

Halos Escuros de Galáxias

Ronaldo de Souza
(IAG/USP)

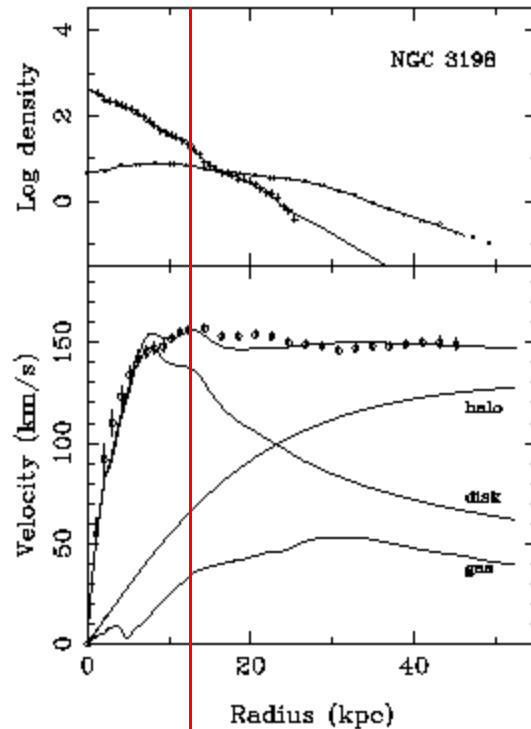
[http://www.astro.iag.usp.br/
~ronaldo/darkhalo/DarkHalo.ppt](http://www.astro.iag.usp.br/~ronaldo/darkhalo/DarkHalo.ppt)

**... mas, observar os bárions
limita o nosso entendimento da
distribuição de massa**

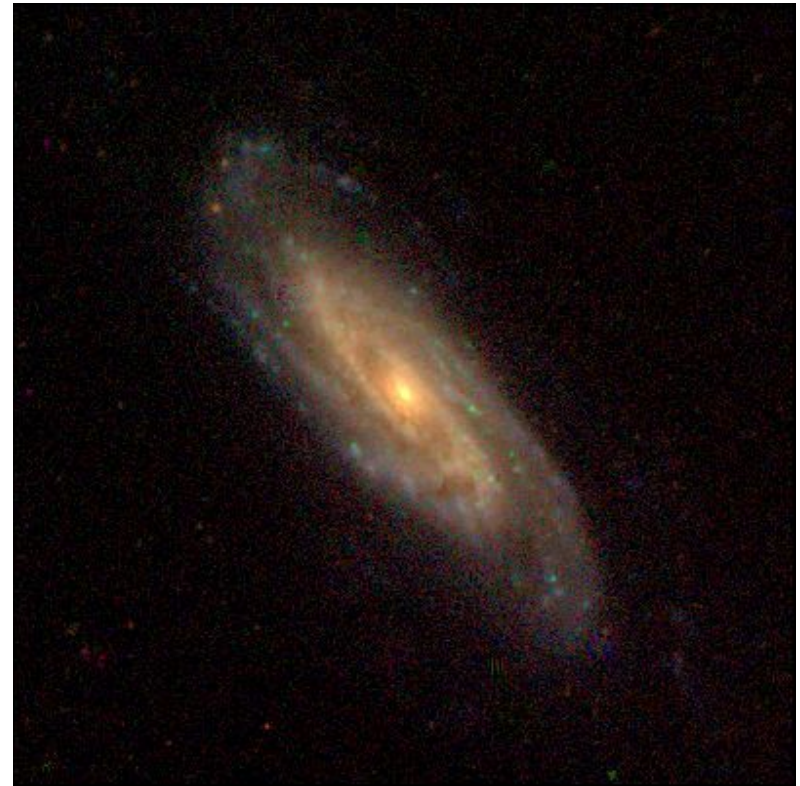
**... como tudo seria tão
diferente se pudéssemos
“ver” a matéria escura !**



NGC 3198 – um ótimo caso de estudo para convencer os mais desconfiados



Raio óptico ~ 11.7 Kpc ($h=0.7$)



$V_{\text{rad}} = 663$ km/s dist = 9.5 Mpc
 $D = 8'.5$ $D = 23.4$ Kpc

O que nos diz a lei de Newton?

$$\frac{GM(r)}{r^2} = \frac{V_{rot}^2}{r}$$

Num halo ~ isotérmico ...

$$\rho \propto \frac{1}{r^2} \quad M \propto R$$

$$V \approx Cte$$

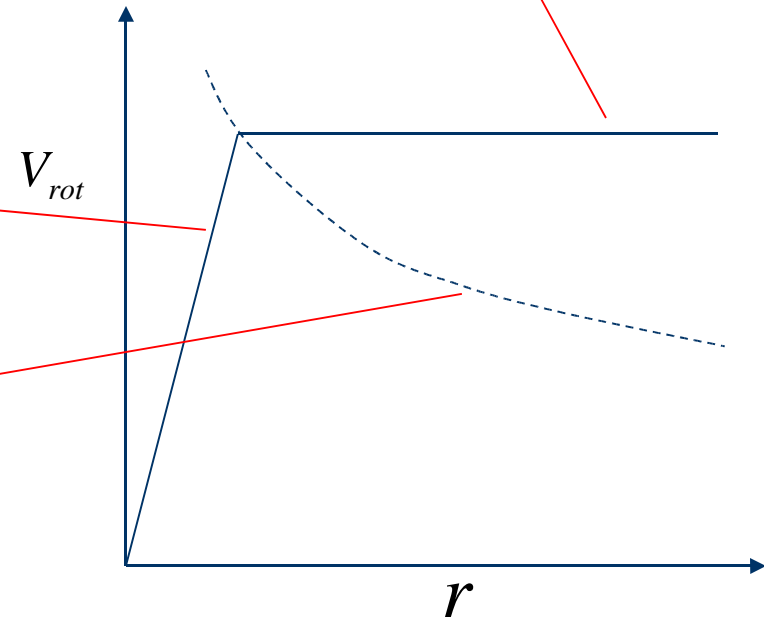
Na região central ...

$$r \approx 0 \quad \rho \approx Cte \quad M \propto r^3$$

$$V_{rot} \propto r$$

Na região Kepleriana ...

$$V_{rot} = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$



Resultados dinâmicos para N3198

Fuchs, 1998

A razão massa luminosidade do disco, baseando-se na sua população estelar, deve ser da ordem de

$$f_B = 2.2-3.5 M_{\text{sun}}/L_{\text{sun}}.$$

Como $B_T = 10.87$ temos $L_B = 6.3 \times 10^9 L_{\text{sun}}$, ou seja $M_* = (1.4 - 2.2) \times 10^{10} M_{\text{sun}}$.

Mas, utilizando a lei de Newton obtemos $M_{\text{tot}} = 2.1 \times 10^{11} M_{\text{sun}}$ dentro do raio de 40 Kpc onde existem dados de velocidade de rotação. Observe que o halo se estende além deste limite!

Qual a natureza desta matéria escura?

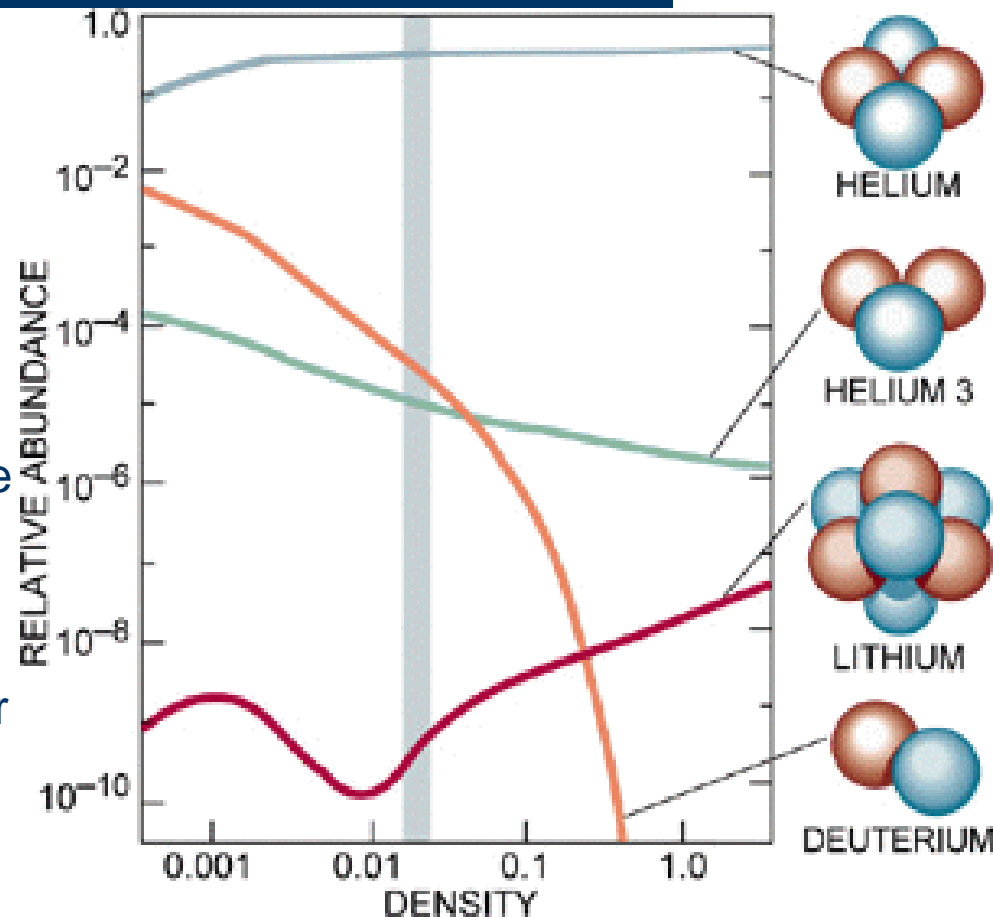
Para reproduzir a abundância dos elementos leves é necessário que a densidade de bárions do Universo seja da ordem de

$$\Omega_b = \frac{\rho_b}{\rho_{crit}} = 0.0224h^{-2}$$

que corresponde aproximadamente à quantidade de bárions que observamos nas galáxias.

Portanto a matéria escura deve ser não bariônica.

$$\Omega_m = \frac{\rho_m}{\rho_{crit}} \cong 0.3$$

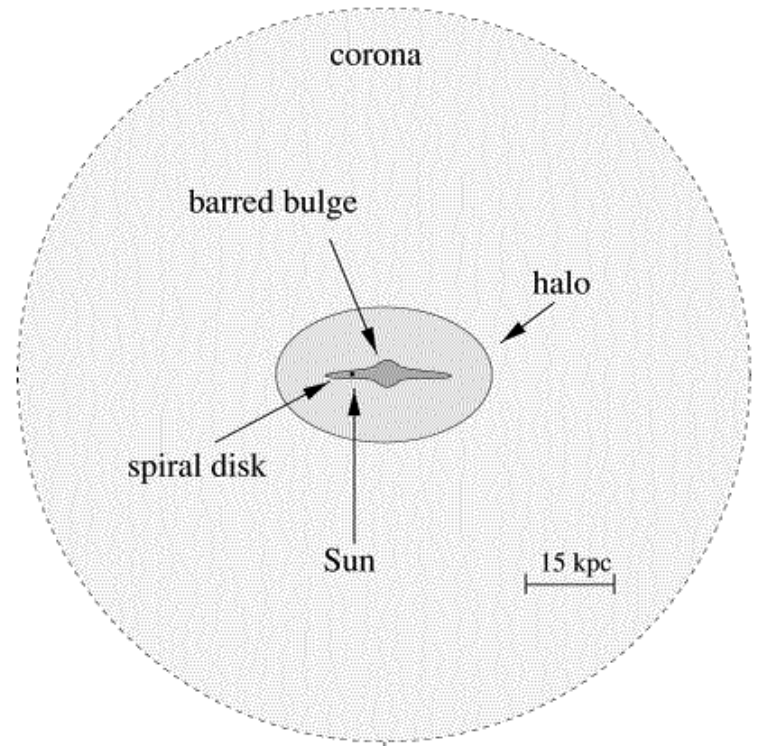


Provável estrutura da Galáxia

Disco + bojo contribuindo com 5% da massa e 98% da luz.

Halo estelar contendo menos de 2% da massa e cerca de 2% da luz.

Halo de matéria escura contendo 95% da massa e não contribuindo para a luminosidade. A sua massa pode ser da ordem de $2 \times 10^{12} M_{\text{sun}}$ e sua extensão da ordem de 200 Kpc (*Wilkinson & Evans*, 1999, MNRAS, 310, 645).



O cenário monolítico

EVIDENCE FROM THE MOTIONS OF OLD STARS THAT THE GALAXY COLLAPSED

O. J. EGGEN, D. LYNDEN-BELL,* AND A. R. SANDAGE

Mount Wilson and Palomar Observatories

Carnegie Institution of Washington, California Institute of Technology

Received May 17, 1962

ABSTRACT

The (U, V, W) -velocity vectors for 221 well-observed dwarf stars have been used to compute the eccentricities and angular momenta of the galactic orbits in a model galaxy. It is shown that the eccentricity and the observed ultraviolet excess are strongly correlated. The stars with the largest excess (i.e., lowest metal abundance) are invariably moving in highly elliptical orbits, whereas stars with little or no excess move in nearly circular orbits. Correlations also exist between the ultraviolet excess and the W -velocity. Finally, the excess and the angular momentum are correlated; stars with large ultraviolet excesses have small angular momenta.

These correlations are discussed in terms of the dynamics of a collapsing galaxy. The data require that the oldest stars were formed out of gas falling toward the galactic center in the radial direction and collapsing from the halo onto the plane. The collapse was very rapid and only a few times 10^8 years were required for the gas to attain circular orbits in equilibrium (i.e., gravitational attraction balanced by centrifugal acceleration). The scale of the collapse is tentatively estimated to be at least 10 in the radial direction and 25 in the Z -direction. The initial contraction must have begun near the time of formation of the first stars, some 10^{10} years ago.

A Galáxia se formou pelo colapso monolítico de um halo gasoso em cerca de 10^8 anos, que corresponde ao tempo dinâmico de cruzamento. A previsão é que o halo estelar não deve apresentar gradiente de composição química.

Formação por acreção fragmentada

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 225:357-379, 1978 October 15
© 1978. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

COMPOSITIONS OF HALO CLUSTERS AND THE FORMATION OF THE GALACTIC HALO

LEONARD SEARLE AND ROBERT ZINN

Hale Observatories, Carnegie Institution of Washington, California Institute of Technology

Received 1978 March 2; accepted 1978 April 21

ABSTRACT

A new method of abundance determination, based upon reddening-independent characteristics of low-resolution spectral scans, has been applied to 177 red giants in 19 globular clusters. Most of these clusters have galactocentric distances exceeding 8 kpc. We find that there is no radial abundance gradient in the cluster system of the outer halo. The distribution over abundance for these outer clusters appears to be independent of galactocentric distance and is nearly identical to that for halo subdwarfs in the solar neighborhood. This distribution is such that the density declines exponentially with increasing metal abundance. The clusters of the outer halo show a broad spread in the color distribution on the horizontal branch, and this property is uncorrelated with metal abundance. In contrast, more tightly bound clusters, in the same range of abundance, show very little dispersion in this property. These facts are all consistent with the hypothesis that the loosely bound clusters of the outer halo have a broader range of age than the more tightly bound clusters and originated in transient protogalactic fragments that continued to fall into dynamical equilibrium with the Galaxy for some time after the collapse of its central regions had been completed.

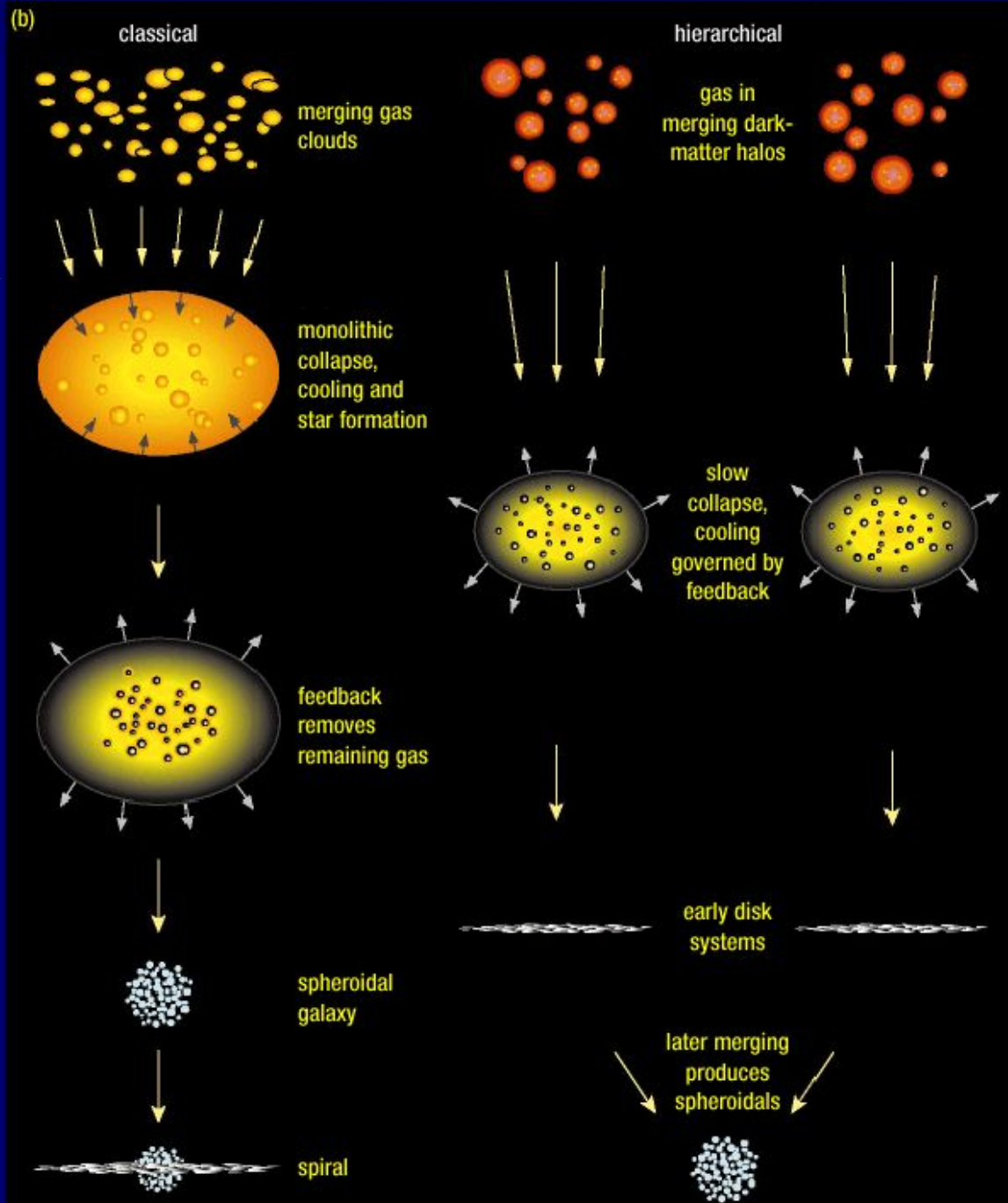
Subject headings: clusters: globular — galaxies: Milky Way — galaxies: structure — stars: abundances — stars: late-type

Agregação prolongada de fragmentos protogalácticos ($\sim 10^9$ anos). Sem gradiente de composição no halo estelar, mas um grande espalhamento de idades e metalicidades.

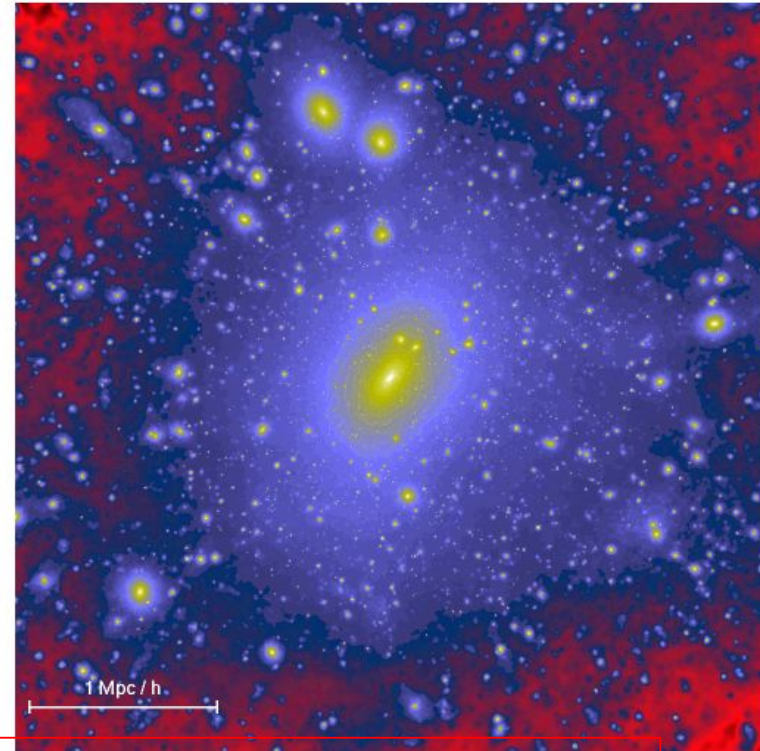
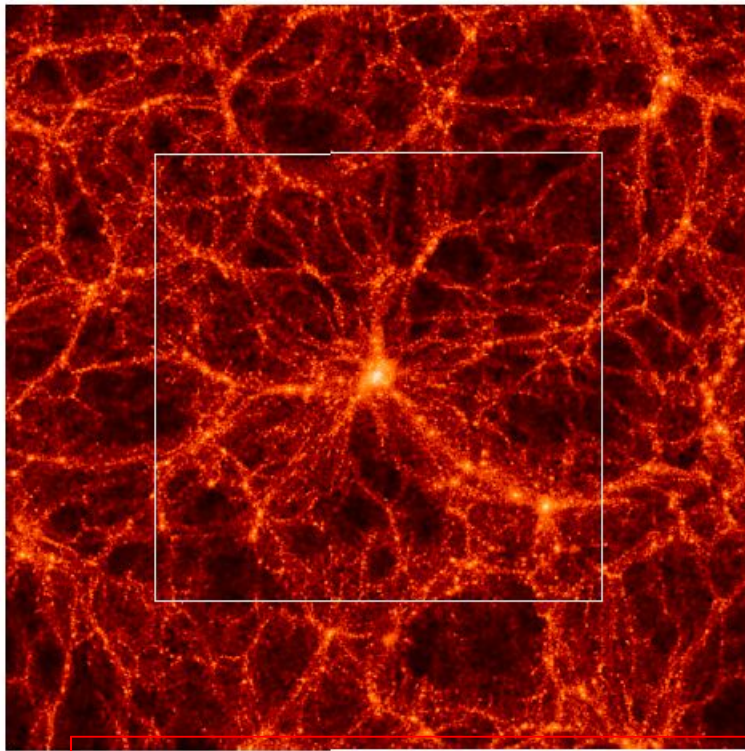
$Z \sim 10 - 20$

Quando ocorreu a formação?

$Z \sim 1 - 10$

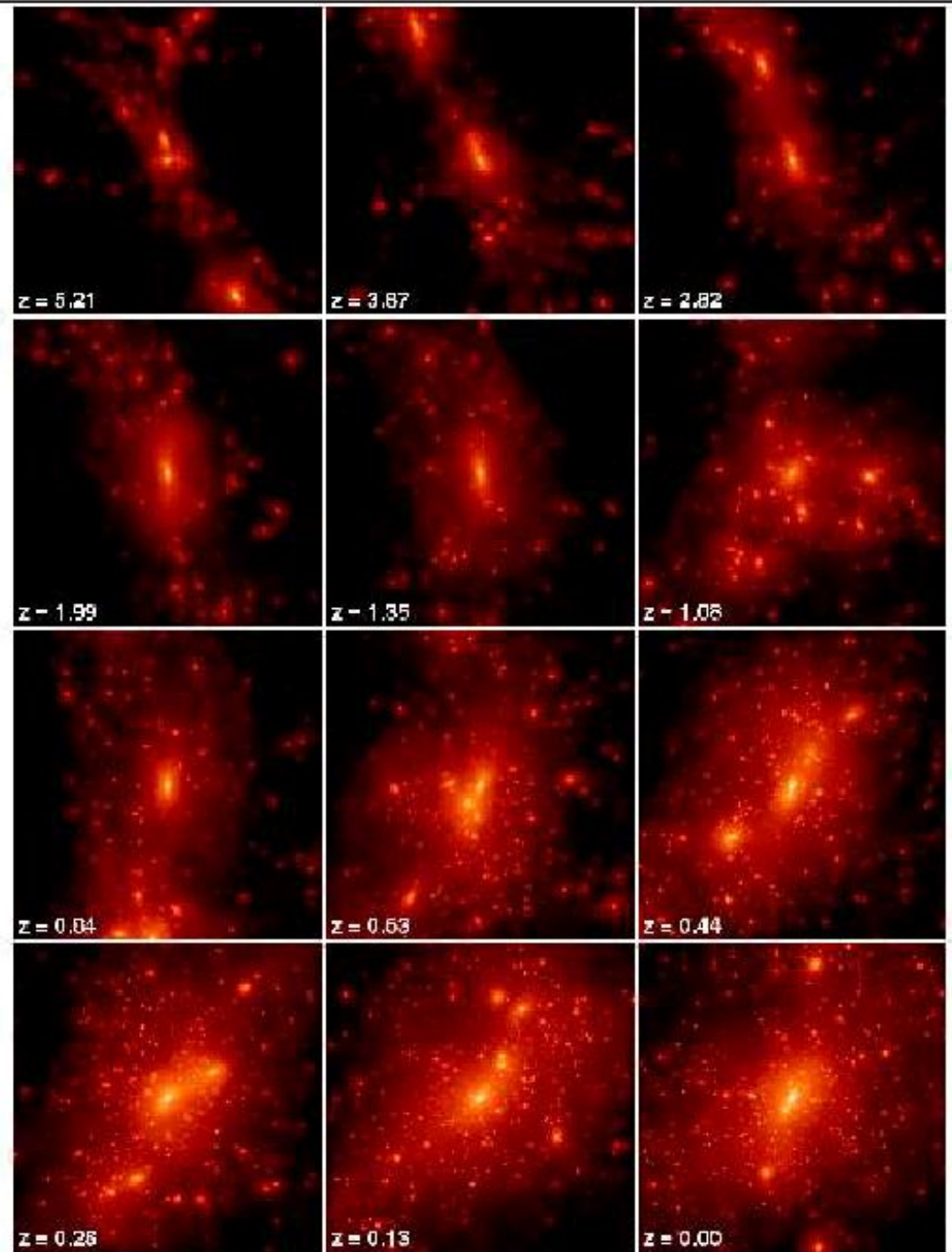


Cenário CDM hierárquico: o paradigma do momento.



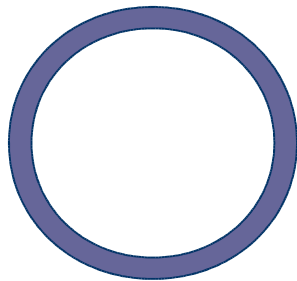
As simulações N-corpos de alta resolução de Springel et al, 2001, MNRAS, 328, 726, mostram o grau de subestrutura que devem ocorrer no interior dos halos escuros.

Um possível cenário de formação do halo de matéria escura da Galáxia no modelo CDM Helmi, White & Springel (2002, astro-ph/0201289)

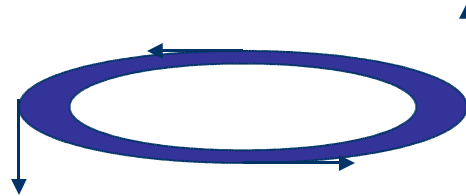


Existem evidências da triaxialidade dos halos de matéria escura ?

- Velocidade não nula ao longo do eixo menor (Rix et al, 1998-2003)



Disco visto de face

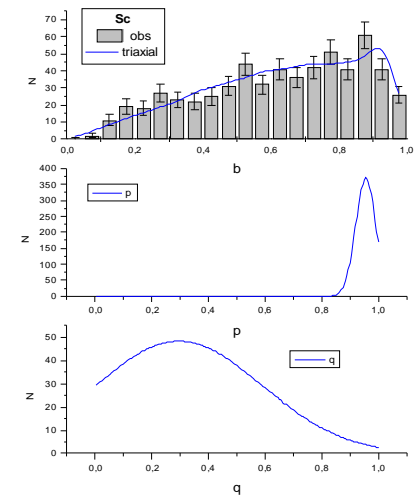
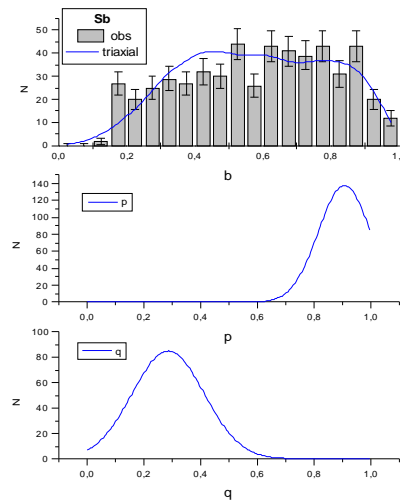
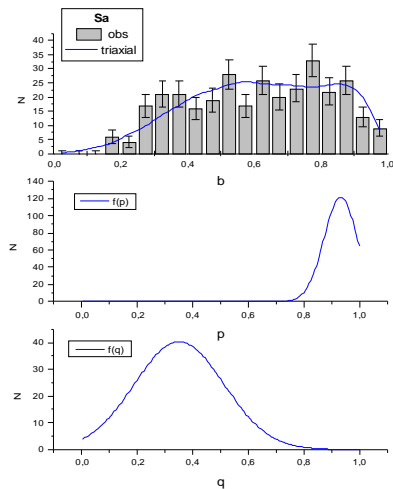
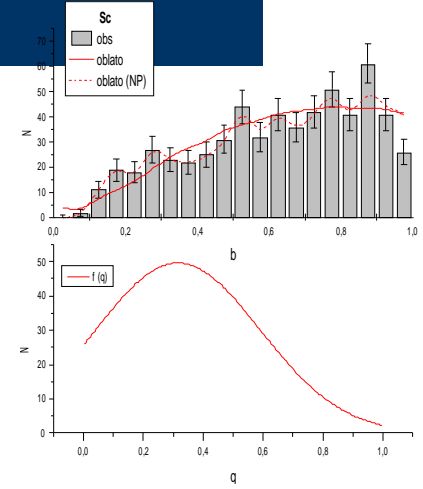
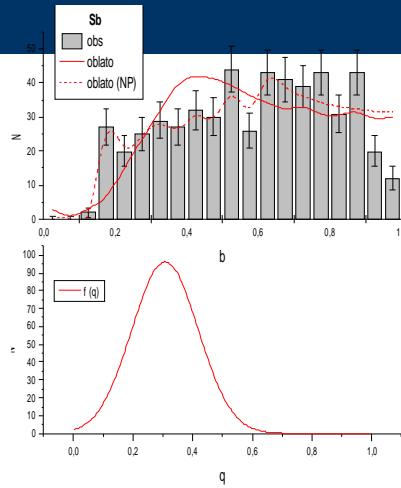
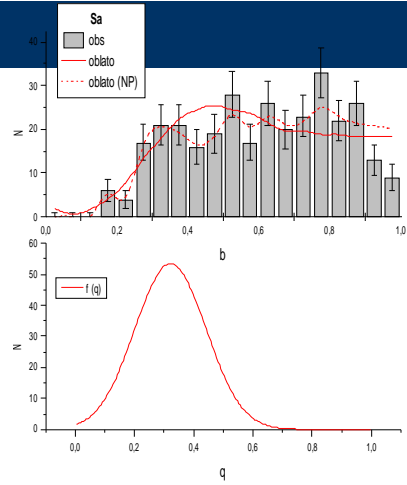


Disco visto inclinado

$$b = \cos i$$

- Como evitar que barras fortes sejam destruídas?
Halos triaxiais estimulam as barras que se tornam persistentes (Gadotti, de Souza, 2003a,b)

Razão axial dos discos de espirais



Os discos não são circulares!

- cerca de 1000 galáxias espirais

do RC3 (*Third Reference Catalogue of Bright Galaxies*)

- limitadas pela magnitude aparente $B < 14$

- separadas em três classes:

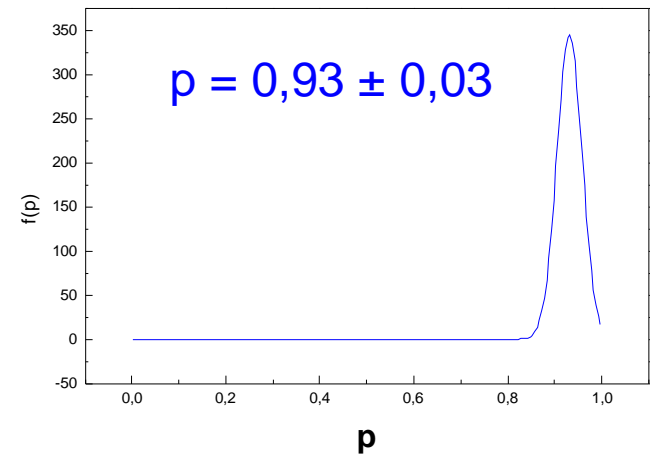
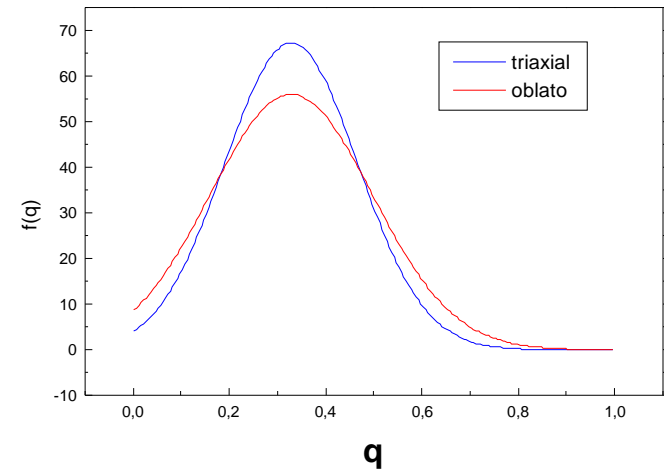
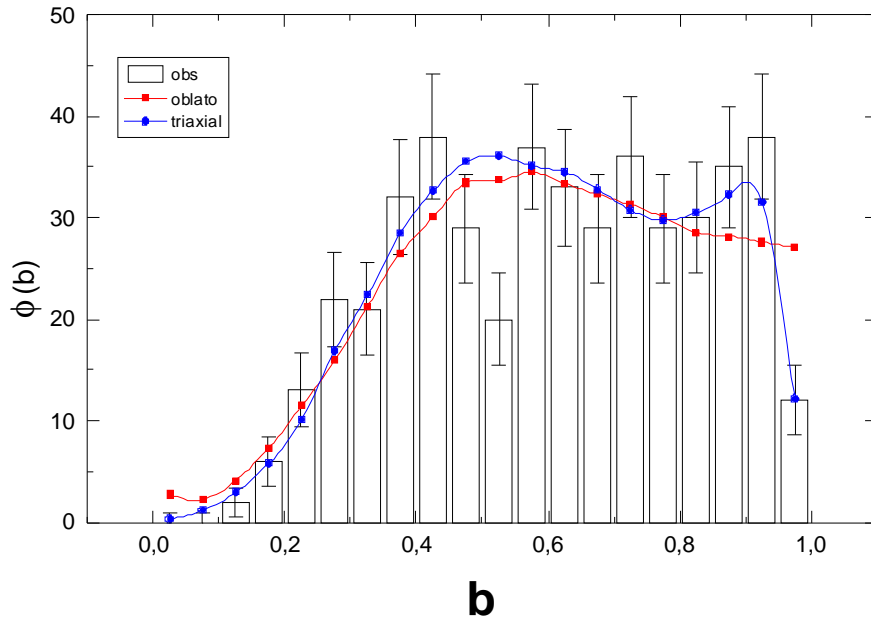
(S0/a+**Sa**+Sab)

(Sab+**Sb**+Sbc)

(Sbc+**Sc**+Scd)

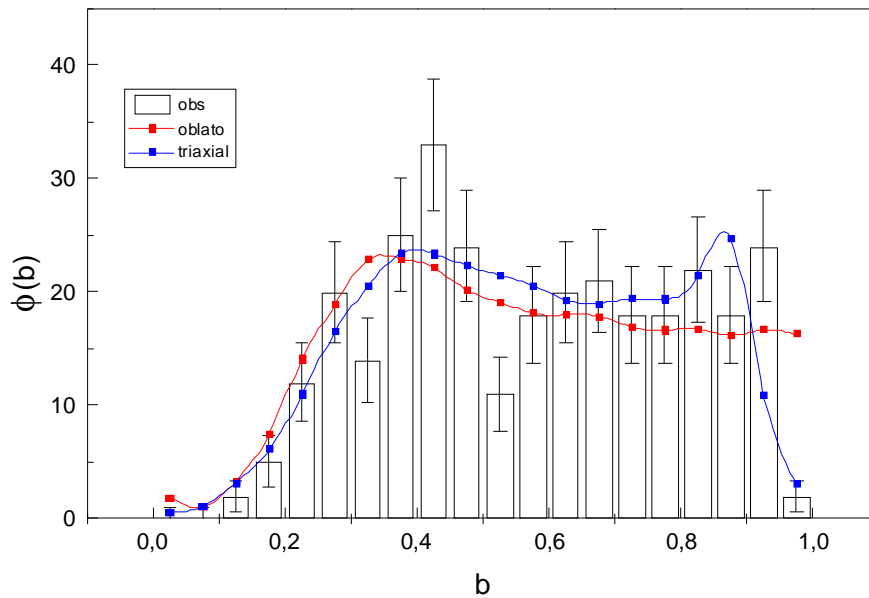
		oblato	triaxial
Sa	$^2 =$	2,456 ± 0,009	1,806 ± 0,006
	p =	1	0,93 ± 0,06
	q =	0,32 ± 0,12	0,35 ± 0,16
Sb	$^2 =$	4,91 ± 0,03	2,72 ± 0,03
	p =	1	0,91 ± 0,09
	q =	0,31 ± 0,11	0,29 ± 0,13
Sc	$^2 =$	2,590 ± 0,002	1,58 ± 0,04
	p =	1	0,95 ± 0,04
	q =	0,31 ± 0,27	0,30 ± 0,29

Resultado das galáxias do projeto SLOAN

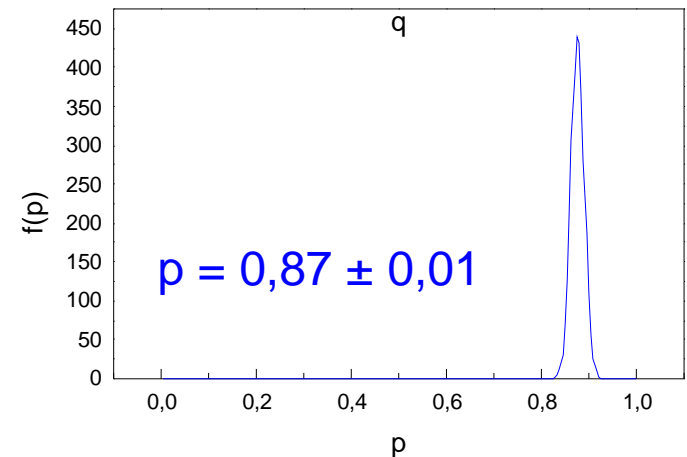
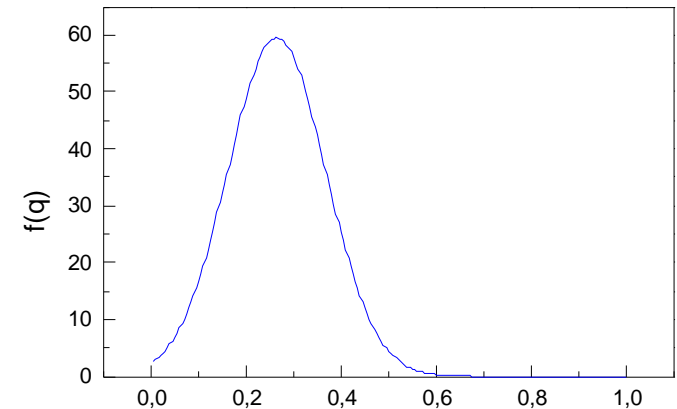


	oblate	triaxial
$\chi^2 =$	$3,00 \pm 0,04$	$1,40 \pm 0,18$
$q =$	$0,33 \pm 0,17$	$0,33 \pm 0,14$

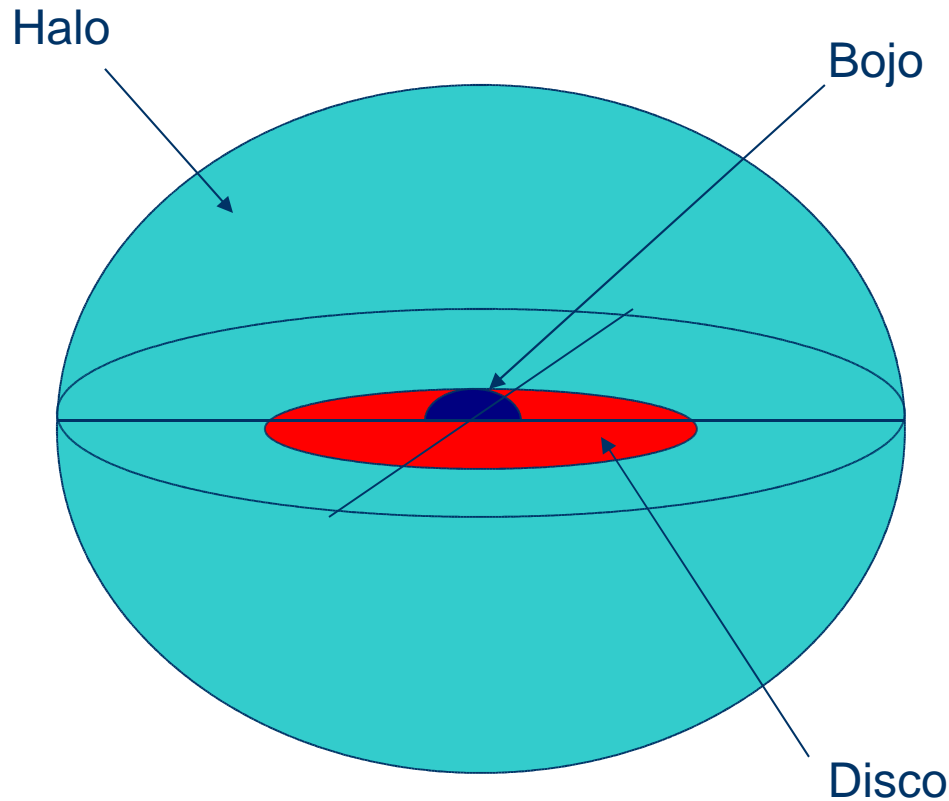
Galáxias não barradas



	oblate	triaxial
$2 =$	$7,7 \pm 0,7$	$1,88 \pm 0,01$
$q =$	$0,25 \pm 0,09$	$0,26 \pm 0,10$



Os halos devem ser triaxiais



A triaxialidade dos atuais halos resultou de um processo de fusão entre dois halos esféricos similares

Que tal modelar os halos de matéria escura como elipsóides homogêneos?

Teorema do Virial tensorial (Chandrasekhar, 1969)

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

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

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

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

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

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

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

Antes e depois da fusão os objetos devem satisfazer a estas condições e conservar a energia e momentum angular incluindo as condições orbitais.

$$\frac{3}{10} GMA_x \frac{a_x}{a_y a_z} = \frac{1}{5} \Omega^2 a_x^2 + \sigma_{xx}^2$$

$$\frac{3}{10} GMA_y \frac{a_y}{a_x a_z} = \frac{1}{5} \Omega^2 a_y^2 + \sigma_{yy}^2$$

$$\frac{3}{10} GMA_z \frac{a_z}{a_x a_y} = \sigma_{zz}^2$$

Onde A_x , A_y e A_z são as constantes de estrutura do elipsóide

A fusão frontal gera um ...

... halo final que é um elipsóide prolato

$$\frac{A_{//}}{A_{\perp}} \frac{1}{1 - e^2} = 1 + \frac{1}{4} \frac{V^2}{\sigma_0^2}$$

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

$$b = \frac{a_{\perp}}{a_{//}} \approx \sqrt{\frac{1 - \frac{6}{8} \gamma^2}{1 - \frac{1}{8} \gamma^2}}$$

Aproximação para pequenas elipticidades

Tipicamente σ é da ordem de 200 km/s para as galáxias e encontros com $\gamma=1$ resultariam em $b=0.53$. Para reproduzir a razão axial $b=0.93$ seria necessário encontros com $\gamma=0.46$.

... e a fusão não frontal ...

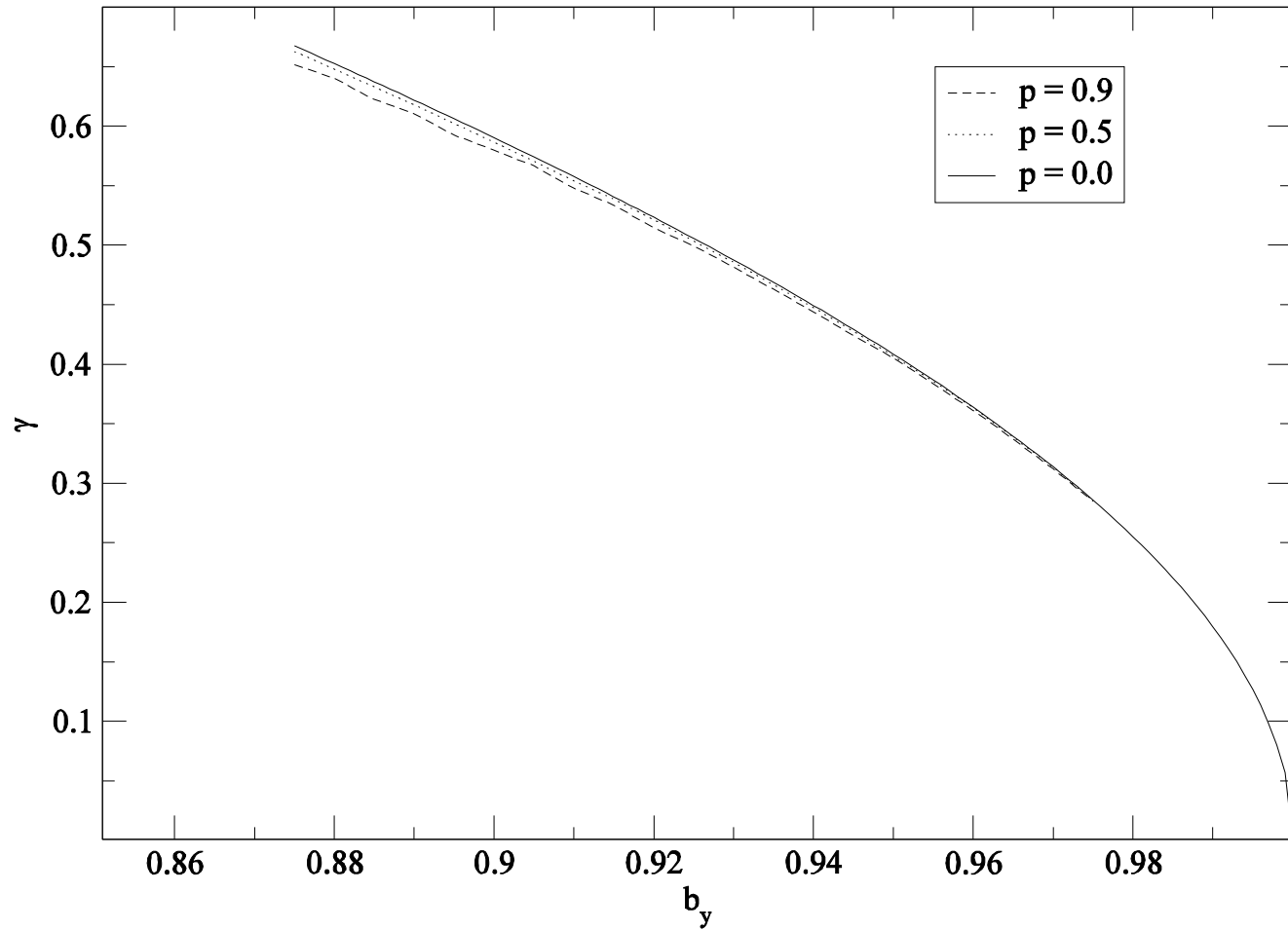
... gera um elipsóide triaxial

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

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

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

Na faixa de razão axial que estamos interessados, $b \sim 0.93$, a Aproximação de colisão frontal é bastante adequada para prever a elipticidade meridional do elipsóide final



... e a conclusão é que

... Para reproduzir a razão axial dos discos das galáxias espirais

$$b = 0.93 \pm 0.003$$

é necessário que o encontro que gerou os seus halos triaxiais tenha ocorrido com

$$\gamma = 0.46 \pm 0.05$$

Correspondendo a velocidades de colisão da ordem de 91 km/s.

Em qual redshift ocorreu a última grande fusão ?

Como na aproximação linear as velocidades peculiares crescem linearmente com a idade do Universo. No caso plano devemos esperar

$$\delta \vec{V} = \frac{2f(\Omega)}{3H\Omega} \vec{g} \propto (1+z)^{-3/2}$$

Atualmente observa-se que $\delta V_0 \sim 200-300$ km/s em escalas inferiores a 1 Mpc. Portanto a triaxialidade prevista para os halos das atuais galáxias espirais deve ter sido gerada quando

$$z \sim 0.7 - 1.2$$



F I M