

# Halos Triaxiais e a Razão Axial de Galáxias Espirais

Rubens Eduardo Garcia Machado  
Prof. Dr. Ronaldo Eustáquio de Souza

IAG-USP

20 de abril de 2006

# Conteúdo

- 1 Introdução
- 2 Amostra de Galáxias
- 3 Medidas
- 4 Análise e Resultados
- 5 Fusões de Elipsóides Homogêneos
- 6 Conclusões





# Halos das galáxias espirais

- os discos das galáxias espirais são **circulares**?
  - os halos de matéria escura são **esféricos**?
- 
- um halo não-esférico deve influenciar a dinâmica do disco
  - se o potencial gravitacional dos halos for assimétrico, dificilmente os discos seriam circulares

# Halos das galáxias espirais

- os discos das galáxias espirais são **circulares**?
- os halos de matéria escura são **esféricos**?
- um halo não-esférico deve influenciar a dinâmica do disco
- se o potencial gravitacional dos halos for assimétrico, dificilmente os discos seriam circulares

## Como avaliar a forma dos halos?

Usamos como indicador o formato dos discos.

**disco não-circular → halo não-esférico**

# Elipsóides

- **oblato**: um plano circular e um eixo menor



- **prolato**: um plano circular e um eixo maior



- **triaxial**: tem os três eixos diferentes  $1 > p > q$



# Elipsóides

- **oblato**: um plano circular e um eixo menor



- **prolato**: um plano circular e um eixo maior



- **triaxial**: tem os três eixos diferentes  $1 > p > q$

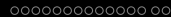
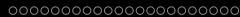
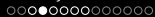


galáxias espirais: oblato ou triaxial?

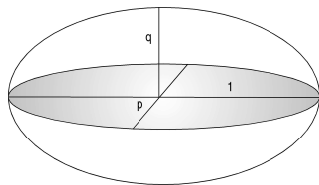
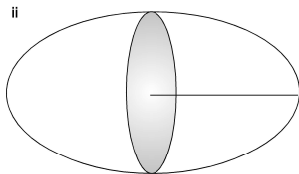
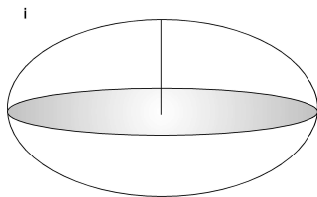
modelo oblato: “equador” circular ( $p=1$ )

modelo triaxial: “equador” elíptico ( $p<1$ )

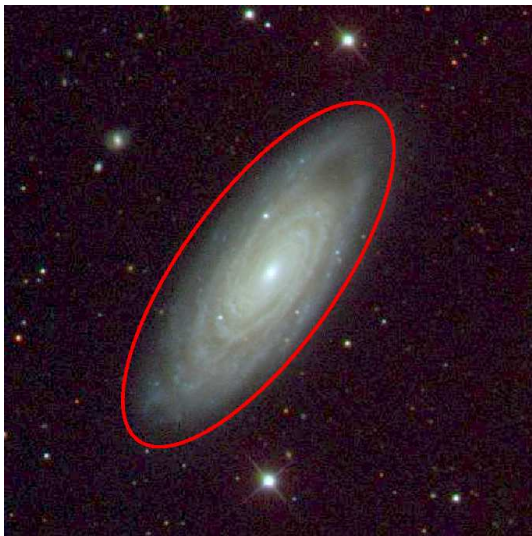




# Elipsóides oblato, prolato e triaxial



# isofota elíptica





# razão axial aparente

- galáxias orientadas aleatoriamente segundo ângulos  $\theta$  e  $\phi$
- única grandeza mensurável é a **razão axial aparente  $b$**
- formato intrínseco do elipsóide:  $p$  e  $q$
- orientação espacial aleatória:  $\theta$  e  $\phi$
- projeção no plano do céu  $\implies b$

# razão axial aparente

$$b = \sqrt{\frac{(j+l) \mp [(j-l)^2 + 4k^2]^{1/2}}{(j+l) \pm [(j-l)^2 + 4k^2]^{1/2}}}$$

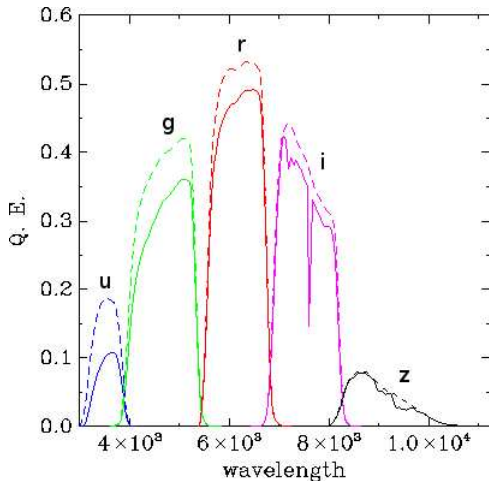
onde

$$j \equiv \frac{1}{p^2} \sin^2 \theta + \frac{1}{q^2} \cos^2 \theta \cos^2 \phi + \frac{1}{p^2 q^2} \cos^2 \theta \sin^2 \phi$$

$$k \equiv \left( \frac{1}{p^2 q^2} - \frac{1}{q^2} \right) \cos \theta \sin \phi \cos \phi$$

$$l \equiv \frac{1}{q^2} \sin^2 \theta + \frac{1}{p^2 q^2} \cos^2 \theta$$

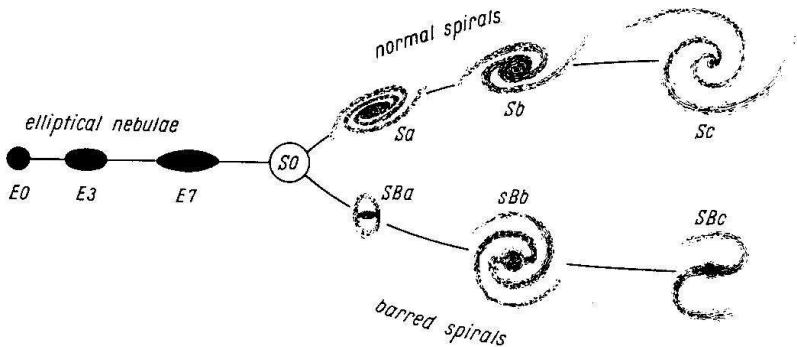
# Sloan Digital Sky Survey



# Classificação Morfológica

- classificação pioneira de Wolf (1908): meramente descritiva
- classificação de espirais por Reynolds (1920): uma seqüência de 7 subtipos
- diagrama de diapasão de Hubble (1936): é o esquema que prevalece
- extensões à seqüência de Hubble: de Vaucouleurs (1959) etc

# Hubble, 1936





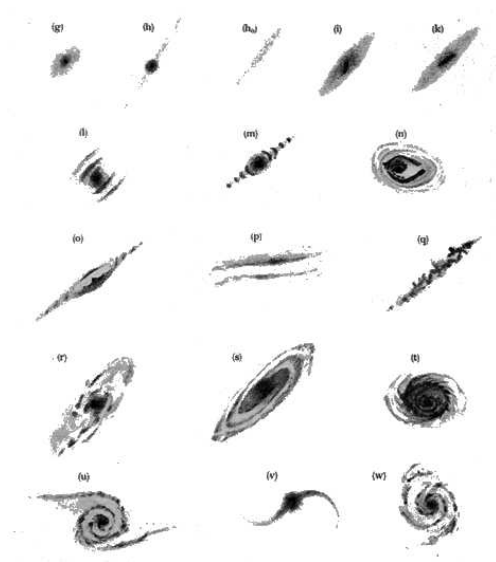
# Classificação Morfológica de Hubble

## critérios de classificação das espirais

- 1 a abertura dos braços espirais
- 2 o grau de resolução dos braços
- 3 o tamanho relativo do bojo

Sa → Sb → Sc

# Wolf, 1908



# Diagrama de Hubble com imagens do SDSS



...





# Seleção da Amostra

**Tabela:** Critérios de seleção da amostra de galáxias.

catálogo do SDSS	SpecPhotoAll
tipo	galáxias
magnitude	$g \leq 16$
redshift	$0,002 \leq z \leq 0,05$
número de objetos resultante	3787

# Seleção da Amostra

**Tabela:** Critérios de seleção da amostra de galáxias.

catálogo do SDSS	SpecPhotoAll
tipo	galáxias
magnitude	$g \leq 16$
redshift	$0,002 \leq z \leq 0,05$
número de objetos resultante	3787

**Tabela:** Morfologia da amostra completa.

tipo morfológico	E	S0	S	Irr	total
número de galáxias	943	531	1900	413	3787

# Elípticas e Lenticulares







# Sb e SBb



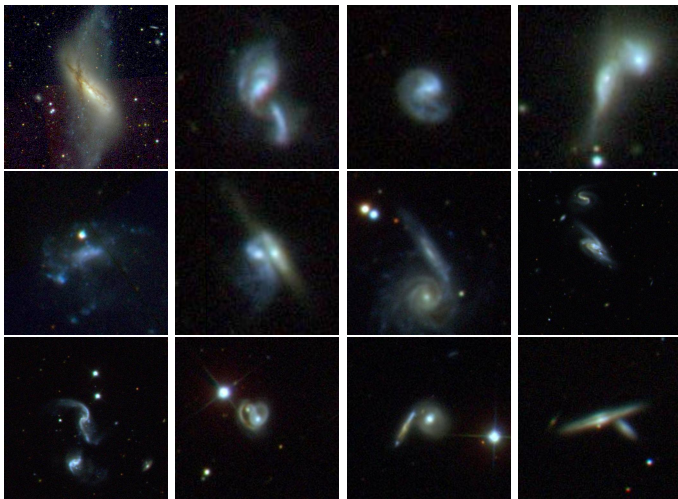
# Sc e SBc



# aproximadamente alinhadas com estrelas



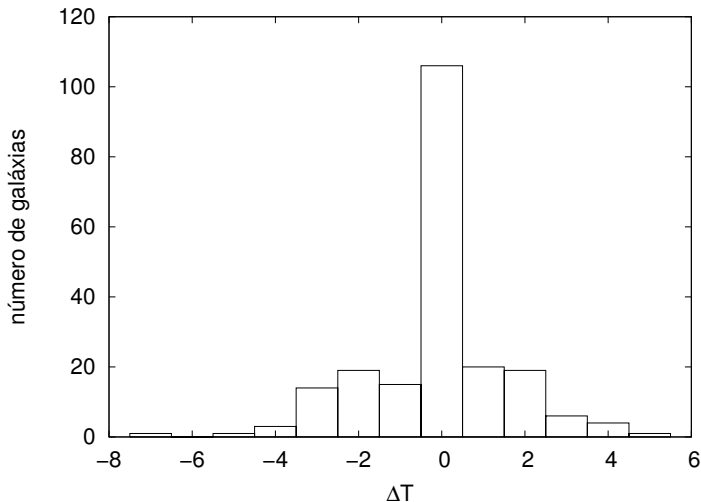
# irregulares, em interação ou com companheiras





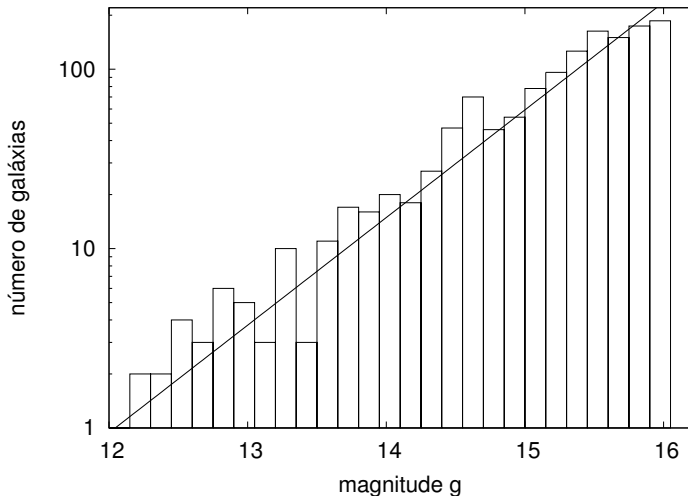
# Verificação da Classificação

Sub-amostra de 200 espirais brilhantes



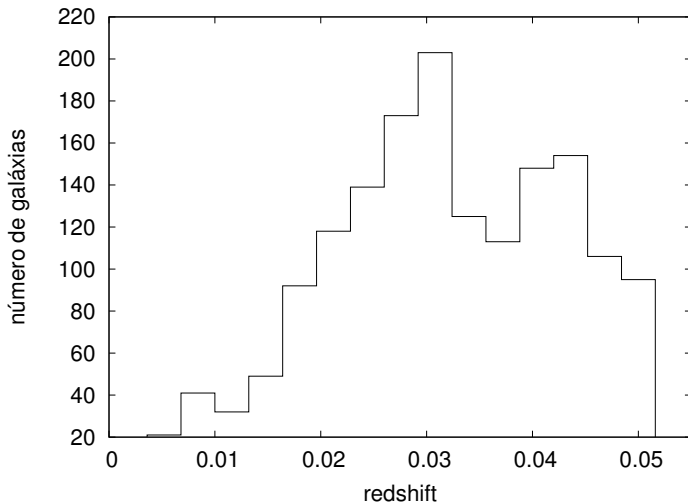
# Características da Amostra

## Completeza



# Características da Amostra

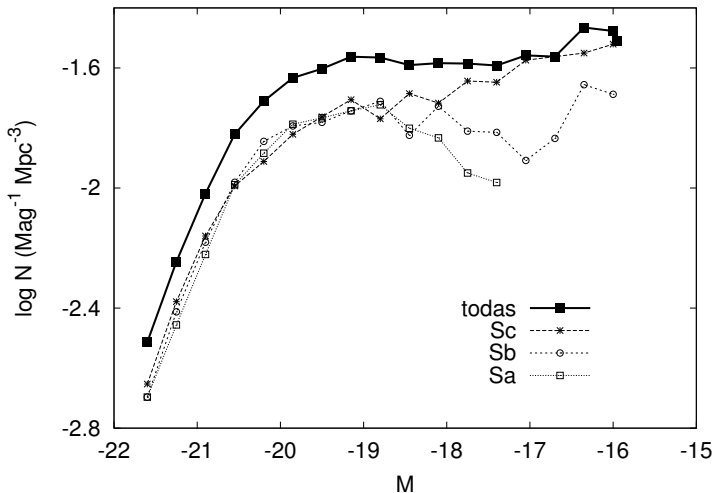
## Distribuição de Redshifts





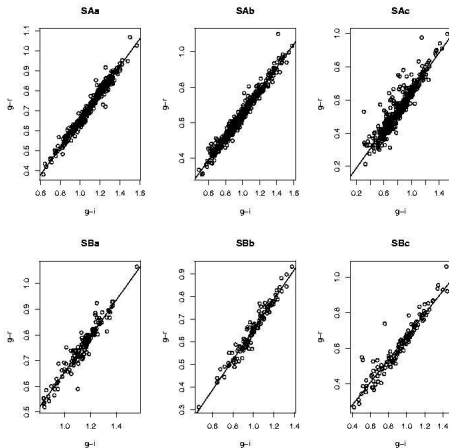
# Características da Amostra

## Função de Luminosidade



# Características da Amostra

## Diagramas cor-cor



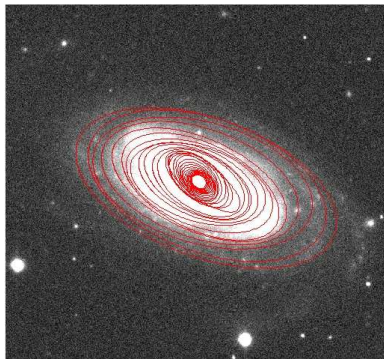
**Tabela:** Dependência morfológica das relações cor-cor.

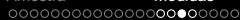
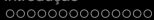
tipo	$C_2$
Sa	$0,680 \pm 0,007$
Sb	$0,656 \pm 0,006$
Sc	$0,581 \pm 0,011$
SBa	$0,701 \pm 0,018$
SBb	$0,670 \pm 0,014$
SBc	$0,638 \pm 0,018$

# Medindo as Razões Axiais Aparentes

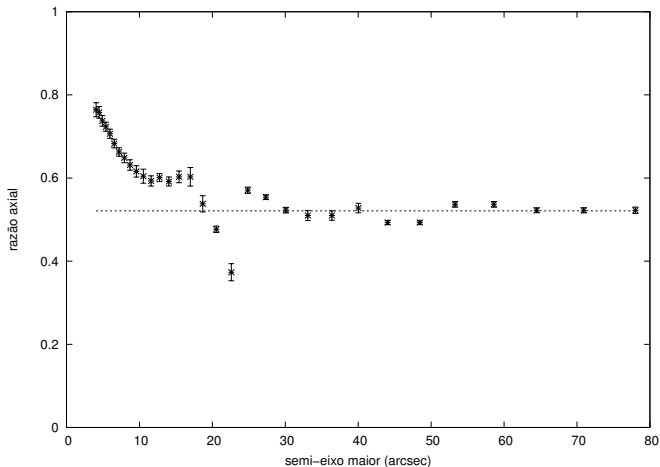
- cada imagem tem  $13,52 \times 8,98$  arcmin (filtro  $r$ )
- ajustes de isofotas elípticas (IRAF > STSDAS > ELLIPSE)
- tem-se razão axial em função da distância ao centro

# exemplo de ajuste de isofotas

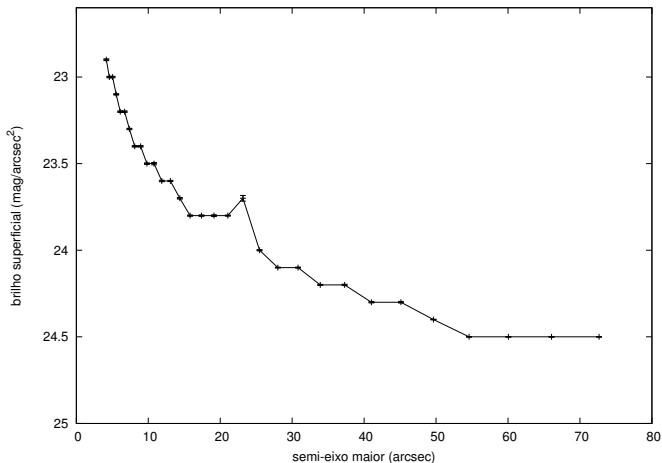




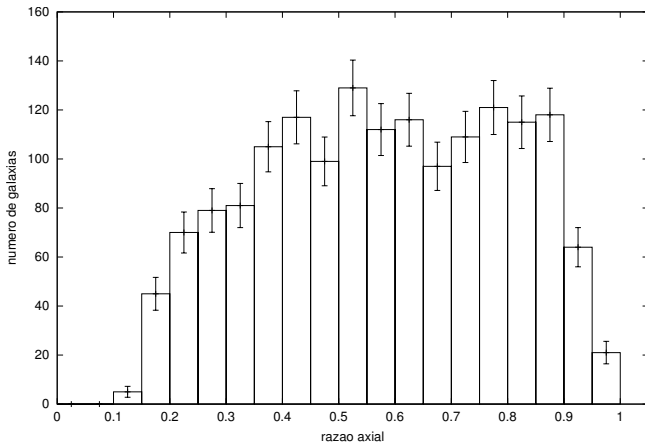
# razão axial em função do semi-eixo maior



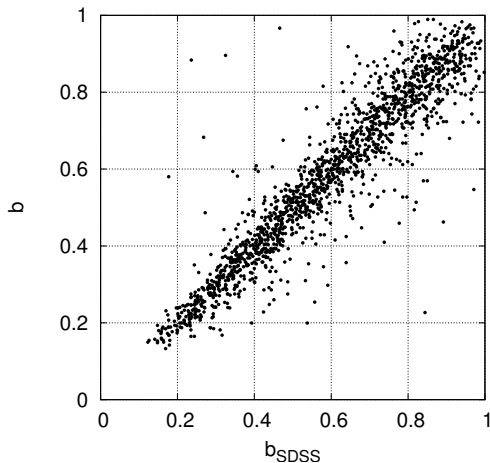
# brilho superficial em função do semi-eixo maior



# distribuição de razões axiais aparentes para 1603 espirais



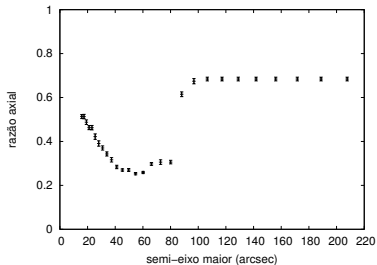
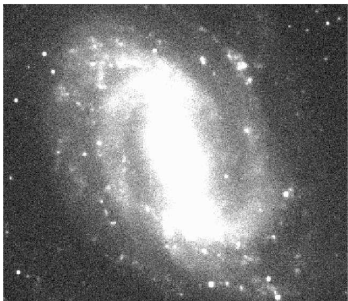
# comparação com as medidas provenientes do SDSS



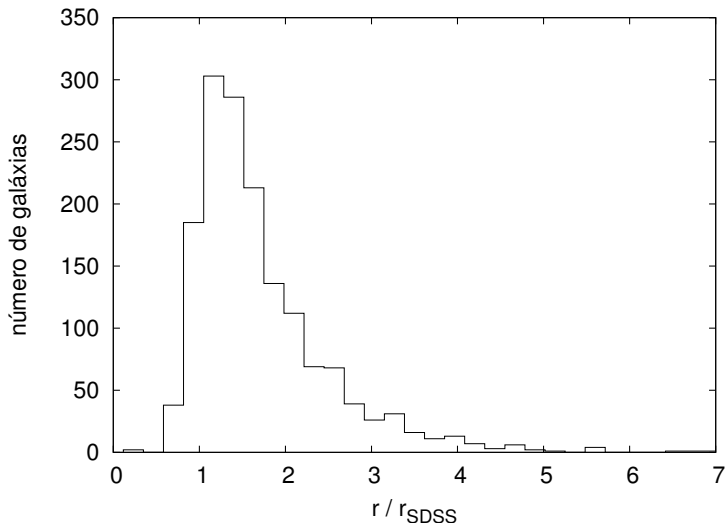
$$b = (0,932 \pm 0,009) \times b_{SDSS} + (0,051 \pm 0,006)$$



# exemplo de discordância: galáxia barrada



# raios nos quais as medidas foram feitas



# Deconvolução das Distribuições

- o problema consiste em inferir  $f(p)$  e  $f(q)$  a partir de  $\varphi(b)$
- método Monte Carlo de busca aleatória de parâmetros
- estimativas iniciais dos quatro parâmetros:

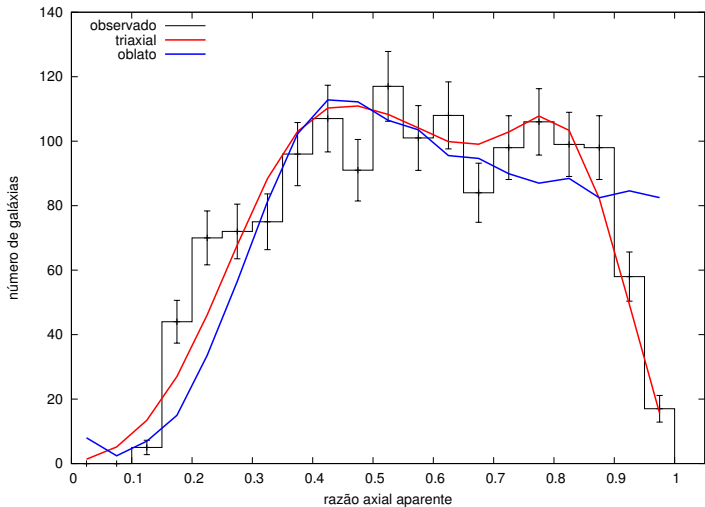
$$\bar{p} = 0,90$$

$$\bar{q} = 0,30$$

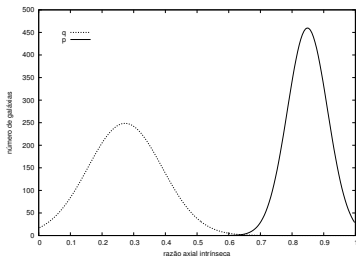
$$\sigma_p = 0,10$$

$$\sigma_q = 0,10$$

# Resultado



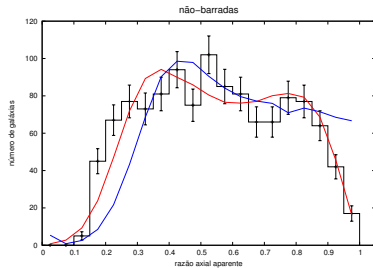
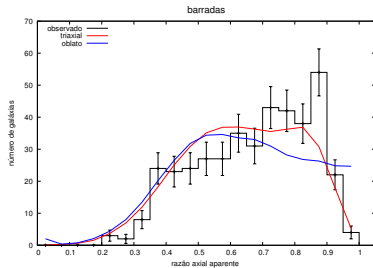
# funções de distribuição intrínsecas

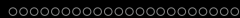
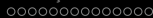


	triaxial	oblato
$\bar{p} =$	<b>0,849</b> $\pm$ 0,063	1
$\bar{q} =$	0,27 $\pm$ 0,12	0,32 $\pm$ 0,11
$\chi^2 =$	4,58 $\pm$ 0,22	21,9 $\pm$ 0,9

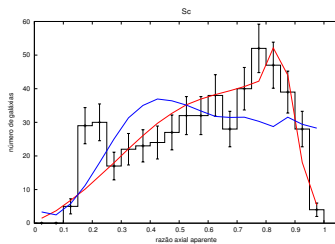
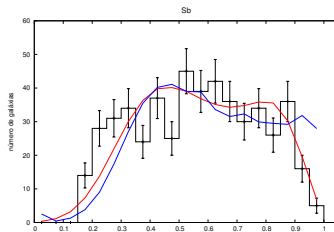
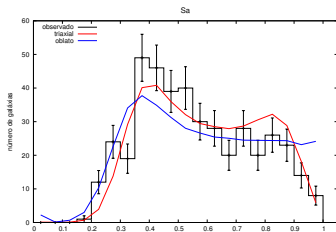


# separadas em barradas e não-barradas





# separadas em Sa, Sb e Sc



# Fusões de Elipsóides Homogêneos

como os halos adquiriram sua estrutura **triaxial**?

- hipótese supersimplificada e exploratória:
- halos triaxiais resultariam da fusão de duas estruturas inicialmente esféricas
- neste halo escuro triaxial se instalaria o disco, assumindo forma elíptica



# Fusões de Elipsóides Homogêneos

como os halos adquiriram sua estrutura **triaxial**?

- hipótese supersimplificada e exploratória:
- halos triaxiais resultariam da fusão de duas estruturas inicialmente esféricas
- neste halo escuro triaxial se instalaria o disco, assumindo forma elíptica

abordagem

- um modelo suficientemente simples para admitir uma abordagem analítica tratável
- supomos que as protogaláxias possam ser aproximadas por elipsóides **homogêneos** compostos por um gás de partículas **não-colisionais**

# Teorema do Virial na forma tensorial

$$W_{ij} + \Omega^2 (I_{ij} - \delta_{i3}I_{3j}) + P_{ij} = 0$$

# Teorema do Virial na forma tensorial

$$W_{ij} + \Omega^2 (I_{ij} - \delta_{ij} I_{33}) + P_{ij} = 0$$

onde as quantidades  $W_{ij}$ ,  $I_{ij}$  e  $P_{ij}$  são os tensores de energia potencial, momento de inércia e pressão:

$$W_{ij} = -\frac{1}{2} \int \rho \Phi_{ij} d^3 \vec{x}$$

$$I_{ij} = \int \rho x_i x_j d^3 \vec{x}$$

$$P_{ij} = \int \sigma_{ij}^2 \rho d^3 \vec{x} = M \sigma_{ij}^2$$

# Teorema do Virial na forma tensorial

$$W_{ij} + \Omega^2 (I_{ij} - \delta_{i3} I_{3j}) + P_{ij} = 0$$

as únicas equações independentes são:

$$W_{11} + \Omega^2 I_{11} + P_{11} = 0$$

$$W_{22} + \Omega^2 I_{22} + P_{22} = 0$$

$$W_{33} + P_{33} = 0$$

que devem ser obedecidas antes e depois da colisão

# Teorema do Virial na forma tensorial

e para um elipsóide triaxial com  $a_1 \geq a_2 \geq a_3$ , resultam em:

$$\frac{3}{10} GMA_1 \frac{a_1}{a_2 a_3} = \frac{1}{5} \Omega^2 a_1^2 + \sigma_{11}^2$$

$$\frac{3}{10} GMA_2 \frac{a_2}{a_1 a_3} = \frac{1}{5} \Omega^2 a_2^2 + \sigma_{22}^2$$

$$\frac{3}{10} GMA_3 \frac{a_3}{a_1 a_2} = \sigma_{33}^2$$

# Fusão Frontal de duas esferas sem rotação

- duas esferas de massa  $M$  e com dispersão de velocidades  $\sigma_o^2$  colidem frontalmente com velocidade relativa  $V$
- no plano ortogonal à colisão, as dispersões de velocidade não se alteram:  $\sigma_o = \sigma_{\perp}$
- na direção paralela a  $V$  a dispersão de velocidades aumenta:

$$\sigma_{\parallel}^2 = \sigma_o^2 + \frac{1}{4} V^2$$

portanto, de uma colisão frontal, resulta um objeto final *prolato*

# Fusão Frontal de duas esferas sem rotação

a elipticidade e do objeto final depende das velocidades (aprox. para  $e$  pequeno):

$$\frac{5 + 3e^2}{5 + e^2} \simeq 1 + \frac{1}{4} \frac{V^2}{\sigma_0^2}$$

# Fusão Frontal de duas esferas sem rotação

a elipticidade  $e$  do objeto final depende das velocidades (aprox. para  $e$  pequeno):

$$\frac{5 + 3e^2}{5 + e^2} \simeq 1 + \frac{1}{4} \frac{V^2}{\sigma_0^2}$$

definindo  $\gamma$  e expressando  $e$  em termos da razão axial intrínseca  $p$ , temos:

$$\gamma \equiv \frac{V}{\sigma_0}$$

$$p \simeq \sqrt{\frac{8 - 6\gamma^2}{8 - \gamma^2}}$$



# Fusão Frontal de duas esferas sem rotação

a elipticidade e do objeto final depende das velocidades (aprox. para e pequeno):

$$\frac{5 + 3e^2}{5 + e^2} \simeq 1 + \frac{1}{4} \frac{V^2}{\sigma_0^2}$$

definindo  $\gamma$  e expressando e em termos da razão axial intrínseca  $p$ , temos:

$$\gamma \equiv \frac{V}{\sigma_0}$$

$$p \simeq \sqrt{\frac{8 - 6\gamma^2}{8 - \gamma^2}}$$

para  $\gamma \simeq 1 \rightarrow p \simeq 0,53$

para  $\gamma \simeq 0,65 \rightarrow p \simeq 0,85$

# Fusão não-frontal de duas esferas

Neste caso, as esferas idênticas sofrem um encontro com parâmetro de impacto  $\beta$

E, para conservar o momento angular, o objeto final deve ter rotação:

$$L = \frac{2}{5}M\Omega(a_x^2 + a_y^2) = MV\beta$$

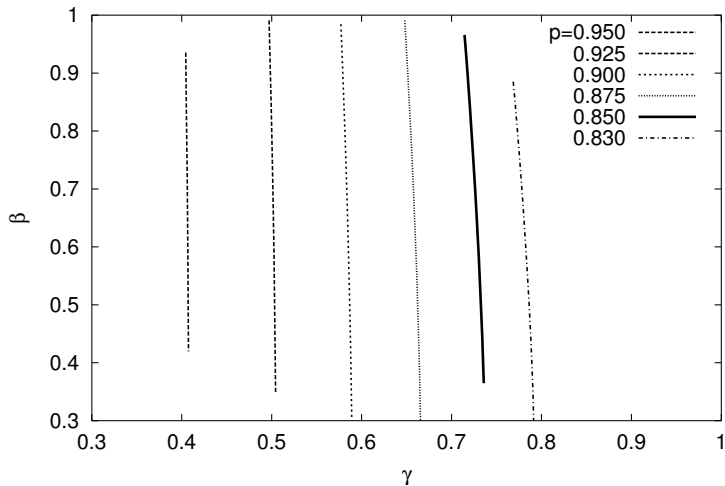
as equações de estrutura ficam:

$$3A_x \frac{a_x}{a_y a_z} = \frac{5}{4} \frac{a_x^2 \beta^2 \gamma^2}{(a_x^2 + a_y^2)^2} + 1 + \frac{\gamma^2}{4}$$

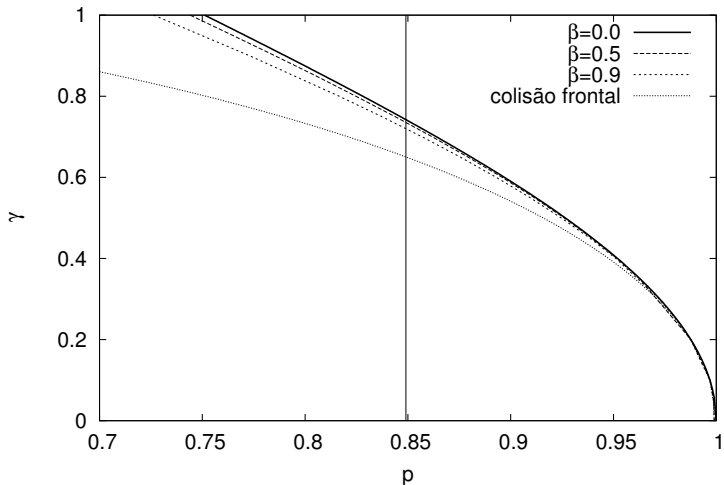
$$3A_y \frac{a_y}{a_x a_z} = \frac{5}{4} \frac{a_y^2 \beta^2 \gamma^2}{(a_x^2 + a_y^2)^2} + 1$$

$$3A_z \frac{a_z}{a_x a_y} = 1$$

# Fusão não-frontal de duas esferas



# Fusão não-frontal de duas esferas



# Redshift de Formação

para obter a triaxialidade proveniente da análise das imagens

$$p = 0,849 \pm 0,063$$

devemos ter

$$\gamma = 0,74 \pm 0,20$$

# Redshift de Formação

para obter a triaxialidade proveniente da análise das imagens

$$p = 0,849 \pm 0,063$$

devemos ter

$$\gamma = 0,74 \pm 0,20$$

e com dispersões típicas de  $\sigma_o \simeq 200km/s$

$$V_o = 148 \pm 40km/s$$

mas em que época da evolução do universo era típica esta velocidade?

Hoje,  $V \sim 300km/s$  para regiões menores que 1 Mpc

# Redshift de Formação

Na teoria linear de perturbações, a velocidade peculiar na vizinhança de uma região sujeita a aceleração  $\vec{g}$  é:

$$\vec{V} = \frac{2f}{3H\Omega_M} \vec{g}$$

onde  $f = \Omega_M^{3/5}$ . Os parâmetros cosmológicos evoluem com  $z$ :

$$\frac{H(z)}{H_0} = \left[ \Omega_{\Lambda 0} + \Omega_{M0}(1+z)^3 \right]^{1/2}$$

$$\frac{\Omega_M(z)}{\Omega_{M0}} = \frac{(1+z)^3}{\left[ \Omega_{\Lambda 0} + \Omega_{M0}(1+z)^3 \right]}$$

# Redshift de Formação

$$\frac{V_o}{V} = \frac{H(z)}{H_o} \frac{\Omega_M^{2/5}(z)}{\Omega_{Mo}^{2/5}}$$

$$\left(\frac{V_o}{V}\right)^{10} = \Omega_{\Lambda o}(1+z)^{12} + \Omega_{Mo}(1+z)^{15}$$



# Redshift de Formação

$$\frac{V_o}{V} = \frac{H(z)}{H_o} \frac{\Omega_M^{2/5}(z)}{\Omega_{Mo}^{2/5}}$$

$$\left(\frac{V_o}{V}\right)^{10} = \Omega_{\Lambda o}(1+z)^{12} + \Omega_{Mo}(1+z)^{15}$$

e com  $\Lambda$ CDM ( $\Omega_{\Lambda o} = 0,7$  e  $\Omega_{Mo} = 0,3$ )

$$z = 0,69 \pm 0,32$$



# Conclusões

os discos das espirais são elípticos com  $p=0,85$

- o modelo triaxial representa melhor os dados já que
  - é estatisticamente mais significativo
  - e reproduz a observada falta de objetos aparentemente circulares
- a falta de galáxias circulares ocorre para todos os subtipos e tanto para SB quanto SA
- mas a não-circularidade dos discos não difere significativamente entre os tipos
- o último episódio importante de fusão teria ocorrido por volta de  $z=0,7$

FIM