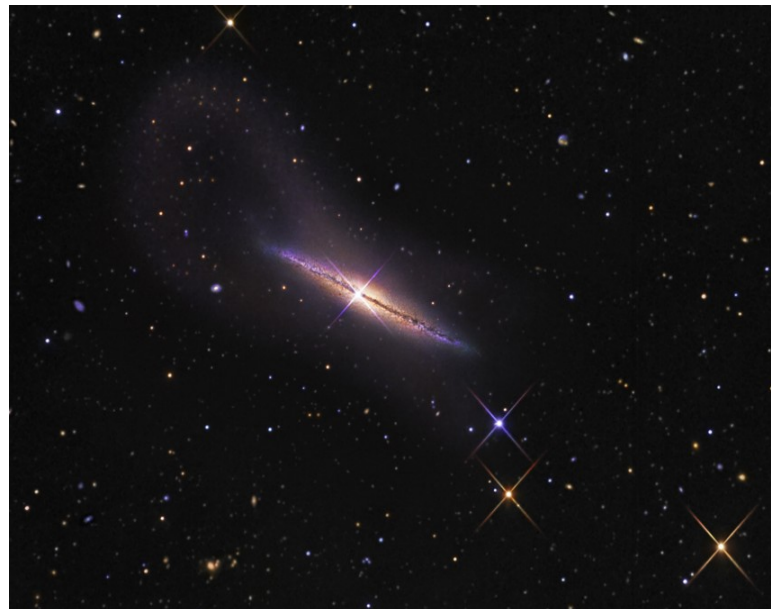


# 9. Galáxias Espirais (II)



# A estrutura vertical dos discos

- Os discos das espirais são normalmente finos
- A espessura é produzida pela *dispersão de velocidades* na direção perpendicular ao plano do disco,  $\sigma_z$



# A estrutura vertical dos discos

- Via Láctea: na direção vertical há várias componentes, com diferentes  $\sigma_z$  e escalas de altura  $z_0$ :
  - gás e poeira:  $z_0 \approx 50$  pc,  $\sigma_z \approx 10$  km/s
  - disco fino (jovem):  $z_0 \approx 200$  pc,  $\sigma_z \approx 25$  km/s
  - disco grosso (velho):  $z_0 \approx 1500$  pc,  $\sigma_z \approx 50$  km/s



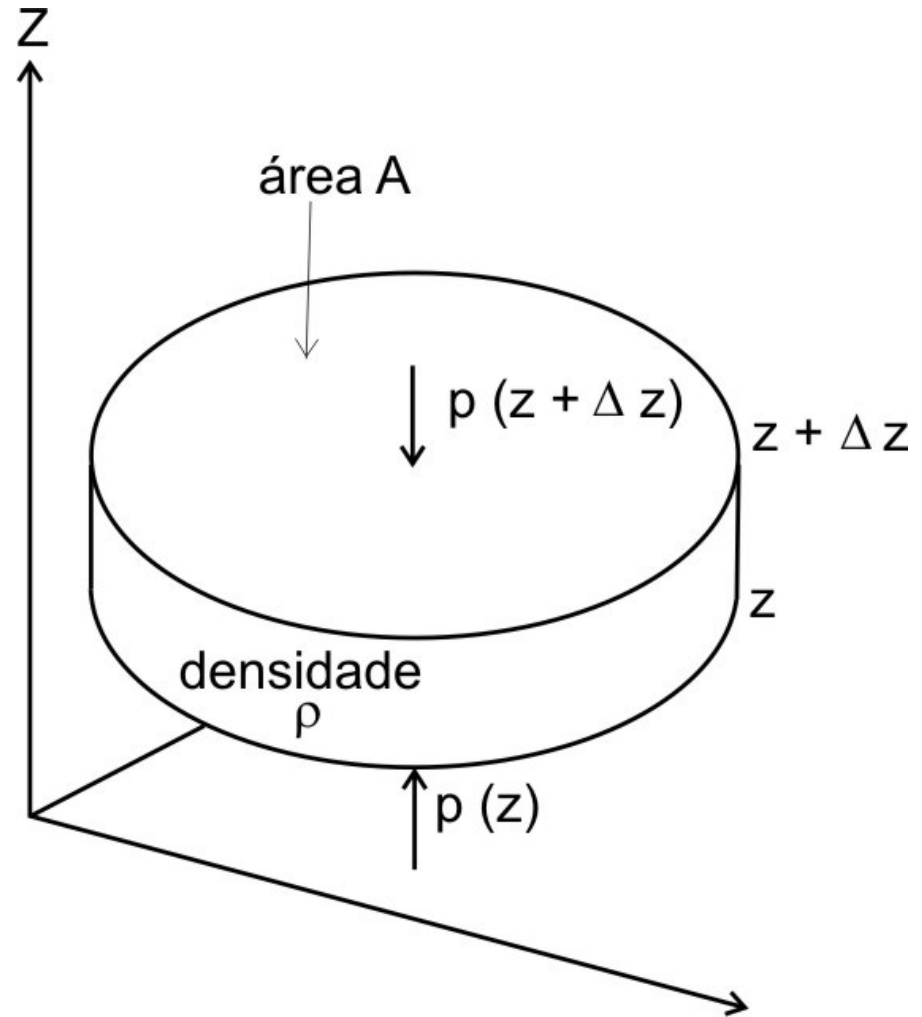
# A estrutura vertical dos discos

- Via Láctea: na direção vertical há várias componentes, com diferentes  $\sigma_z$  e escalas de altura  $z_0$
- Interpretação:  $\sigma_z$  cresce com a idade
  - as estrelas nascem em nuvens moleculares próximas do plano galáctico
  - conforme o tempo passa as estrelas são “aquecidas” por colisões com outras estrelas, nuvens moleculares, passagem de braços espirais, galáxias satélites, etc, e  $\sigma_z$  aumenta

*lembrem-se: num sistema estelar, a dispersão de velocidades  $\sigma$  é uma medida da **temperatura** do gás de estrelas*

# A estrutura vertical dos discos

- Vamos supor que o disco é plano e está em *equilíbrio hidrostático*
- Força devido à pressão resultante para cima:  
 $[p(z+dz)-p(z)]A = A dp$
- No equilíbrio essa força deve ser compensada pelo peso da camada:  
 $-m g = -\rho A dz g$
- Logo, temos a *equação do equilíbrio hidrostático*:  
 $dp/dz = -\rho g$



# A estrutura vertical dos discos

- *equação do equilíbrio hidrostático:*

$$dp/dz = -\rho g$$

- Em termos mais gerais:

$$\nabla p = -\rho \nabla \phi$$

onde  $\Phi$  é o potencial gravitacional

- equação de Poisson:

$$\nabla^2 \phi = 4\pi G \rho$$



# A estrutura vertical dos discos

- Equação de estado do gás de estrelas:  $p = \rho \sigma_z^2$
- Vamos adotar a aproximação isotérmica:  $\sigma_z = \text{constante}$

- logo, 
$$\nabla \cdot \left( \frac{1}{\rho} \nabla p \right) = -4\pi G \rho$$

Ou, em coordenadas cilíndricas:

$$\frac{d}{dz} \left( \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dz} \right) = -\frac{4\pi G \rho}{\sigma_z^2}$$



# A estrutura vertical dos discos

- A solução dessa equação é:

$$\rho(z) = \rho_0 \operatorname{sech}^2 \left( \frac{z}{z_0} \right)$$

onde

$$\rho_0 = \rho(z = 0)$$

e

$$z_0 = \left( \frac{\sigma_z^2}{2\pi G \rho_0} \right)^{1/2}$$





# A estrutura vertical dos discos

- Solução:

$$\rho(z) = \rho_0 \operatorname{sech}^2 \left( \frac{z}{z_0} \right)$$

- Comportamento

$$z \ll z_0 \longrightarrow \rho(z) \simeq \rho_0 \exp \left( -\frac{z^2}{z_0^2} \right)$$

$$z \gg z_0 \longrightarrow \rho(z) \simeq 4\rho_0 \exp \left( -\frac{2z}{z_0} \right)$$



Logo, para  $z \ll z_0$  a densidade é gaussiana e para  $z \gg z_0$  ela fica exponencial

# A estrutura vertical dos discos

- Estudo da galáxia por Oort (1932):

$$\rho_0 = \frac{\sigma_z^2}{2\pi G z_0^2}$$

- *Limite de Oort*: densidade mínima para o disco estar em equilíbrio



# A estrutura vertical dos discos

- Estudo da galáxia por Oort (1932):

$$\rho_0 = \frac{\sigma_z^2}{2\pi G z_0^2}$$

- Oort (1932):

$$\rho_0 \text{ (limite de Oort)} = 0.09 \text{ Ms pc}^{-3}$$

$$\rho_0 \text{ (observado)} = 0.03 \text{ Ms pc}^{-3}$$

- *Cerca de 1/3 da matéria na vizinhança solar é inexplicada (“matéria escura”)*



# A estrutura vertical dos discos

- Estudo da galáxia por Oort (1932):

$$\rho_0 = \frac{\sigma_z^2}{2\pi G z_0^2}$$

- Bahcall (1984):

$$\rho_0 \text{ (limite de Oort)} = 0.019 \text{ Ms pc}^{-3}$$

$$\rho_0 \text{ (observado)} = 0.014 \text{ Ms pc}^{-3}$$

- *Este resultado implica em matéria escura no disco*



# A rotação das espirais



M101

# A rotação das espirais

- Medidas de rotação: o que se mede é uma velocidade radial via efeito Doppler em um dado ponto da galáxia:

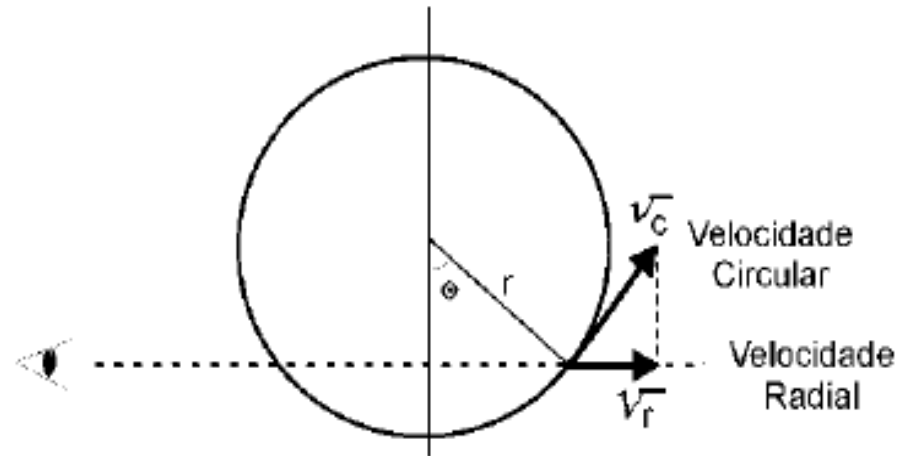
$$\Delta\lambda/\lambda = v_r/c$$

- Efeitos de projeção: galáxia com velocidade radial  $V_0$  com um disco com velocidade de rotação  $v_c$  em um raio  $r$  e visto de perfil

$$v_r = V_0 + v_c \cos\theta$$

se o disco tem inclinação  $i$ :

$$v_r = V_0 + v_c \cos\theta \sin i$$



# A rotação das espirais

- Curvas de rotação:  $v_c(r)$ 
  - inicialmente  $v_c$  cresce linearmente com o raio (como um corpo rígido) e depois fica aproximadamente constante
  - nas curvas de rotação medidas com o HI verifica-se que elas continuam aproximadamente constantes bem além do disco estelar

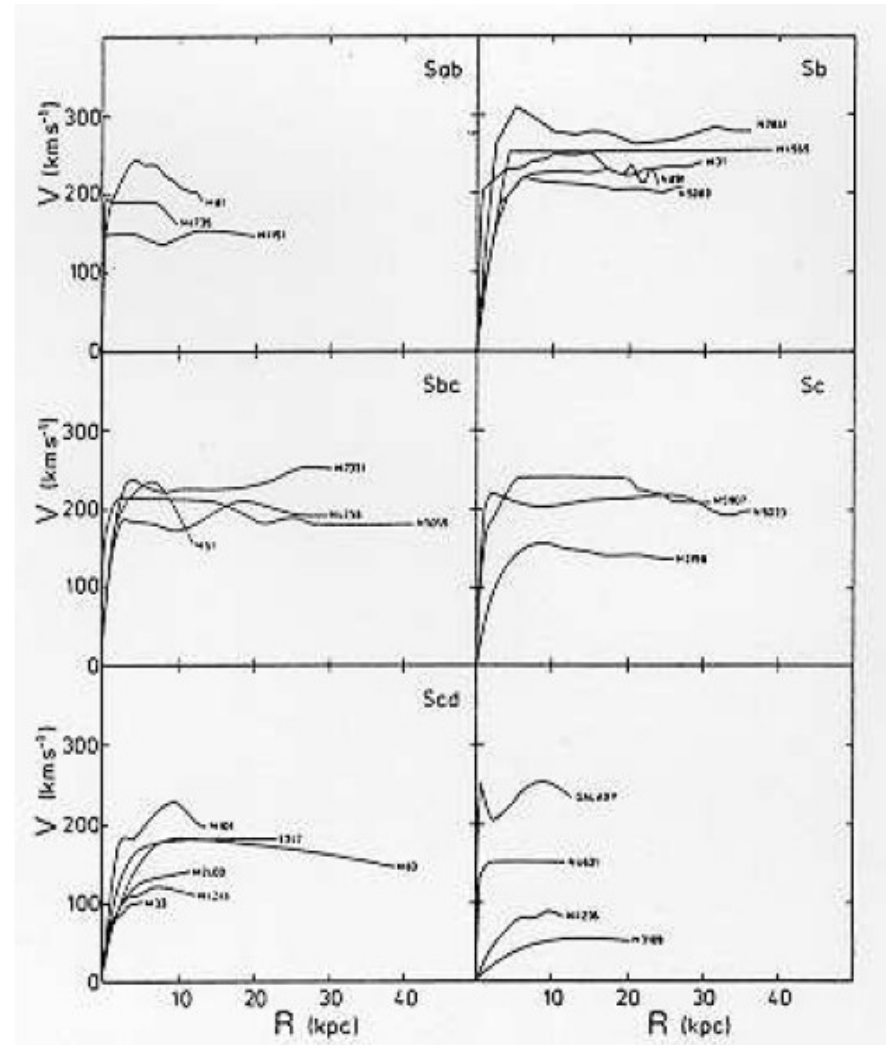


Figura 6.4: Curvas de rotação obtidas com o HI.

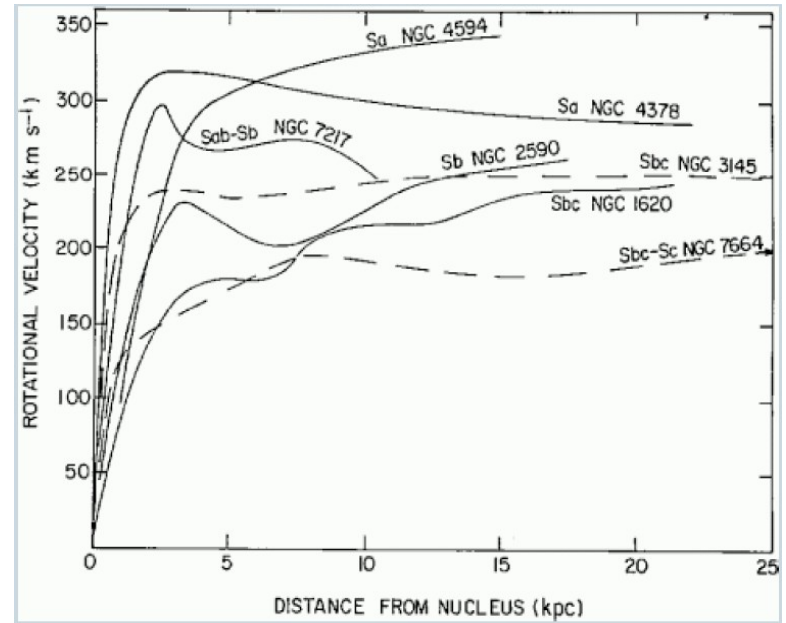
# A rotação das espirais

- Implicações de uma curva de rotação constante para a massa da galáxia:
  - $M(r)$ : massa dentro do raio  $r$
  - $v_c$  : velocidade circular no raio  $r$
- Para um disco em equilíbrio:

$$GmM(r)/r^2 = m v_c^2(r)/r$$

ou,

$$M(r) = v_c^2 r / G$$



logo, curvas de rotação planas implicam que  $M(r)$  cresce proporcional ao raio  $r$



# A rotação das espirais

- Implicações de uma curva de rotação constante para a massa da galáxia:
  - $M(r)$ : massa dentro do raio  $r$
  - $v_c$  : velocidade circular no raio  $r$
- Para um disco em equilíbrio:

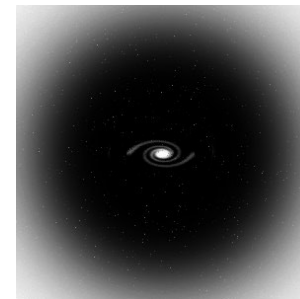
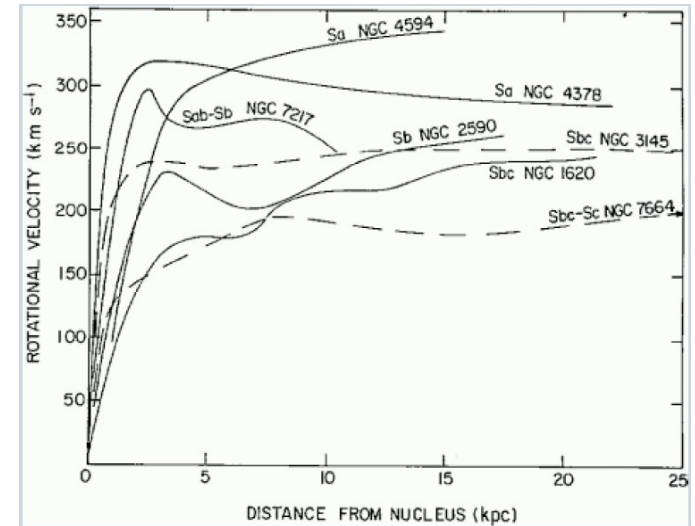
$$GmM(r)/r^2 = m v_c^2(r)/r$$

ou,

$$M(r) = v_c^2 r / G$$

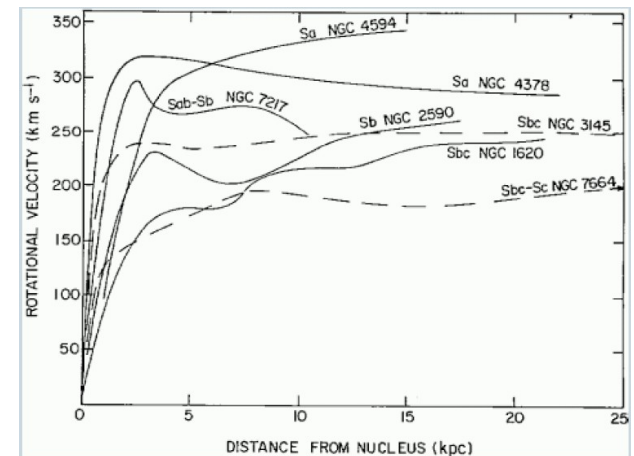
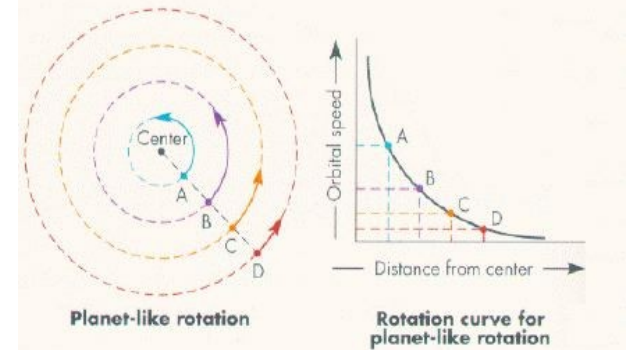
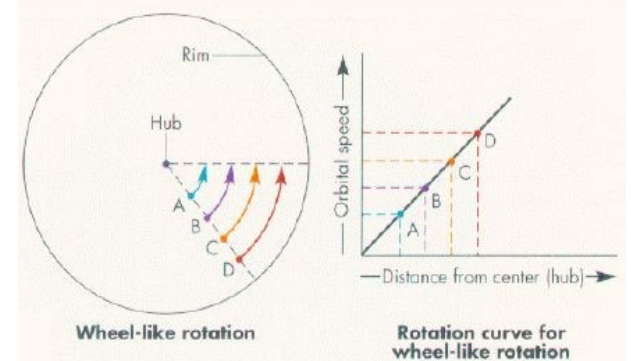
logo, curvas de rotação planas implicam que  $M(r)$  cresce proporcional ao raio  $r$

- Freeman (1970): as curvas de rotação planas são evidência de um halo escuro massivo e esferoidal



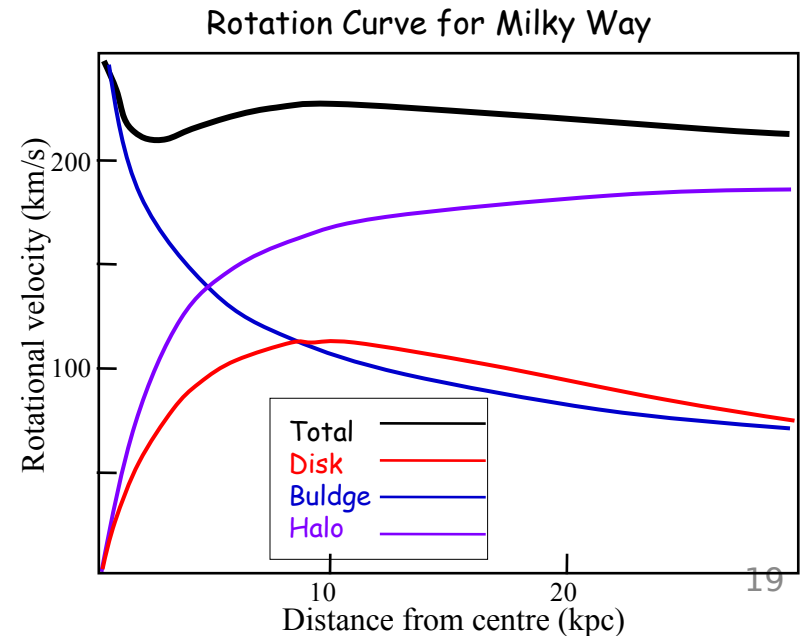
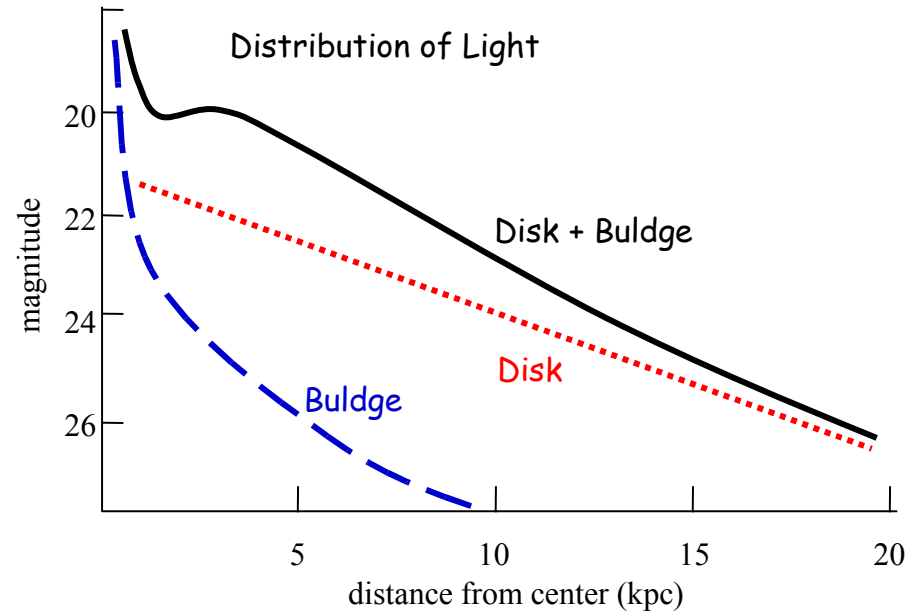
# A rotação das espirais

- Corpo rígido
- Rotação kepleriana
- Observações:



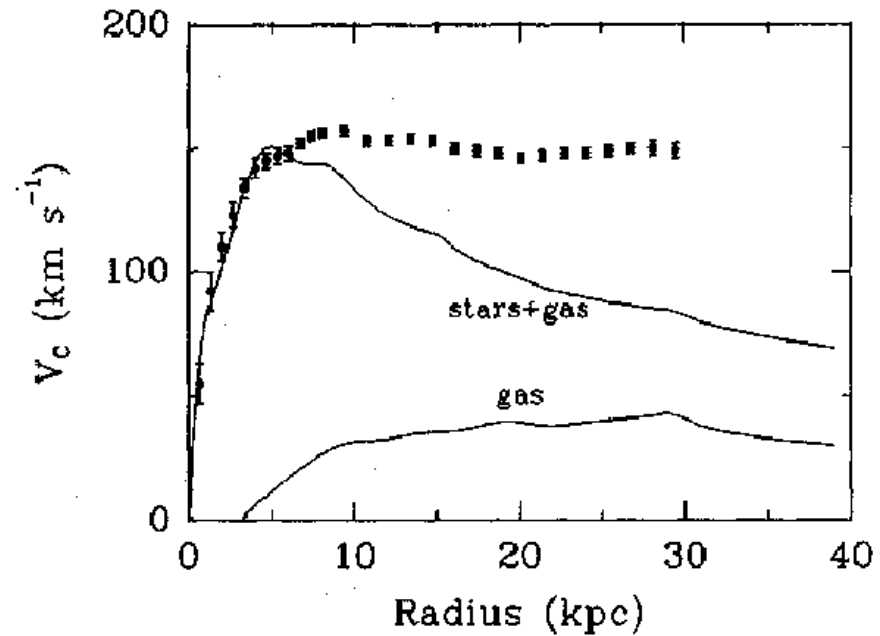
# A rotação das espirais

- Mas as curvas de rotação implicam mesmo em matéria escura?
- Razão Massa-Luminosidade:
  - Sol:  $1 M_S/L_S$
  - estrelas OB da SP:  $0.001 M_S/L_S$
  - estrelas M da SP:  $1000 M_S/L_S$
  - mix estelar local:  $4 M_S/L_{S,B}$
- Aparentemente as galáxias estão girando mais rápido do que se espera pela massa em gás e estrelas!



# A rotação das espirais

- Mas as curvas de rotação implicam mesmo em matéria escura (ME)?
- Via Láctea: não é óbvio que a ME seja necessária dentro do raio do disco estelar
- Já as galáxias anãs ou de baixo brilho superficial parecem ser dominadas por ME em todos os raios!



# A rotação das espirais

- Mas a matéria escura (ME) precisa ser “exótica”?
  - Matéria *bariônica*: a matéria normal, formada por prótons e nêutrons
  - Candidatos bariônicos e seus problemas:
    - “rochas” (cometas, asteróides planetas)
- São corpos com alta abundância de metais: se constituem a ME, esta deve apresentar alta metalicidade, mas isso entraria em contradição com as teorias de evolução química das galáxias

- restos da evolução estelar (anãs brancas, estrelas de nêutrons, buracos negros)

\* estudo de pulsares indicam que 1 estrela de nêutrons se forma a cada  $\sim 30$  anos na Galáxia

\* se a idade da galáxia é  $t_G \sim 13$  bilhões de anos e as estrelas de nêutrons são produzidas a uma taxa constante  $\nu$ , o número esperado delas na Galáxia é  $\nu t_G \sim 5 \times 10^8$

\* número esperado de anãs brancas:  $5 \times 10^9$

\* número esperado de buracos negros: menor que o de estrelas de nêutrons

Não existem anãs brancas, estrelas de nêutrons e buracos negros em número suficiente para explicar a matéria escura

# A rotação das espirais

- Candidatos bariônicos e seus problemas:
  - anãs marrons (júpiteres):  $M \ll 0.1 M_{\odot}$   
há limites no número impostos pela emissão infravermelha e pelos efeitos de microlentes: parecem não existir em número suficiente
  - nuvens frias de HI?
- Em geral supõe-se que a ME deva ser constituída por partículas “exóticas”: axions, neutralino, neutrinos massivos, etc...

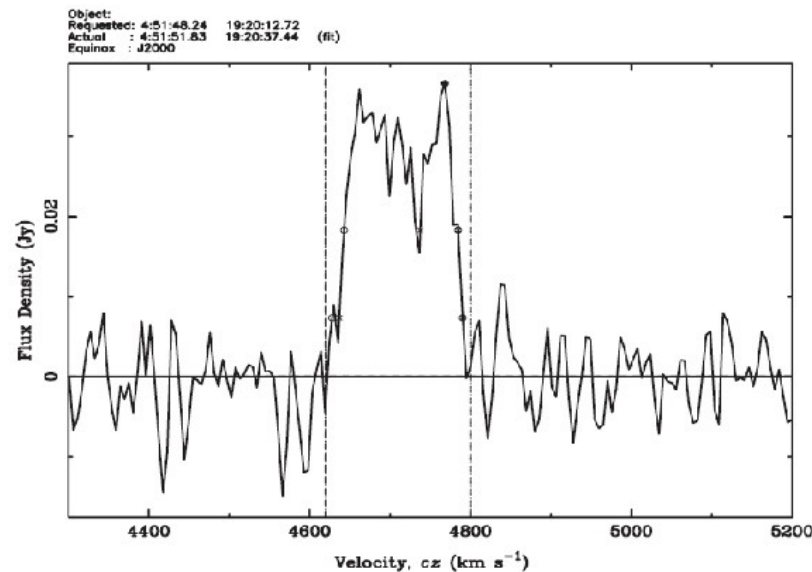
# A relação de Tully-Fisher

- As espirais obedecem a uma relação empírica entre a luminosidade e a largura da linha de emissão de 21 cm:

$$L \propto \Delta V_{corr}^\alpha = \left( \frac{\Delta V_{obs}}{\sin i} \right)^\alpha$$

com  $\alpha \approx 4$

- $\Delta V$  é a largura da linha de 21 cm e  $i$  é a inclinação da galáxia



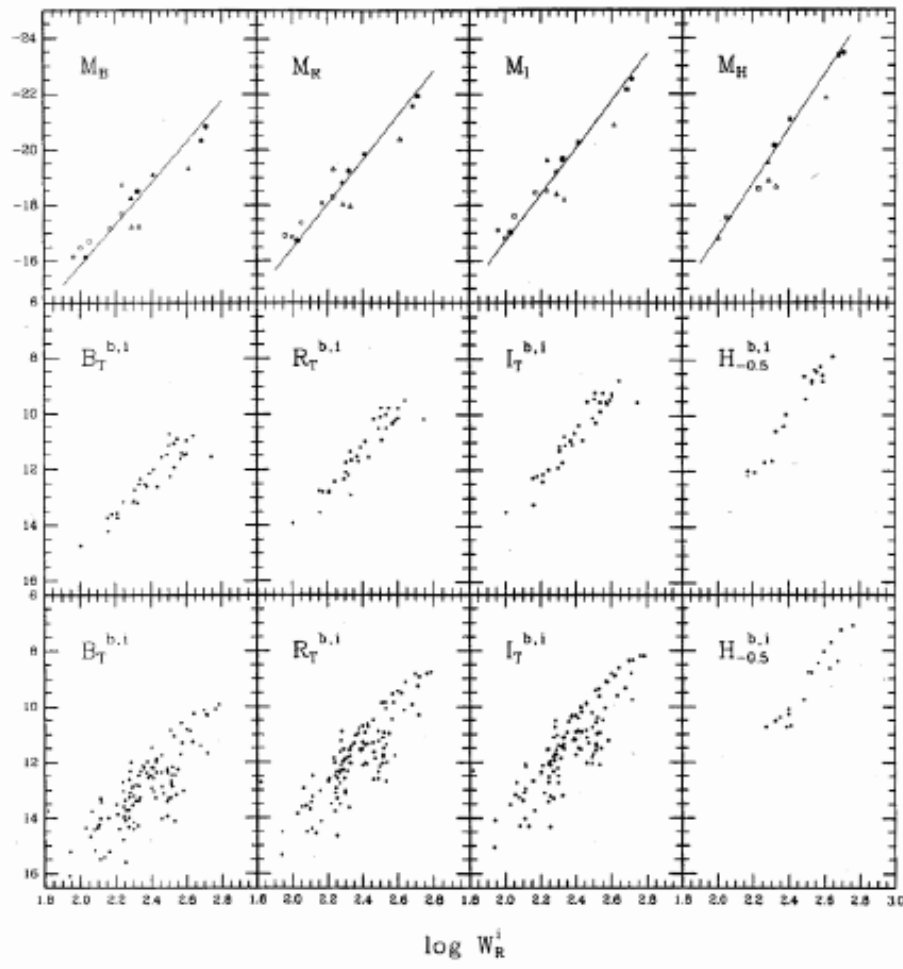
# A relação de Tully-Fisher

$$L \propto \Delta V_{corr}^\alpha = \left( \frac{\Delta V_{obs}}{\sin i} \right)^\alpha$$

- Correção pela inclinação da galáxia:  
i = 0: galáxia vista de face:  $\Delta V_{corr} = 0$   
i = 90°: galáxia vista de lado:  $\Delta V_{corr} = \Delta V_{obs}$



# A relação de Tully-Fisher



Funciona melhor  
no IV que no ótico

**Figura 9.3:** Relação de Tully-Fisher nas bandas B, R, I e H para o Grupo Local (topo), membros do aglomerado de Ursa Major (centro) e membros do aglomerado de Virgo (em baixo). Note que a inclinação da relação aumenta e a dispersão diminui conforme se vai para comprimentos de onda maiores.

# A relação de Tully-Fisher

- Base física:
  - teorema do virial:  $V^2 \propto M/R = (M/L) L/R$
  - brilho superficial:  $\Sigma \propto L/R^2$
  - daí,  $L \propto (M/L)^{-2} \Sigma^{-1} V^4$logo, se a razão  $M/L$  e o brilho superficial forem aproximadamente constantes, tem-se a relação de Tully-Fisher
- Esta relação é muito útil como indicador de distância das galáxias espirais

# Exercícios:

1. Determine  $\rho_0$  para o modelo de disco fino com os parâmetros para gás e poeira, disco fino e disco grosso.
2. Usando a relação de Tully-Fisher, estime a distância relativa entre os aglomerados de Virgo e Ursa Major (ver fig.).
3. Supondo que o Sol tem 4.5 bilhões de anos, calcule sua idade em anos galácticos, supondo que ele está a 8.5 kpc do centro e viaja a 220 km/s.

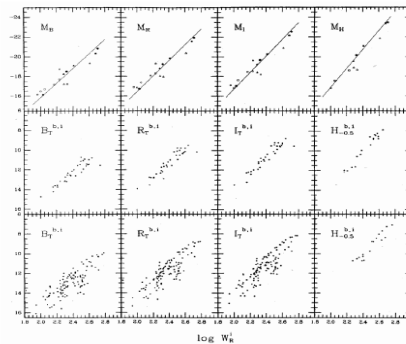


Figura 9.3: Relação de Tully-Fisher nas bandas B, R, I e H para o Grupo Local (topo), membros do aglomerado de Ursa Major (centro) e membros do aglomerado de Virgo (em baixo). Note que a inclinação da relação aumenta e a dispersão diminui conforme se vai para comprimentos de onda maiores.