

#### Astrofísica Galáctica e Extragaláctica

AGA 299 - IAG/USP

Ronaldo E. de Souza redsouza48@usp.br Março 2024

## A Via Láctea

Na Via Láctea a quantidade de informação é enorme e muitas vezes temos dificuldade de compatibilizar todas elas!



### **J. Kapteyn** (1851-1922)

Qual é a vantagem de ver *Via Láctea* como uma distribuição de elipsoides oblatos achatados?

 $\begin{array}{ll} m_i - M_i = 5 \, \log \, r - 5 & ou, \\ r = 10^{\,(m_i - M_i + 5)/5} = k \, 10^{0, 2m_i} \end{array} \\ \end{array}$ 





#### .. e uma versão atualizada desta busca baseada nos resultados da missão Gaia (ESA, 2020)



**Porque é importante observar em diversos comprimentos de ondas?** 

Em 408 mHz observamos a emissão dos elétrons relativísticos, gerados pelas supernovas, se movimentando no campo magnético galáctico. 05



F = 1

F = 0

Na linha de 21 cm observamos a densidade de coluna do hidrogênio neutro que se origina de uma transição de spin.



Em 2,7 mHz visualizamos a emissão no contínuo rádio originado pelo gás quente ionizado e também por elétrons de altas energias presentes no meio interestelar. 07





Densidade de coluna do hidrogênio molecular obtida a partir de observações na linha do CO mostra as regiões mais frias e densas do meio interestelar





No infravermelho (IRAS 12, 60 e 100 mícron) temos a emissão térmica da radiação grãos interestelares dos aquecidos pelas estrelas próximas.





No infravermelho próximo (6-10 mícron do satélite MSX), temos a emissão de hidrocarbonetos policíclicos das nuvens interestelares.





No infravermelho próximo (1,25 + 2,2 + 3,5 micron)COBE) a emissão se deve a estrelas do tipo gigantes K presentes no disco e bojo da Galáxia.



#### No visível a absorção interestelar limita as observações!





Na imagem composta em raios-X ( 0,25+0,75+1,5 keV ROSAT) temos a emissão devido a ondas de choques gás no interestelar.

13





imagem dos raios-y de altas Na energias (>300 MeV EGRET) temos a emissão de raios-y emitido na colisão de raios cósmicos com os prótons. Ao lado a fonte Geminga identificada com uma estrela de nêutrons.

## No final a *Via Láctea* é uma distribuição de estrelas, gás, poeira, radiação e matéria escura.



## A *Via Láctea* vista por 1,7 bilhões de estrelas observadas pelo satélite GAIA.







(A)Barnard 68: nuvem molecular fria no limite de contração gravitacional. (B)Cabeça de Cavalo: fria nuvem iluminada pela radiação de estrelas jovens. (C)Caranguejo: resto da supernova 1054 AD. (D) Tarântula: região de formação estelar intensa na LMC.





Correção pela observação em duas bandas

$$A_{V} = V - V_{0} = c k(\lambda_{V}) L$$

$$A_{\rm B} = B - B_0 = c k(\lambda_{\rm B}) L$$

#### avermelhamento do índice de cor

$$E(B-V) = (B-V) - (B-V)_0 = (B-B_0) - (V-V_0) = A_B - A_V$$

#### E(B-V) é chamado de excesso de cor.

Como, E(B-V) = c [k( $\lambda_B$ ) - k( $\lambda_V$ )] L

temos que

 $A_V/E(B-V) = k(\lambda_V)/(k(\lambda_B)-k(\lambda_V)) = R \cong 3,1$ 

R é independente da dimensão da camada absorvedora, depende da composição dos grãos e imagina-se(?!) que seja aplicável às galáxias externas.

#### Schlegel, Finkbeiner & Davis (<u>1998, ApJ,500, 525</u>) utilizando dados dos satélites COBE/DIRBE e IRAS





#### **Exemplo de correção**

A absorção interestelar na direção da galáxia NGC 3115 indica que A<sub>v</sub>= 0,145 mag. Como V=10,01 concluímos que a sua magnitude livre da absorção galáctica deva ser  $V_0 = 9,865$ .

#### Exemplo da prova P1 2011

- A partir da aproximação  $A_{\lambda} = a + b/\lambda$ , sabendo que  $\lambda_{v}=0,55\mu$ , use o gráfico  $A_{\lambda}/A_{v}$  para determinar a e b e R.

- Suponha que a absorção na direção de uma região próxima ao centro galáctico seja A<sub>V</sub>  $\cong$  4 mag. Qual seria a absorção estimada nas bandas U(0,3µ), B(0,44µ), R(0,71µ), I(0,97µ) e K(2,2µ)?

#### No centro galáctico a extinção interestelar chega a atingir valores de $A_V \cong 310$ mag!



28d







Na direção radial o disco estrelar segue um perfil exponencial

 $\rho_d(R) = \rho_{0d} e^{-R/Rd}$ 

com  $R_{df} \cong$  2,9 - 3,9 Kpc.



31

#### Com o modelo $U=U_{Bojo}+U_{DFino}+U_{DEspesso}+U_{Halo}$ Pode-se calcular a aceleração em uma estrela $\ddot{\vec{r}} = -\nabla U$





Gaia G absolute magnitude



# Amostras de estrelasdodiscodoslevantamentosSDSSe Hipparcos










#### Atenção

#### Ao contrário de um gás ideal o "fluido das estrelas" da Galáxia é anisotrópico!

Tipo	$\sigma_u$	$\sigma_v$	$\sigma_w$
A0-A5	$17,03\pm0,21$	$11,26\pm0,34$	$7,16\pm0,36$
A5-F0	$19,81\pm0,25$	$13,39\pm0,39$	$8,07\pm0,51$
F0-F5	$22,54\pm0,28$	$15,29\pm0,43$	$9,94\pm0,66$
K0-K5	$30,45\pm0,27$	$20,51\pm0,42$	$16,04\pm0,54$
K5-M0	$30,99\pm0,39$	$22,44\pm0,56$	$17,21\pm0,71$
M0-M5	$32,21\pm0,47$	$23,11\pm0,70$	$18,30\pm0,81$





A metalicidade [Fe/H] =  $Log(N_{Fe}/N_{H}) - Log(N_{Fe}/N_{H})_{\odot}$ é um indicador da idade das populações estelares e mostra que a nossa Galáxia evoluiu. Como entender este processo?

# A população das estrelas mais jovens, com alta metalicidade, apresenta uma rotação mais elevada que a população das estrelas mais velhas.



43



distribuição dos A aglomerados globulares é mais ou menos esférica sendo diferente do bojo e do disco!





S



As estrelas do halo são pobres em metais e normalmente são encontradas mais afastadas do disco rico em estrelas jovens.









~20 kpc

Formação dos primeiros aglomerados globulares pobres em metais <u>~20 kpc</u>, Formação dos aglomerados globulares ricos em metais

Formação do disco e do bojo

Um cenário simplificado para a formação da *Via Láctea*.



#### Helmi et al, 2018, Nature, 563, 85



Durante a sua evolução a Via Láctea capturou alguns objetos próximos e isto deve ter ocorrido com objeto identificado um como Gaia-Enceladus.



Dados do telescópio James Webb, JWST, estão detectando objetos com redshifts ~ 15-20 e portanto com idades comparáveis com as fases iniciais do colapso da nossa Galáxia.

Quando terminou a era das trevas?

<u>Os atuais</u> modelos  $\Lambda$ CDM são consistentes com estas observações?



## Porque podemos tratar Galáxia como um sistema não colisional?

#### deflexão orbital em encontros hiperbólicos distantes tan $\phi = G(m_1 + m_2)/pv_0^2$



#### Encontros típicos da vizinhança solar

**Densidade de estrelas:**  $n \cong 0,1 */pc^3$ 

Separação média:  $s=1/n^{1/3} \cong 2,2 \text{ pc} \cong 4,5x10^5 \text{ UA}$ 

Vel. RMS ao LSR:  $v_0 \cong \sigma_v \cong 20 \text{ km/s}$ 

**Deflexão média:**  $\phi \cong 2$  "

São encontros do tipo fraco!

#### Como o livre caminho médio é

 $\lambda = 1/\pi p^2 n$ 

#### a escala de tempo para estas interações é

t= 
$$\lambda / \sigma_v >> t_H \cong 10^{10}$$
 anos



#### Num gás colisional a estrutura interna se modifica rapidamente enquanto que num gás não-colisional ela se mantém praticamente intacta por muito tempo!





Como se formou a estrutura do disco exponencial?

 $n(r) = n_0 \exp(-r/r_d)$ 

onde  $r_d \cong$  3,5 Kpc.

Como entender os braços espirais?



## Quais são as estrelas típicas do disco?

#### relação massa-luminosidade

L\*/L<sub>o</sub>= (M/M<sub>o</sub>)<sup>α</sup>

55



Como o disco tem  $L_{R} \cong (2,5\pm1) \times 10^{10} L_{\odot}$ M<sub>d</sub>≅(4,5±0.5)x10<sup>10</sup>M<sub>☉</sub> temos que  $f=(M/L)_d \cong (1,1-3,3)M_{\odot}/L_{\odot}$ E a massa média das estrelas do disco deve ser

> $M_* = f^{1/(1-\alpha)} M_{\odot}$ ≅ (0,7 - 1,0)  $M_{\odot}$



que podemos escrever na sua forma diferencial

$$\frac{1}{\rho_i}\frac{d}{dz}(\rho_i v_{zi}^2) = -\frac{d\Phi}{dz}$$

onde utilizamos o fato de que a aceleração gravitacional do disco deriva de um potencial gravitacional. Por outro lado este potencial gravitacional obedece a equação de Poisson e

#### no disco o termo dominante no laplaciano é a derivada na direção vertical

 $d^2\Phi/dz^2 = dg_z/dz \cong 4\pi G\rho$ 

e portanto

$$\frac{d}{dz} \left[ \frac{1}{\rho_i} \frac{d}{dz} (\rho_i v_{zi}^2) \right] = -4\pi G \rho$$
Matéria escura

Componente	Densidade volumétrica (M <sub>☉</sub> /pc³)	
Estrelas visíveis	0,044	
Remanescentes estelares	0,028	
Gás	0,042	
Outros	0,066	
Total	0,180	



ComoseráquequeseformouobojodaGaláxia?

Janelas de Baade



#### Estrelas do bojo vistas pela janela de Baade







#### (A) sequência principal

(B) Ramo horizontal HB
(C) Ramo horizontal GHB
(D) RHB
(F-E) turn-off



### Estrelas possivelmente pertencentes ao bojo!

A região nuclear só pode ser vista no infravermelho!





A partir da figura verificamos que,

 $V_{r} = \Theta(R) \cos \alpha - \Theta_{0} \sin l$  $V_{t} = \Theta(R) \sin \alpha - \Theta_{0} \cos l$ 



e a cada distância radial R determinamos a velocidade angular local

 $\Omega(R) = \Theta(R)/R$ 

As relações anteriores podem ser reescritas como

 $V_{r}=\Omega R \cos \alpha - \Omega_{0}R_{0} \text{sen } I$  $V_{t}=\Omega R \sin \alpha - \Omega_{0}R_{0} \text{cos } I$ 

e pela figura temos as relações

R cos  $\alpha$  = R<sub>0</sub>sen / R sen  $\alpha$  = R<sub>0</sub>cos / - d



- e substituindo nas relações anteriores
- $V_{r} = (\Omega \Omega_{0})R_{0} \text{sen } I$  $V_{t} = (\Omega \Omega_{0})R_{0} \text{cos } I \Omega d$



Estas relações podem ser invertidas e nos permitem obter as estimativas da velocidade angular de rotação, Ω(R), para cada camada radial na vizinhança solar. desenvolvendo a velocidade angular de rotação em uma série de Taylor

 $Ω(R) = Ω_0 + (dΩ/dR)_0 (R-R_0) + ...$ 

Como Ω=Θ/R esta relação, obtida por Oort, pode ser reescrita como

 $\Omega$ - $\Omega_0 \cong 1/R_0 [(d\Theta/dR)_0 - \Theta_0/R_0] (R-R_0) + ...$ 



### e desta forma as relações anteriores podem ser reescritas na forma

 $\begin{aligned} \mathbf{v}_{\mathrm{r}} &\cong \left[ \left( \mathrm{d}\Theta/\mathrm{d}R \right)_{0} - \Theta_{0}/\mathrm{R}_{0} \right] \left( \mathrm{R}-\mathrm{R}_{0} \right) \, \mathrm{sen} \, I \\ \mathbf{v}_{\mathrm{t}} &\cong \left[ \left( \mathrm{d}\Theta/\mathrm{d}R \right)_{0} - \Theta_{0}/\mathrm{R}_{0} \right] \left( \mathrm{R}-\mathrm{R}_{0} \right) \, \mathrm{cos} \, I - \Omega_{0} \mathrm{d} \end{aligned}$
Pela figura do arranjo geométrico inicial podemos concluir ainda que

 $R_0 = d \cos l + R \cos \beta \cong d \cos l + R$ 

e definir agora as duas constantes de Oort

 $A=-1/2[(d\Theta/dR)_0-\Theta_0/R_0]$ 

 $B=-1/2[(d\Theta/dR)_0+\Theta_0/R_0]$ 

utilizando estas definições obtemos finalmente

 $\mathbf{v}_{r} \cong \mathbf{Ad} \operatorname{sen} \mathbf{2I}$  $\mathbf{v}_{t} \cong \mathbf{Ad} \cos \mathbf{2I} + \mathbf{Bd}$ 

## sabendo A e B estimamos a velocidade local de rotação e a derivada do campo de velocidade

**Ω**<sub>0</sub>=**A**-**B** 

 $(d\Theta/dR)_0 = -(A+B)$ 

Os valores recentes indicam que

A=(14,4 ± 1,2) km/s/kpc B=(-12 ± 2,8) km/s/kpc

 $\Omega_0 = 26,4 \text{ km/s/kpc}$ 

e para R<sub>0</sub>=(8,5±1.1)kpc, à velocidade de rotação da nossa galáxia na posição solar é

Θ<sub>0</sub>=224,4 km/s





Mapa do hidrogênio neutro

77

## Curva de rotação galáctica



para uma partícula de teste de massa m<sub>\*</sub> temos

 $m_*V^2/R \cong Gm_*M_{halo}/R^2$ 

onde M<sub>halo</sub> indica a massa contida no halo de matéria escura. A relação acima implica em que a massa do halo deve ser proporcional ao seu raio (R)

 $M_{halo} \cong V^2 R/G \cong 10^{11} M_{\odot}$ 

## FIM