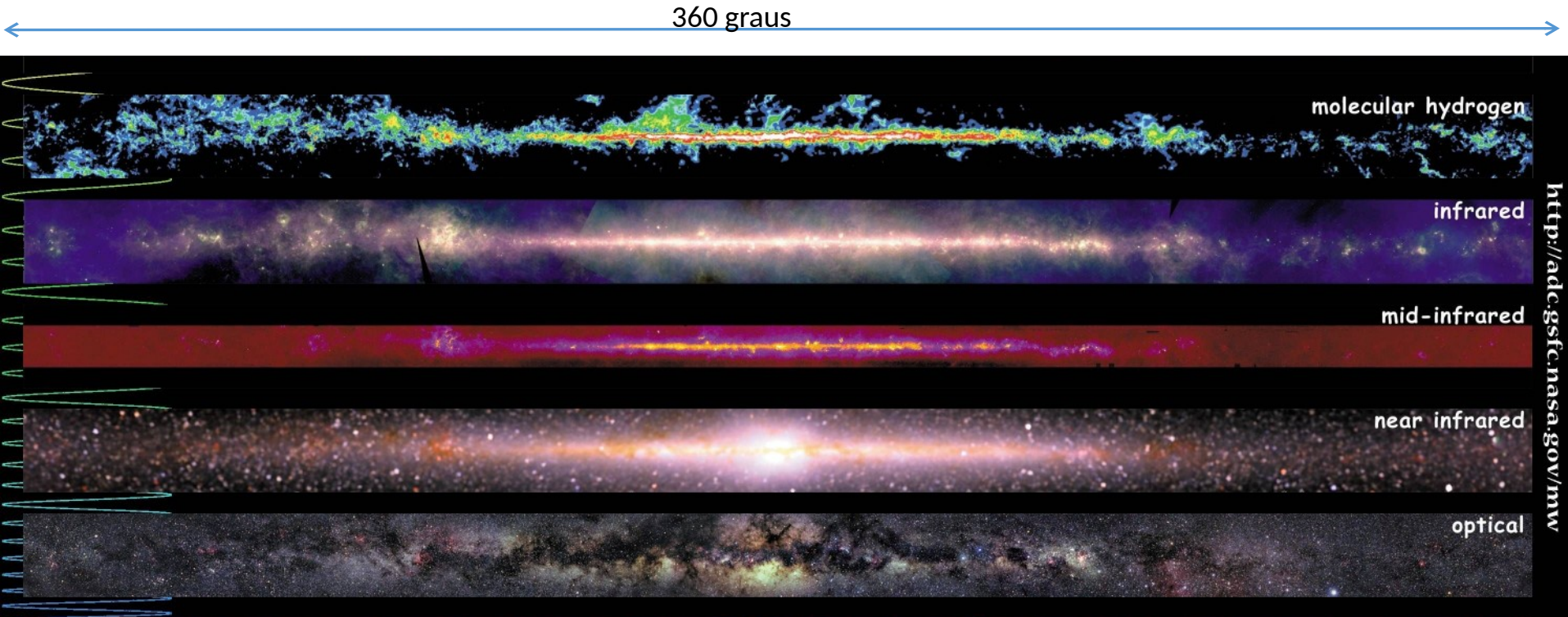
Estrutura Espiral: possíveis respostas

1. Instabilidades do gás próximo ao bojo: perturbações começariam no bojo e propagariam radialmente pelo disco (mecanismo de origem?)
2. Efeito gravitacional (forças de maré) de outras galáxias (semelhante ao que vimos entre Terra e Lua)
3. Assimetria do tipo “barra” no bojo (observada em outras galáxias): teria influência no disco, iniciando a formação dos braços espirais.

Observações do bojo galáctico

- Na faixa espectral do visível: as observações do **bojo** são muito afetadas pela **absorção interestelar**.
- Comprimentos de onda mais longos que os ópticos (**infravermelho e rádio**) são necessários para revelar a estrutura do bojo.
- **Emissão rádio do gás** \Rightarrow mapeamentos até **50kpc**.

A Galáxia em outros comprimentos de onda



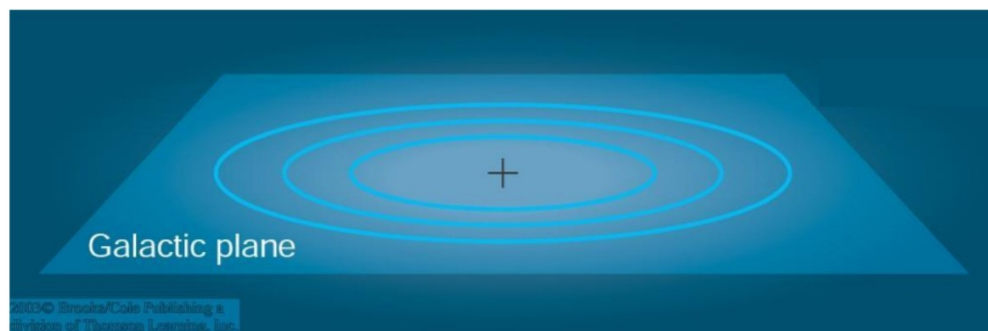
- Infravermelho próximo: estrelas frias
- Visível: estrelas próximas
- Infravermelho médio e distante: poeira e moléculas

Populações estelares

- Início dos anos 1940: Walter Baade (estrelas se dividem em duas populações):

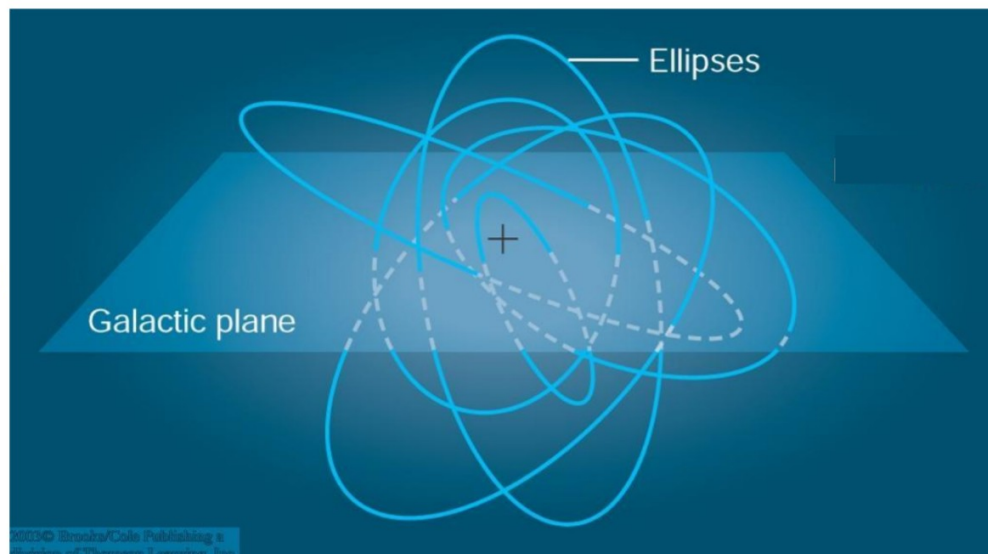
- **População I:**

- estrelas ricas em metais
- + azuis
- no disco da Galáxia
- movimento circular



- **População II:**

- estrelas pobres em metais
- + vermelhas
- no bojo e no halo da Galáxia
- movimento elíptico, fora do disco.



Populações estelares

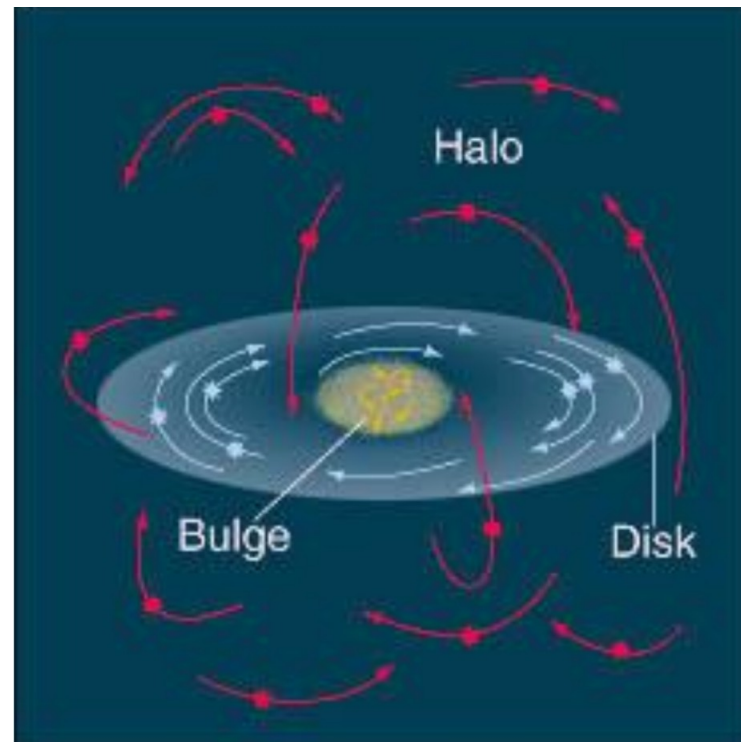
Sumário das propriedades das populações estelares

Propriedade	População I	População II
Localização	disco e braços espirais	bojo e halo
Movimento	confinado ao plano	se afastando do plano
	órbitas quase circulares	órbitas excêntricas
Idade	$< 7 \times 10^9$ anos	$> 7 \times 10^9$ anos
Abundância de elementos pesados	1 - 2 %	0,1 - 0,01%
Cor	azul	vermelha
Exemplos	estrelas O,B	estrelas RR Lyrae
	aglomerados abertos	aglomerados globulares
	regiões HII	nebulosas planetárias

- Abundância está de acordo com o cenário evolutivo de enriquecimento do MIS da Galáxia => através de sucessivas gerações de estrelas.

Movimento orbital da galáctica

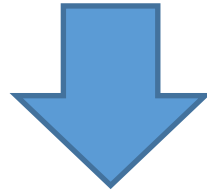
- O movimento das estrelas e nuvens ao redor do **CG** sustenta o sistema contra o colapso gravitacional (semelhante ao movimento dos planetas ao redor do Sol).
- O movimento coletivo das componentes do **disco galáctico** orbitando o **CG** é chamado **rotação galáctica**
- Estrelas do disco galáctico giram ordenadamente ao redor do **CG**, enquanto que as estrelas do halo têm órbitas com orientações e excentricidades aleatórias.



Velocidade de rotação do Sol

Um exemplo de determinação da velocidade do Sol com relação ao CG:

adota-se o referencial dos aglomerados globulares e de estrelas do bojo => movimentos aleatórios



na média => repouso em relação ao movimento de rotação do disco (não participam da rotação)

Valor estimado: $v_{\text{rot}}(\text{sol}) \sim 220 \text{ km/s}$

Período orbital do Sol

- Conhecida a velocidade e a distância ao **CG** \Rightarrow estima-se o **período (lei de Kepler)**:

Adotando-se: $R \sim 8$ kpc; $v \sim 220$ km/s

$$P = 2 \pi R / v$$

O período orbital do Sol na Galáxia:

$$P \sim 225 \text{ milhões de anos}$$

(1 pc = $3,086 \times 10^{16}$ m)

Massa da Galáxia

- Igualdade entre **Força centrípeta** e **Força gravitacional**

$$F_G = F_c \rightarrow \frac{GM_G m}{R^2} = \frac{mv^2}{R} \rightarrow M_G = \frac{R v^2}{G}$$

- Utilizando os valores conhecidos de **V_{sol} (200 km/s)** e **R_{sol} (8 kpc)** podemos calcular a massa no **massa da Galáxia interna à órbita do Sol**

$$M_G^{\odot} = \frac{V_{\odot}^2 R_{\odot}}{G} = \frac{(2,20 \times 10^5 \text{ m/s})^2 (2,4 \times 10^{20} \text{ m})}{6,7 \times 10^{-11} \text{ m}^3/(\text{kg} \cdot \text{s}^2)}$$
$$M_G^{\odot} = 1,7 \times 10^{41} \text{ kg} \simeq 9 \times 10^{10} M_{\odot}$$



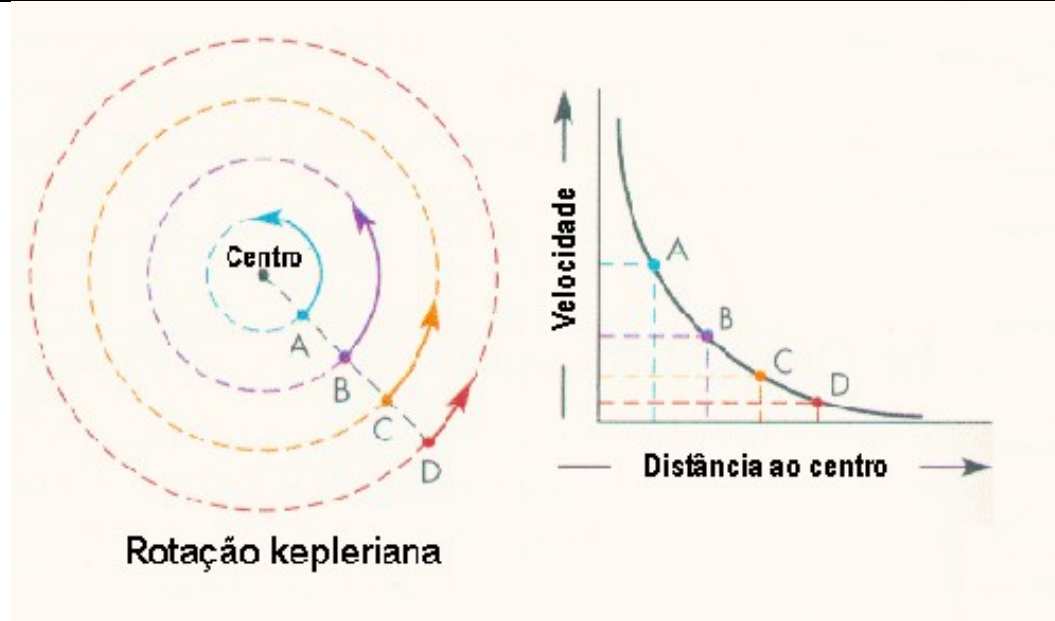
Limite inferior

Curva de rotação galáctica

- O movimento das estrelas no **halo e bojo**: não é tão ordenado \Rightarrow **caminhos aleatórios**, mas sempre **ao redor do CG**.
- **Informações sobre a rotação do disco da Galáxia:**
 - \Rightarrow **obtidas através da linha de 21cm do Hidrogênio.**
 - \Rightarrow Deslocamento Doppler das linhas do gas: determina velocidades radiais (ao longo da linha de visada): $v = c \Delta\lambda/\lambda_0$

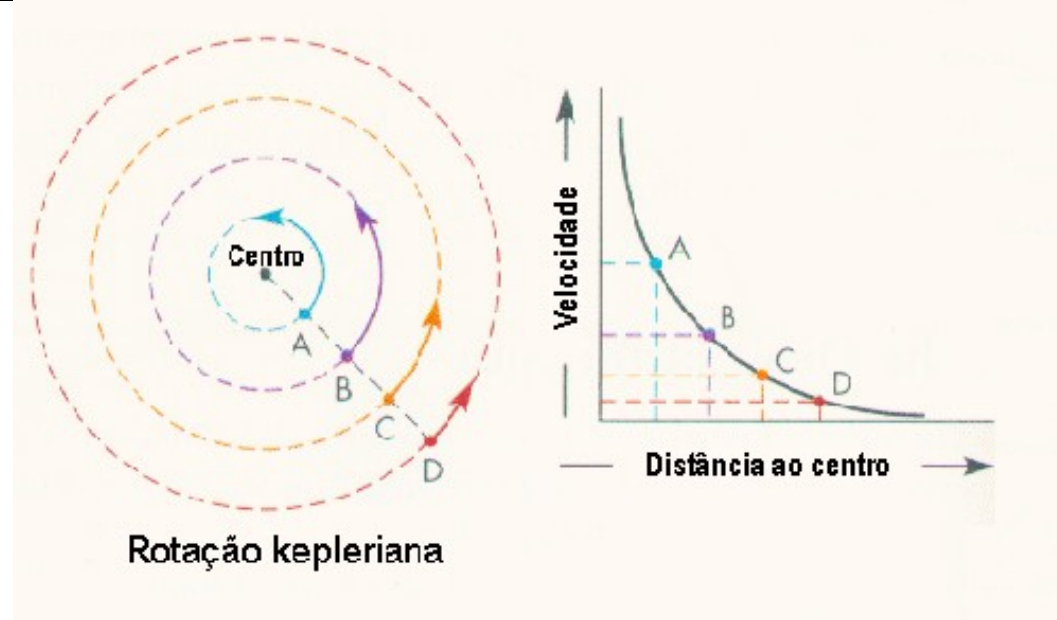
Curva de rotação galáctica

- Rotação kepleriana: velocidade do Sol (em D) é menor do que a velocidade da estrela C, que é menor do que a velocidade da estrela B, que é menor do que a velocidade da estrela A



Curva de rotação galáctica

- **Rotação kepleriana:** velocidade do Sol (em D) é menor do que a velocidade da estrela C, que é menor do que a velocidade da estrela B, que é menor do que a velocidade da estrela A
- Para uma longitude l , quando **velocidade radial for máxima a distância galactocêntrica é mínima**



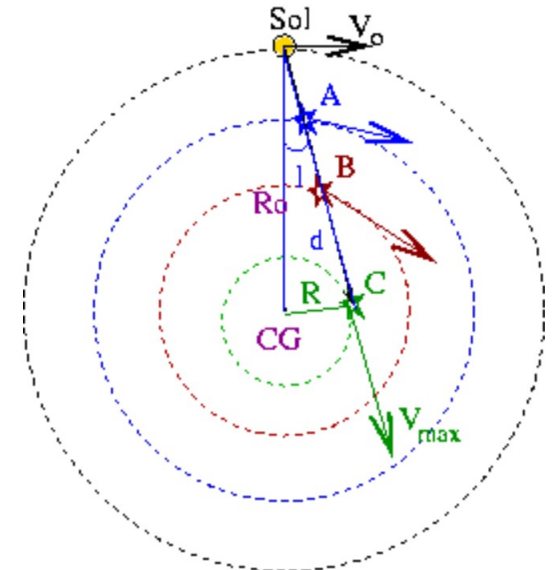
Distância da estrela ao centro, é dada por:

$$R = R_0 \sin(l)$$

onde R_0 é a distância do Sol ao centro galáctico.

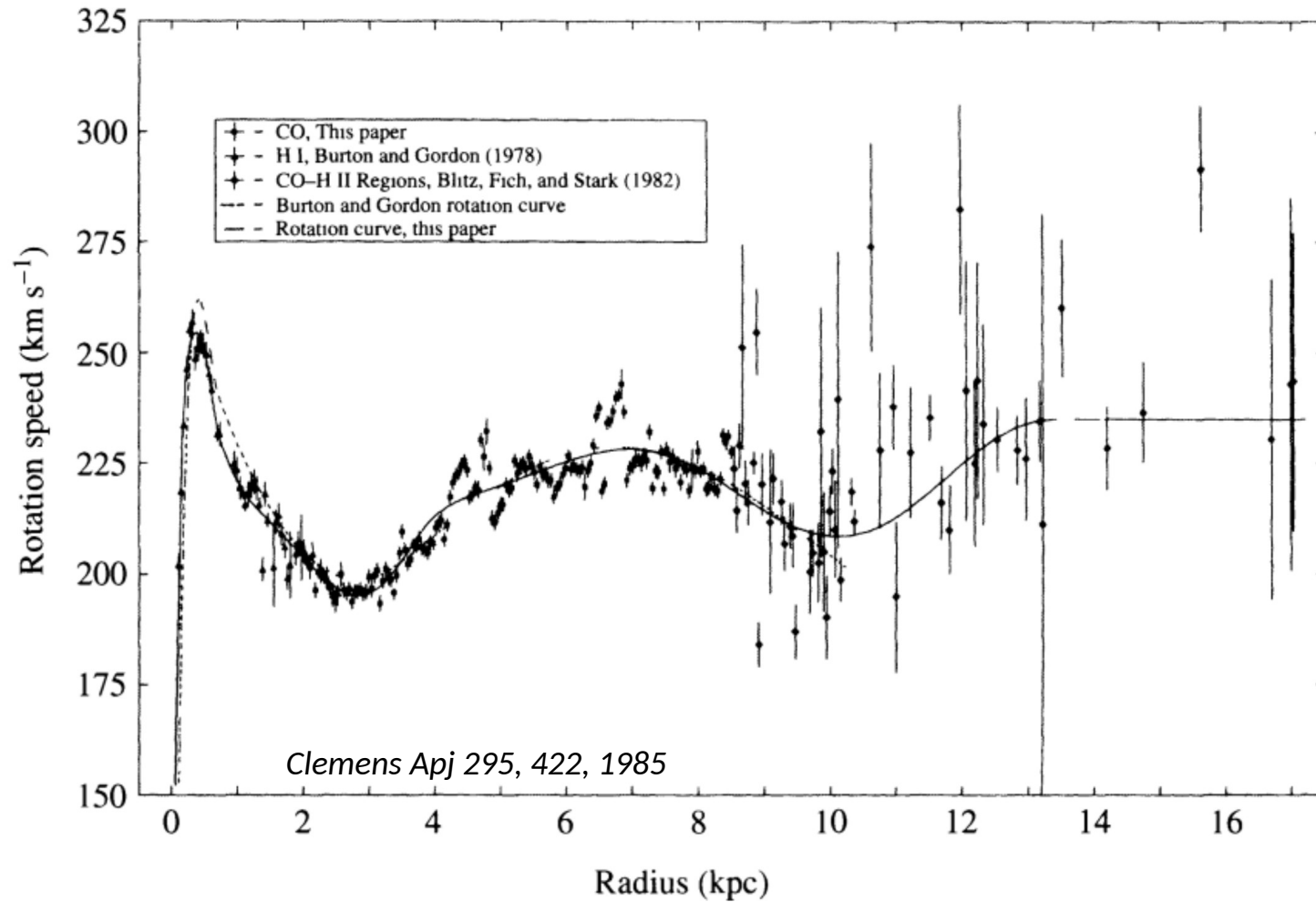
A velocidade da estrela nesse ponto, relativa ao Sol, será

$$V = V_{\max} - V_0 \sin(l)$$



Conhecendo V_0 (200 km/s) e R_0 (8 kpc) podemos construir a curva $V \times R$

Curva de rotação galáctica

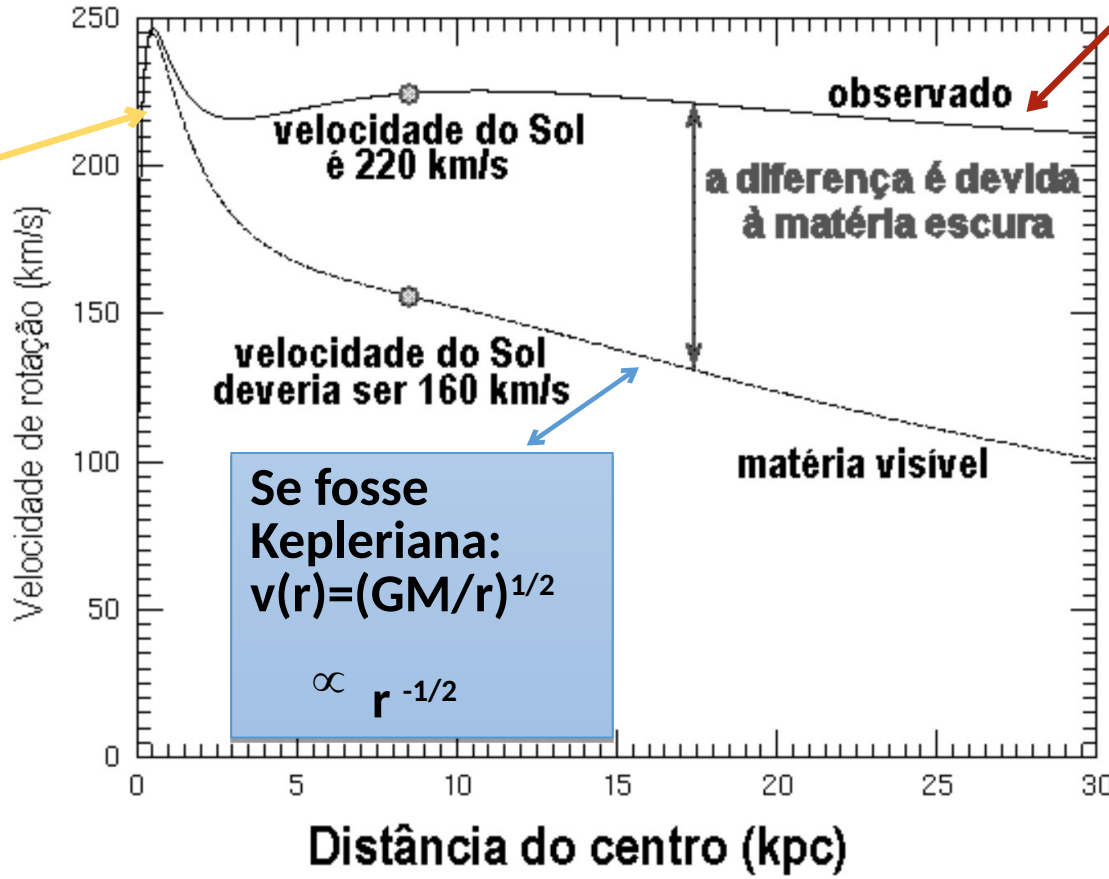


Curva de rotação galáctica

Região ~ 2x distância Sol-CG (extensão da matéria luminosa) => massa $\sim 2 \times 10^{11} M_{\text{Sol}}$.

Esfera de densidade constante (bojo):

$$v \propto r$$



Porém para raios > 2X órbita solar - observa-se:

$$v(r) = (GM/r)^{1/2} \sim \text{cte}$$

➤ $GM/r \sim \text{cte}$

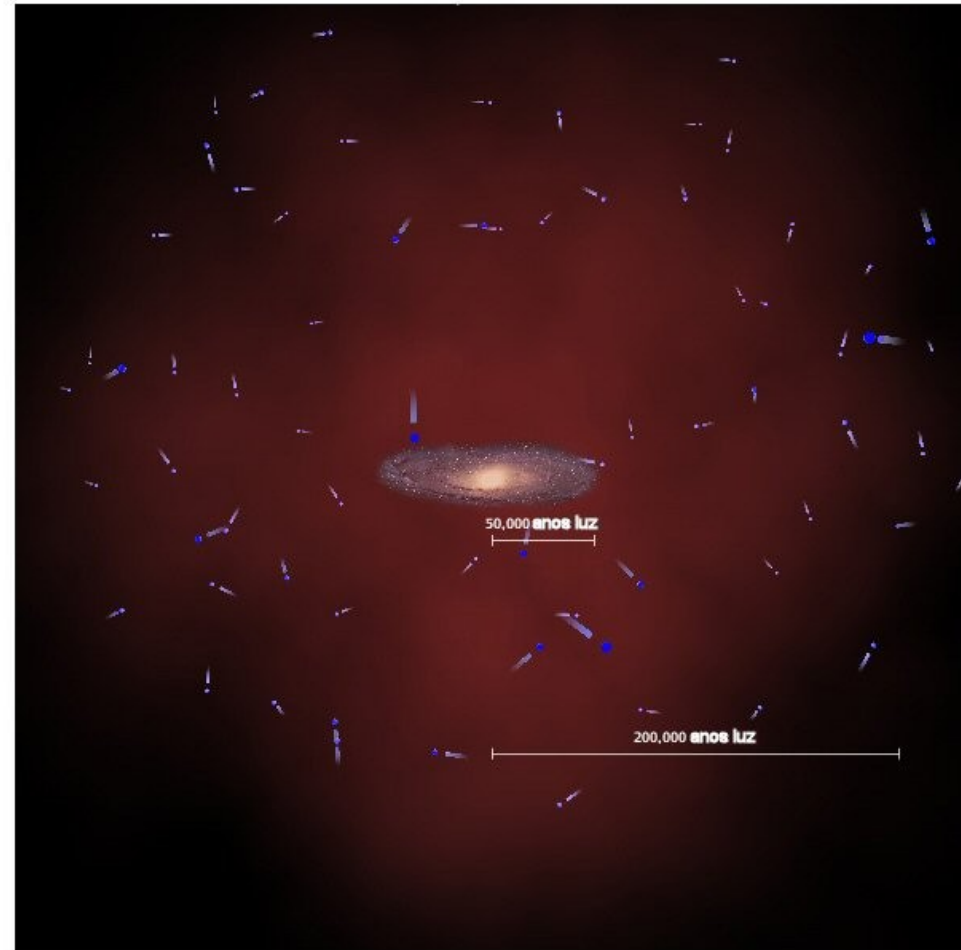
➤ massa da Galaxia: crescendo linearmente com a distancia

$2 \times 10^{11} M_{\text{Sol}}$

$6 \times 10^{11} M_{\text{Sol}}$

Halo de Matéria Escura

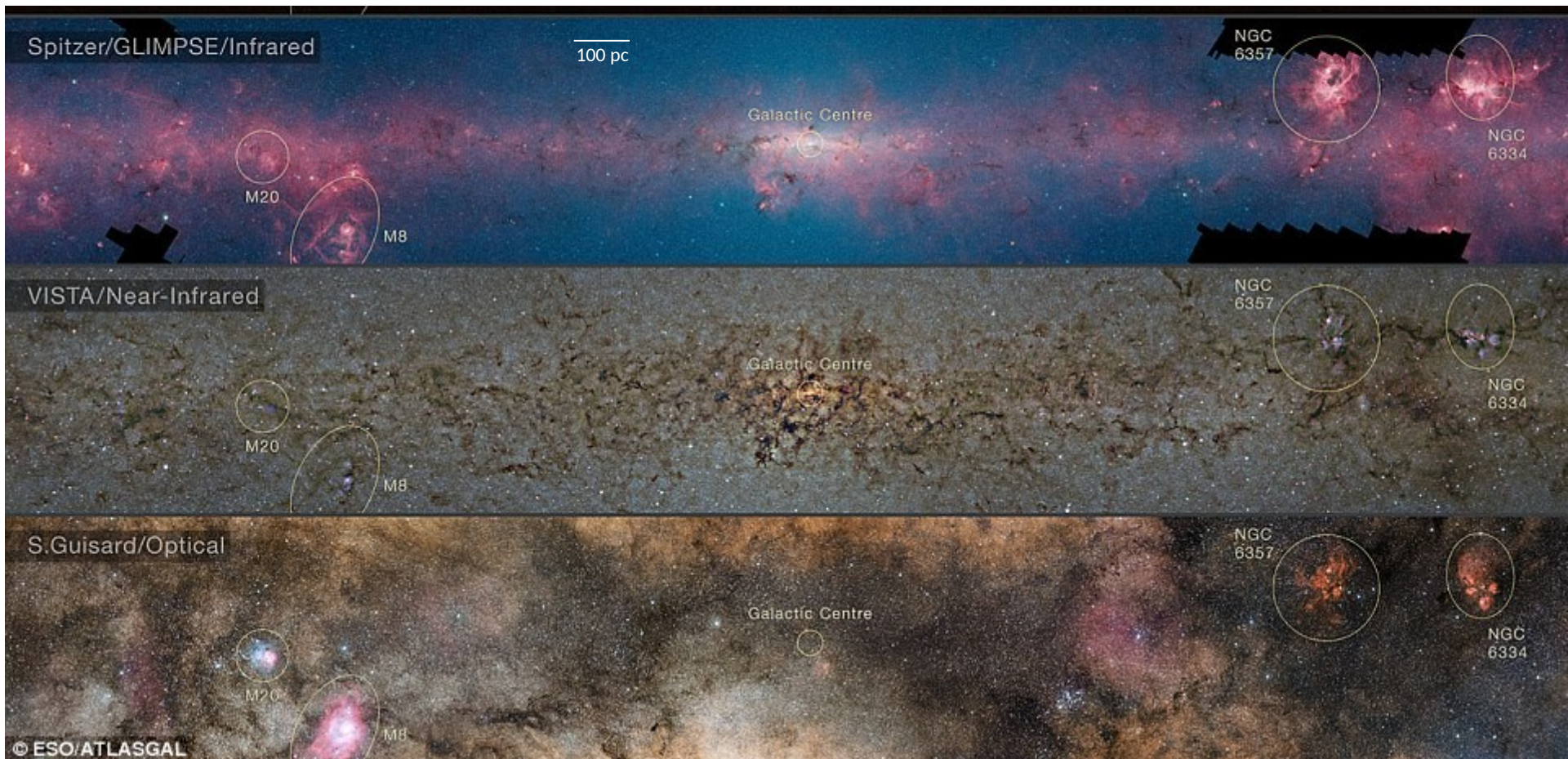
- Se toda a massa da Galáxia estivesse contida na extensão de matéria luminosa ($r_{\text{lum}} \sim 15 \text{ kpc}$): a rotação seguiria um movimento Kepleriano (mesmo para raios maiores que $2 \times R_{\text{sol-CG}}$)
- Mas, a velocidade continua constante até a última medição => indício de que a massa cresce com o raio.
- A maior parte da massa não está associada à parte luminosa (que se estende até 15 kpc), mas sim à massa periférica **NÃO LUMINOSA**.



A curva de rotação observada prova que existe **matéria escura** em nossa Galáxia e que ela é dominante.

O Centro da Galáxia

- Núcleo da Galáxia **grande quantidade de estrelas.**
- Absorção interestelar bloqueia a luz visível dos objetos, somente **observáveis no infra-vermelho e em rádio.**



O Centro da Galáxia

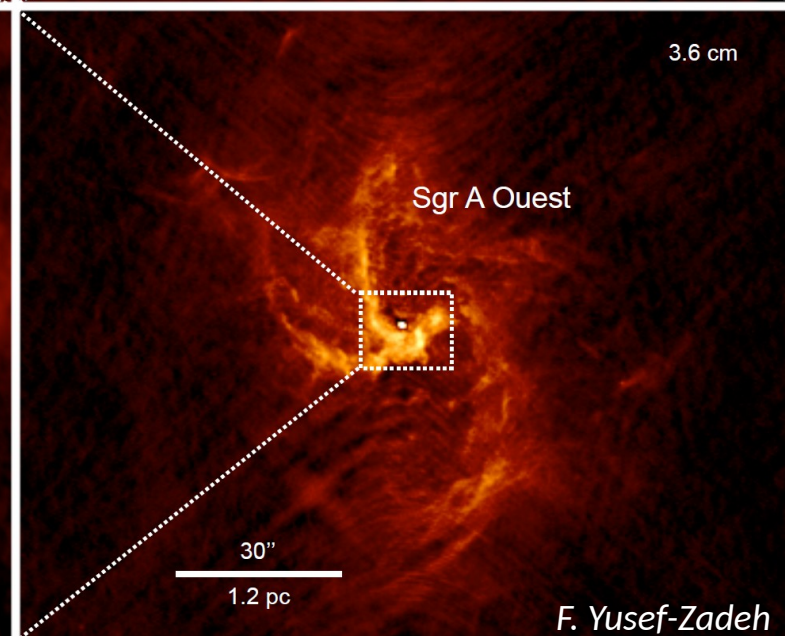
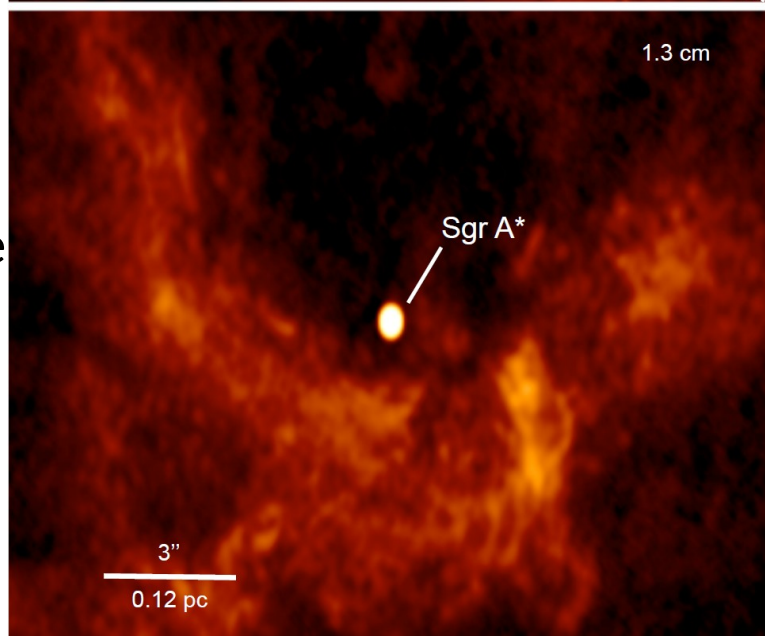
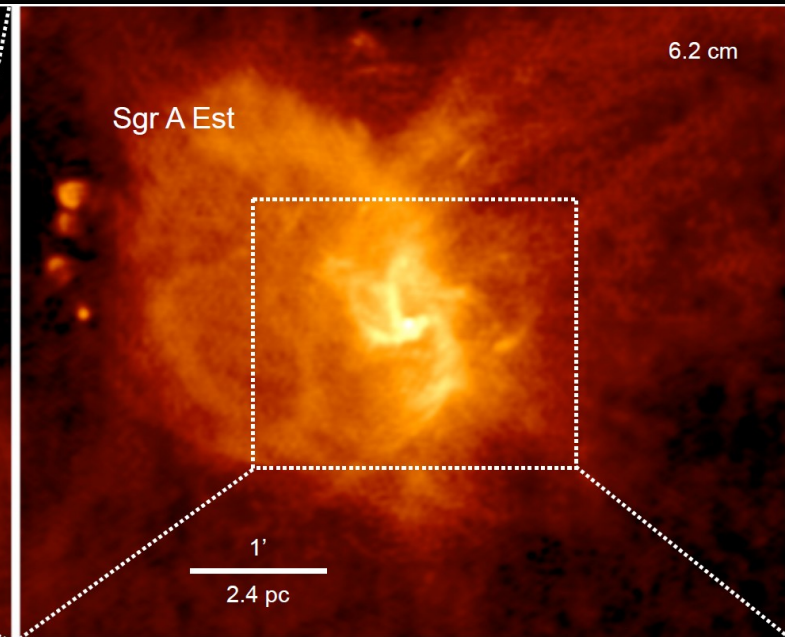
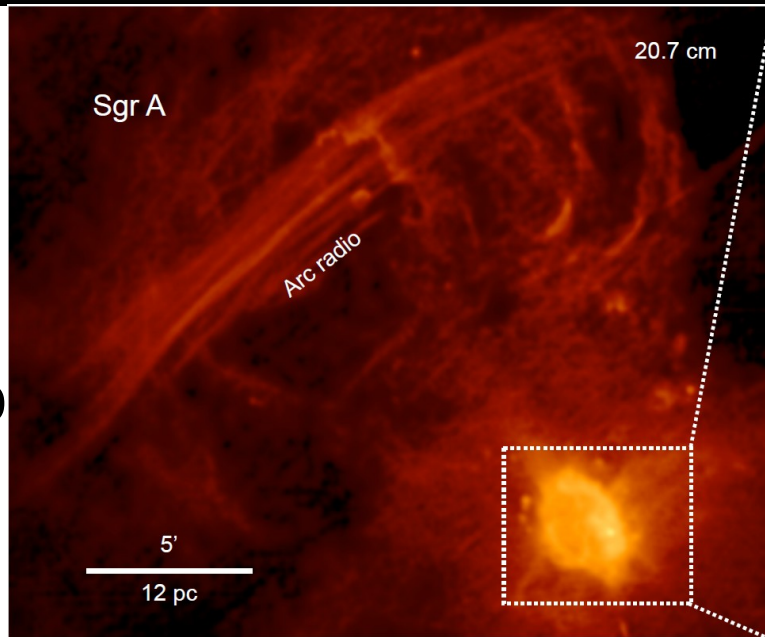
- Núcleo da Galáxia **grande quantidade de estrelas.**
- Absorção interestelar bloqueia a luz visível dos objetos, somente **observáveis no infra-vermelho e em rádio.**



O Centro da Galáxia

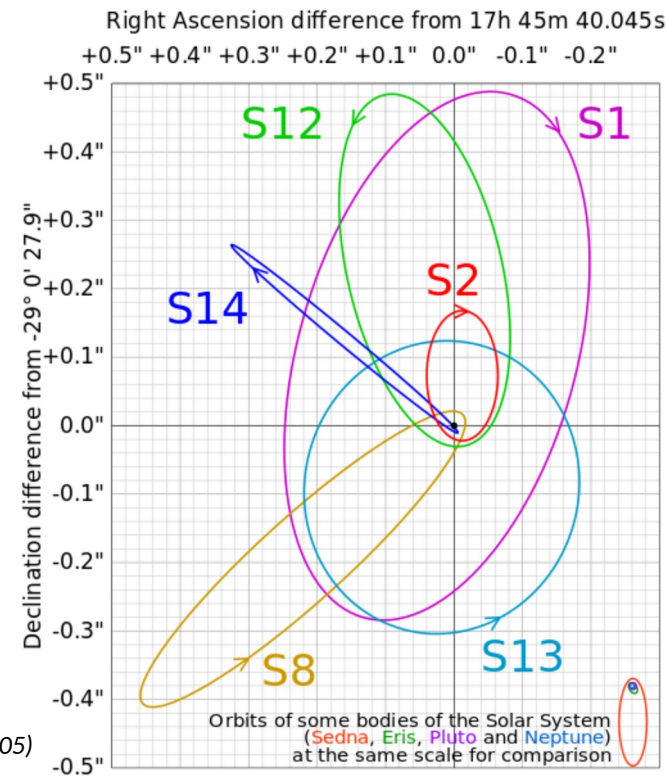
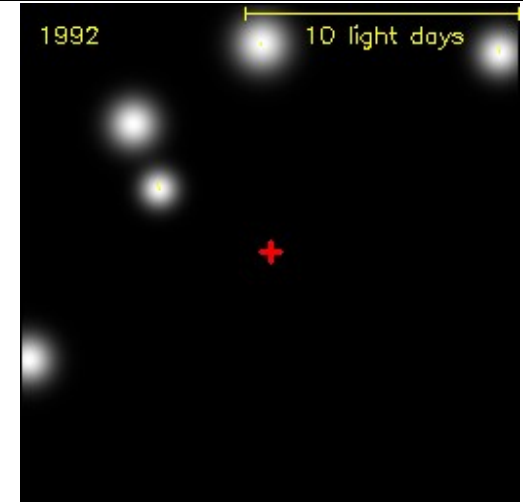
- O CG contém uma forte fonte rádio Sagittarius A* em pequena escala, notam-se filamentos (~100 pc) => presença de fortes campos magnéticos.

- Escalas ainda menores: presença de um anel disco de gas em rotação: dimensão de < alguns parsecs: sugere CG massivo e compacto



Sgr A* : buraco negro supermassivo?

- A estrela S2 segue uma órbita elíptica com um período de 15,2 anos e um pericentro (distância mais próxima) de 17 horas luz ($1,8 \times 10^{13}$ m) do centro do objeto central.
- A partir do movimento da estrela S2, a massa do objeto pode ser estimada em 4,1 milhões de massas solares. (O raio de Schwarzschild correspondente é de 0,08 UA / 12 milhões de km ; 17 vezes maior que o raio do Sol.)
- O volume do objeto central pode ser ainda mais limitado pela órbita da estrela S0-16 (também conhecida como S14), que chegou a 45 UA sem colidir.
- As estimativas de massa e diâmetro são agora restringidas principalmente pelas incertezas na distância aos objetos.



EXTRAS

Sistema de coordenadas galácticas

- Sistema útil principalmente em astronomia extragaláctica (como o estudo do Grupo Local de galáxias, no qual a Via Láctea e a galáxia de Andrômeda são os principais membros) ou em problemas ligados à nossa galáxia como um todo (por exemplo, o movimento das estrelas do disco da Via Láctea)
- Inclinação do plano galáctico em relação ao equador: $62^{\circ},872$

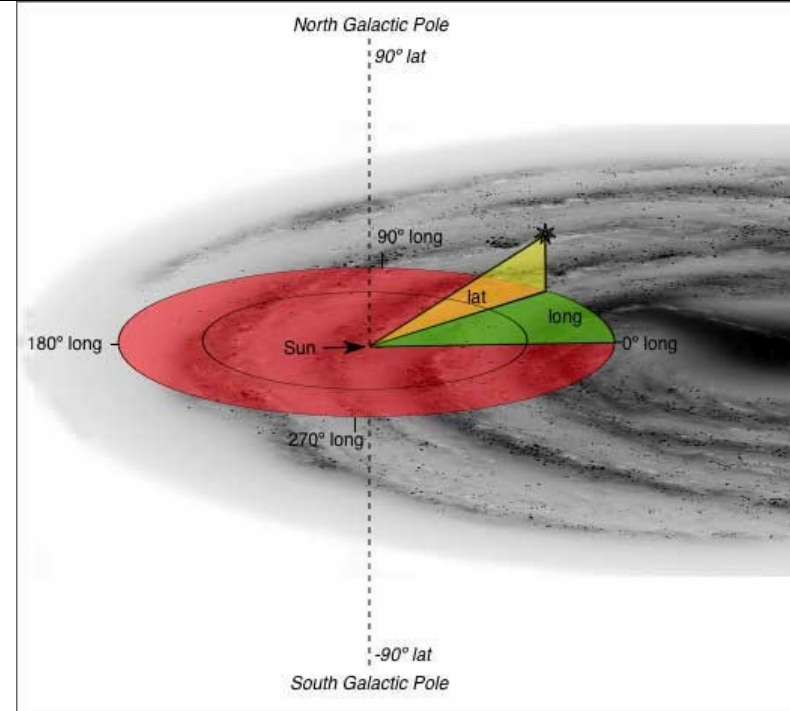
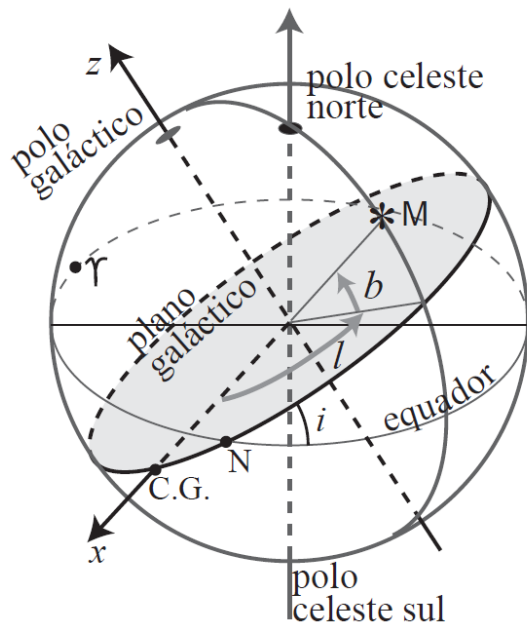
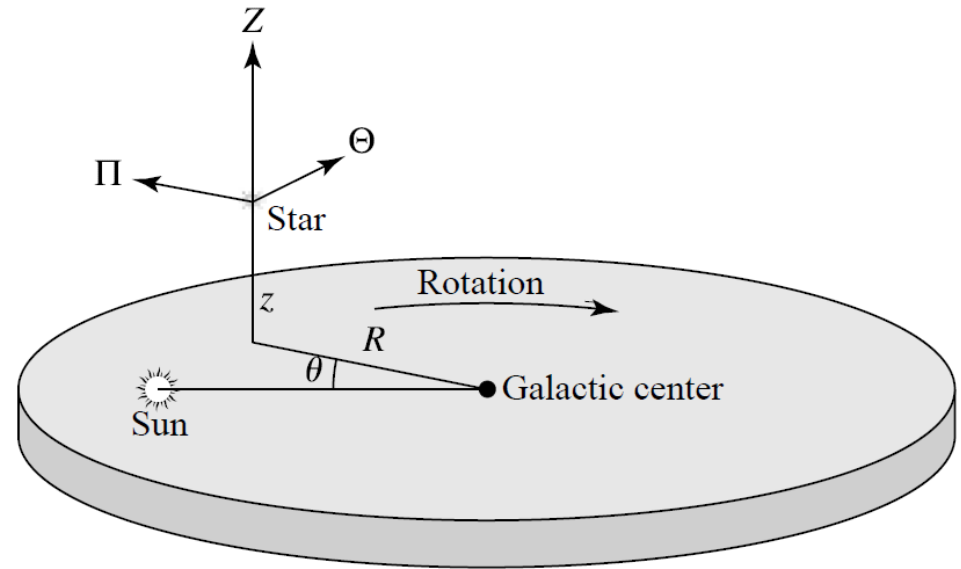


Figura 1.22: Sistema de coordenadas galácticas. O astro M tem coordenadas longitude galáctica (l) e latitude (b). O ponto N é a intersecção do plano galáctico com o equador celeste (o nodo), C.G. é o direção do centro da Galáxia (que fica na constelação de Sagitário) e i é a inclinação do plano galáctico em relação ao equador celeste.

Coordenadas cilíndricas para movimento galáctico

- Sistema de coordenadas galácticas não é o mais conveniente para estudo da cinemática dos objetos galácticos <-> o Sol também se move
- Sistema mais útil para cálculo cinemático: coordenadas cilíndricas centradas no CG



$$\Pi \equiv \frac{dR}{dt}, \quad \Theta \equiv R \frac{d\theta}{dt}, \quad Z \equiv \frac{dz}{dt}.$$

Sistema de mão esquerda -> sentido de rotação da Galáxia

Movimentos peculiares e referencial padrão de repouso

Para investigar o movimento do Sol ao redor da Galáxia, definimos dois referenciais:

- **Referencial Padrão de Repouso Dinâmico (LSR, dynamical local standard of rest):** é um referencial cuja origem é a posição **instantânea** do Sol e descreve uma trajetória **perfeitamente circular** em torno do centro da Via Láctea.
- **Referencial Padrão de Repouso Cinético:** é um referencial cuja origem é o Sol e descreve uma trajetória dada pela média das velocidades das estrelas na vizinhança solar

Velocidades das componentes do LSR: $\Pi_{\text{LSR}} \equiv 0$, $\Theta_{\text{LSR}} \equiv \Theta_0$, $Z_{\text{LSR}} \equiv 0$,

Movimentos peculiares e referencial padrão de repouso

Para investigar o movimento do Sol ao redor da Galáxia, definimos dois referenciais:

- **Referencial Padrão de Repouso Dinâmico (LSR, dynamical local standard of rest):** é um referencial cuja origem é a posição **instantânea** do Sol e descreve uma trajetória **perfeitamente circular** em torno do centro da Via Láctea.
- **Referencial Padrão de Repouso Cinético:** é um referencial cuja origem é o Sol e descreve uma trajetória dada pela média das velocidades das estrelas na vizinhança solar

Velocidades das componentes do LSR: $\Pi_{\text{LSR}} \equiv 0$, $\Theta_{\text{LSR}} \equiv \Theta_0$, $Z_{\text{LSR}} \equiv 0$,

Velocidade de uma estrela relativa ao LSR é chamada **velocidade peculiar:**

$$\mathbf{V} = (V_R, V_\theta, V_z) \equiv (u, v, w),$$

onde

$$u = \Pi - \Pi_{\text{LSR}} = \Pi,$$

$$v = \Theta - \Theta_{\text{LSR}} = \Theta - \Theta_0,$$

$$w = Z - Z_{\text{LSR}} = Z.$$

Movimentos peculiares e referencial padrão de repouso

Para investigar o movimento do Sol ao redor da Galáxia, definimos dois referenciais:

- **Referencial Padrão de Repouso Dinâmico (LSR, dynamical local standard of rest):** é um referencial cuja origem é a posição **instantânea** do Sol e descreve uma trajetória **perfeitamente circular** em torno do centro da Via Láctea.
- **Referencial Padrão de Repouso Cinético:** é um referencial cuja origem é o Sol e descreve uma trajetória dada pela média das velocidades das estrelas na vizinhança solar

Velocidades das componentes do LSR: $\Pi_{\text{LSR}} \equiv 0$, $\Theta_{\text{LSR}} \equiv \Theta_0$, $Z_{\text{LSR}} \equiv 0$,

Velocidade de uma estrela relativa ao LSR é chamada **velocidade peculiar:**

$$\mathbf{V} = (V_R, V_\theta, V_z) \equiv (u, v, w),$$

onde

$$u = \Pi - \Pi_{\text{LSR}} = \Pi,$$

$$v = \Theta - \Theta_{\text{LSR}} = \Theta - \Theta_0,$$

$$w = Z - Z_{\text{LSR}} = Z.$$

A velocidade peculiar do Sol é chamada de **movimento solar**

Média das velocidades peculiares u e w

Na vizinhança solar, a média das velocidades peculiares **radiais (u) e verticais (w)** das estrelas (excluindo o Sol) deve ser **zero**, **se assumirmos simetria axial da Galáxia (isso é verdade?)**, isto é:

$$\langle u \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i \simeq 0,$$

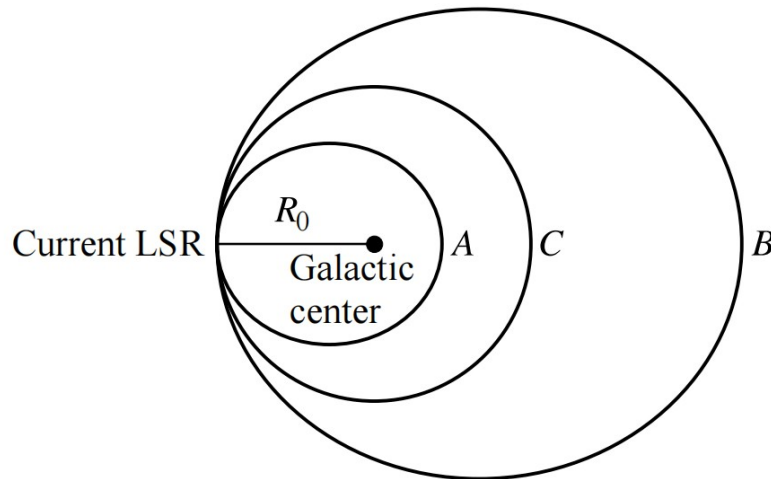
$$\langle w \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i \simeq 0.$$

onde N é o número de estrelas próximas

E quanto à velocidade peculiar tangencial?

Média das velocidades peculiares v

No caso da velocidade peculiar tangencial, a média dela não será zero, pois estrelas com diferentes raio orbital médio seguem trajetórias que podem passar pelo LSR:



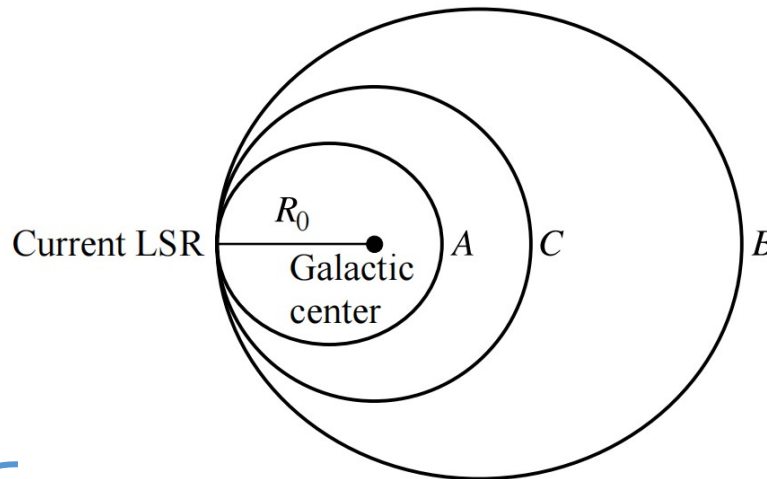
A e B são estrelas com órbitas elípticas com semi-eixos maiores:

$$a_A < R_0 \quad \text{e} \quad a_B > R_0.$$

C é uma estrela com órbita circular de raio R_0

Média das velocidades peculiares v

No caso da velocidade peculiar tangencial, a média dela não será zero, pois estrelas com diferentes raio orbital médio seguem trajetórias que podem passar pelo LSR:



A e B são estrelas com órbitas elípticas com semi-eixos maiores:

$$a_A < R_0 \text{ e } a_B > R_0.$$

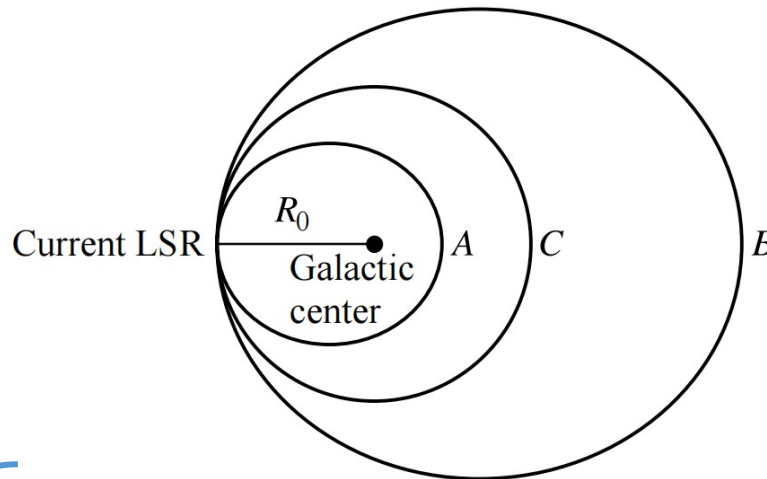
C é uma estrela com órbita circular de raio R_0

Nesse caso:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Theta_A(R_0) < \Theta_0 \\ \Theta_B(R_0) > \Theta_0 \end{array} \right. \longrightarrow \left\{ \begin{array}{l} v_A < 0 \\ v_B > 0 \end{array} \right.$$

Média das velocidades peculiares v

No caso da velocidade peculiar tangencial, a média dela não será zero, pois estrelas com diferentes raio orbital médio seguem trajetórias que podem passar pelo LSR:



A e B são estrelas com órbitas elípticas com semi-eixos maiores:

$$a_A < R_0 \text{ e } a_B > R_0.$$

C é uma estrela com órbita circular de raio R_0

Nesse caso:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Theta_A(R_0) < \Theta_0 \\ \Theta_B(R_0) > \Theta_0 \end{array} \right. \longrightarrow \left\{ \begin{array}{l} v_A < 0 \\ v_B > 0 \end{array} \right.$$

Como a densidade de estrelas aumenta em direção ao CG



$$\langle v \rangle < 0.$$

Por isso o LSR cinemático é mais lento que o LSR dinâmico!

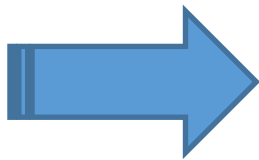
Velocidade radial e vertical do Sol

A velocidade relativa de uma estrela da vizinhança solar ao Sol é dada por

$$\Delta u \equiv u - u_{\odot}, \quad \Delta v \equiv v - v_{\odot}, \quad \Delta w \equiv w - w_{\odot}.$$

Tomando a média das estrelas na vizinhança solar e aplicando

$$\left\{ \begin{array}{l} \langle u \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i \simeq 0, \\ \langle w \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i \simeq 0. \end{array} \right.$$



$$u_{\odot} = - \langle \Delta u \rangle ,$$

$$v_{\odot} = \langle v \rangle - \langle \Delta v \rangle ,$$

$$w_{\odot} = - \langle \Delta w \rangle .$$

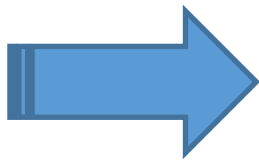
Velocidade radial e vertical do Sol

A velocidade relativa de uma estrela da vizinhança solar ao Sol é dada por

$$\Delta u \equiv u - u_{\odot}, \quad \Delta v \equiv v - v_{\odot}, \quad \Delta w \equiv w - w_{\odot}.$$

Tomando a média das estrelas na vizinhança solar e aplicando

$$\left\{ \begin{array}{l} \langle u \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i \simeq 0, \\ \langle w \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i \simeq 0. \end{array} \right.$$



$$u_{\odot} = - \langle \Delta u \rangle ,$$

$$v_{\odot} = \langle v \rangle - \langle \Delta v \rangle ,$$

$$w_{\odot} = - \langle \Delta w \rangle .$$

A velocidades radial e vertical do Sol refletem a média das velocidades relativas das outras estrelas

Velocidade tangencial do Sol

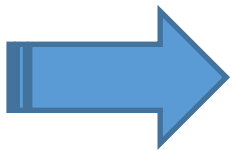
Para encontrar a velocidade tangencial do Sol é necessário saber a média das velocidades tangenciais das estrelas locais (teoria avançada de movimento galáctico). Resultado:

$$\langle v \rangle = C \sigma_u^2,$$

onde C é uma constante e

$$\sigma_u \equiv \langle u^2 \rangle^{1/2}$$

é a dispersão de velocidades radiais (medida).



$$\langle \Delta v \rangle = C \sigma_u^2 - v_{\odot}$$

Velocidade do Sol

Valores medidos da velocidade peculiar do Sol:

$$u_{\odot} = -10.0 \pm 0.4 \text{ km s}^{-1},$$

$$v_{\odot} = 5.2 \pm 0.6 \text{ km s}^{-1},$$

$$w_{\odot} = 7.2 \pm 0.4 \text{ km s}^{-1},$$

Velocidade média de 13.4 km s^{-1} na direção da constelação de Hércules (apéx solar)