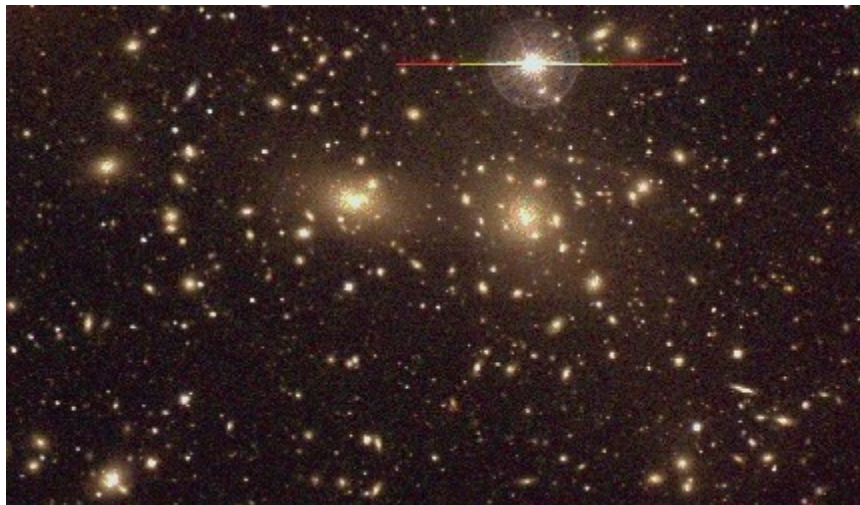


16. Aglomerados de galáxias



Aglomerados de galáxias

- São as maiores estruturas gravitacionalmente ligadas do universo:
 - $M \sim 10^{14} - 10^{15} M_s$
 - $R \sim$ alguns Mpc
 - centenas a milhares de galáxias



Coma

Comparação entre grupos e aglomerados

(Allen's Astrophysical Quantities, 4^a.ed. 2000)

aglomerados ricos

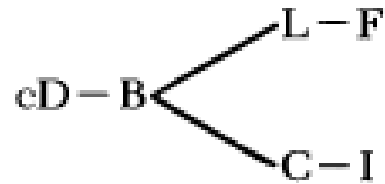
grupos e aglomerados
pobres

• galáxias brilhantes		
(# galáxias)	30-300	3-30
• raio ($h^{-1} \text{ Mpc}$)	1 – 2	0.1 – 1
• dispersão radial de		
velocidades (km/s), σ_v	400 – 1400	100 – 500
• mediana de σ_v	~750	~250
• massa ($h^{-1} M_s$) dentro		
de $1.5 h^{-1} \text{ Mpc}$	$10^{14} - 2 \times 10^{15}$	$10^{12.5} - 10^{14}$
• luminosidade na banda		
B ($h^{-2} L_s$) dentro de $1.5 h^{-1} \text{ Mpc}$	$6 \times 10^{11} - 6 \times 10^{12}$	$10^{10.5} - 10^{12}$
• $\langle M/L_B \rangle$ ($h M_s / L_s$)	~300	~200
• densidade ($h^{-3} \text{ Mpc}^{-3}$)	$10^{-5} - 10^{-6}$	$10^{-3} - 10^{-5}$
• fração de galáxias	~5%	~55%

Tipos de aglomerados

- regulares, intermediários, irregulares
- Zwicky: compactos, semi-compactos, abertos
- Rood - Sastry:
 - + cD
 - + B: binários
 - + L: linha: muito achatado
 - + C: core: um grupo de galáxias brilhantes concentradas no centro
 - + F: flat: um pouco achatado
 - + I: irregular

Classificação de Rood & Sastry (1971)



CLASSIFICATION CRITERIA

Cluster Type	Description	Standard
cD (supergiant)	A cluster which contains an outstandingly brightest member, a cD galaxy (defined originally by Morgan and Lesh 1965). For an operational definition, the size (semimajor axis plus semiminor axis) is ≥ 3 times that of any other galaxy in the cluster. If the main body is multiple or shows any other peculiarity, a subscript p is added to the type designation.	A401 = cD A2199 = cDp (NGC 6166)
B (binary)	Two supergiant galaxies separated by ≤ 10 diameters of the larger galaxy, and with combined size ≥ 3 times that of any other cluster member. A subscript b indicates a connecting bridge between the supergiant binary, or the components of one or both of its members.	A1656 = B (Coma) A154 = Bb
L (line)	Three or more brightest galaxies among the top ten members arranged with comparable separations in a line, and numerous fainter members distributed around them.	A426 = L (Perseus)
C (core-halo)	Four or more of the top ten brightest members with comparable separations located near the center, and numerous fainter members distributed around them.	A2065 (Cor Bor)
F (flat)	Several of the top ten brightest members and a large fraction of fainter galaxies are distributed in a flattened configuration.	A397 A2151
I (irregular)	The galaxies are distributed irregularly, or without a well-defined center.	(Hercules) A400

Classificação de Rood & Sastry (1971)

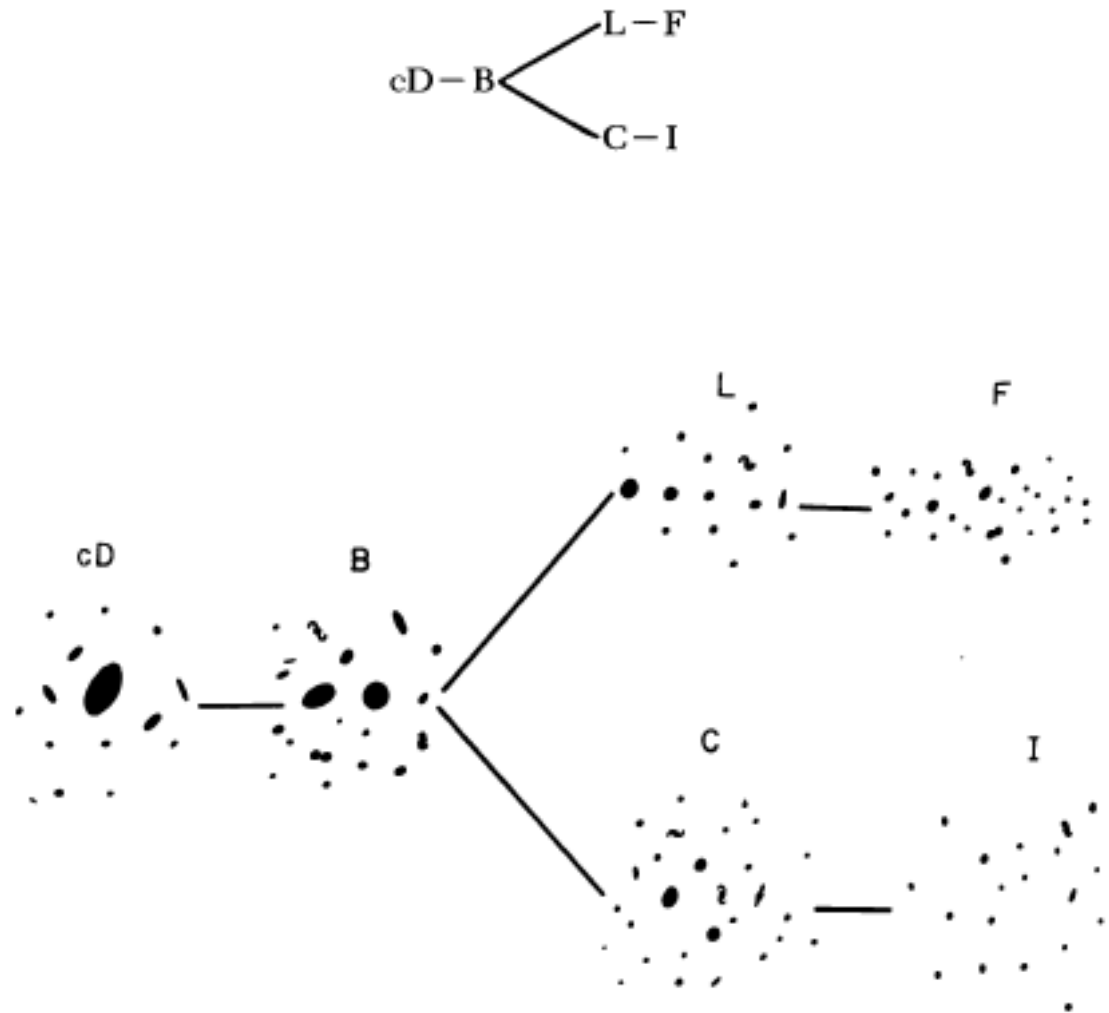


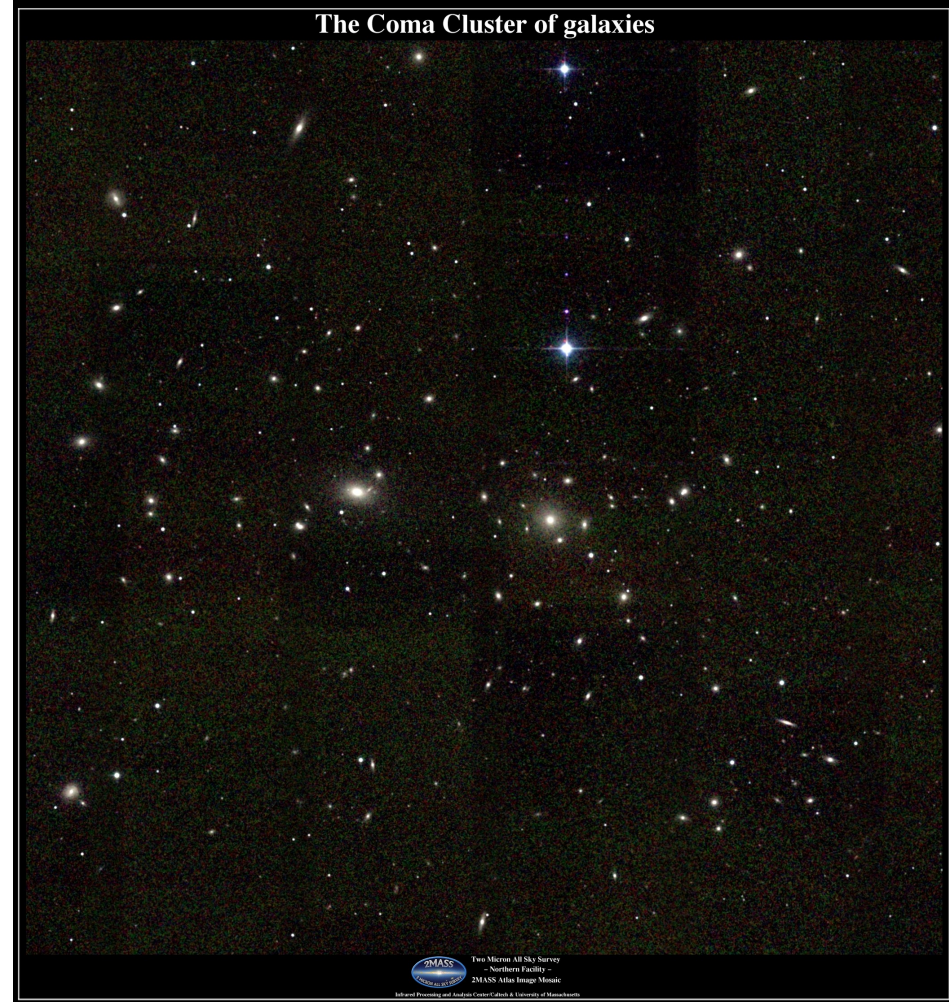
FIG. 1. — "Tuning fork" classification scheme for rich clusters of galaxies.

Classificação de Bautz-Morgan (1970)

- BM I: aglomerado dominado por uma cD (A2199)
- BM II: as galáxias mais brilhantes são intermediárias entre as cDs e E gigantes normais (Coma)
- BM III: aglomerado sem galáxias dominantes (Hercules)
- tipos intermediários: BM I-II, BM II-III
- ~40% dos aglomerados ricos são BM I, I-II, ou II
~60% são BM II-III e III



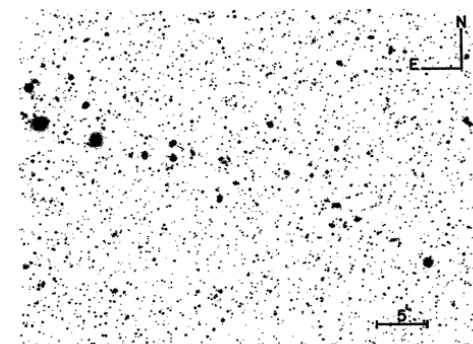
A 2199 – cD, BM I



Coma – B, BM II



Perseus (A426) - L



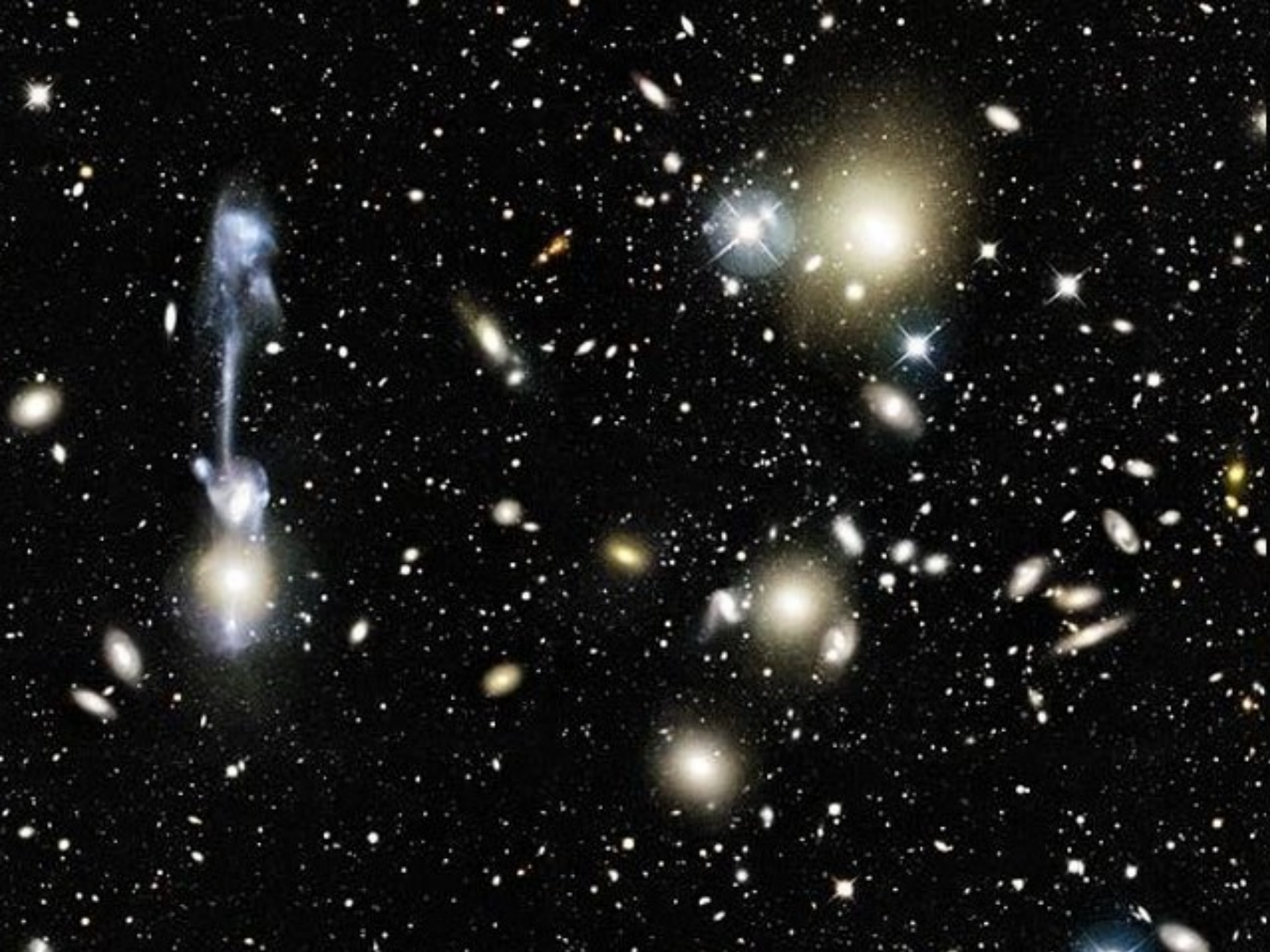


Abell 2065 (Cor Bor) – C, BM III



A2151 (Hercules) – F, BM III

note o grande número de
galáxias em interação



A400 – I, BM II-III

A segregação morfológica

grupos e aglomerados pobres: a maior parte das galáxias brilhantes são S ou Im - ~70%

- aglomerados ricos: E e S0 dominam; fração das S ~15%
- *segregação morfológica*: a fração de E e S0 aumenta com a densidade local de galáxias

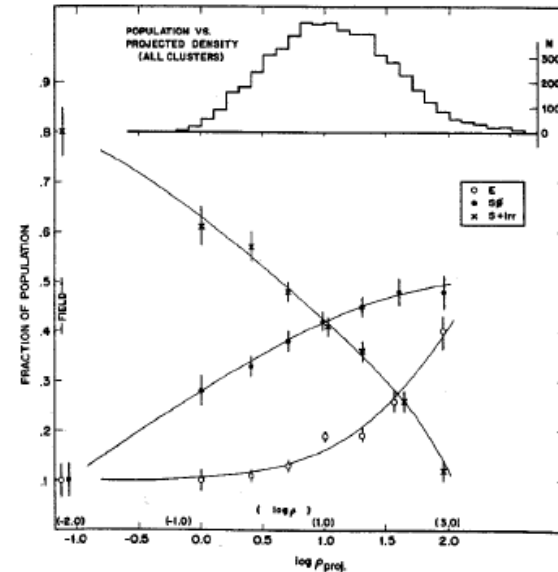


Figura 11.2: A segregação morfológica: a fração de um dado tipo morfológico depende da densidade local de galáxias.

Riqueza

- medida do número de galáxias em um aglomerado
 - critério de Abell:
Abell inicialmente identifica a terceira galáxia mais brilhante do aglomerado, de magnitude m_3 , dentro de um círculo com o raio de Abell
 - raio de Abell:
 $R_A = 1.7/z$ minutos de arco, ou $1.5 h^{-1}$ Mpc
 - riqueza:
 N_A : número de galáxias com magnitudes entre m_3 e m_3+2 dentro de um círculo com o raio de Abell
- catálogo de Abell
- aglomerados ricos: $N_A \geq 30$
 - aglomerados pobres: $N_A < 30$



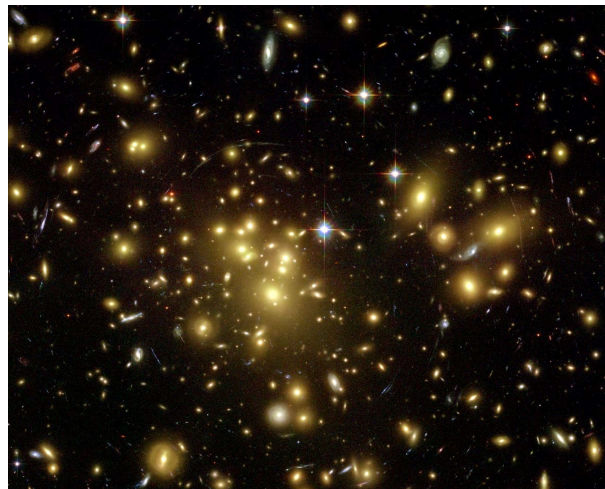
Riqueza

– riqueza:

N_A : número de galáxias com magnitudes entre m_3 e m_3+2 dentro de um círculo com o raio de Abell

classes de riqueza R

R	N_A
≥ 0	≥ 30
≥ 1	≥ 50
≥ 2	≥ 80
≥ 3	≥ 130



Riqueza

– riqueza:

número médio de galáxias brilhantes ($L > L^*$) em aglomerados com $R \geq 0$ dentro de um círculo com o raio de Abell:

$$n_g (agl) \sim 3 h^3 \text{ galáxias Mpc}^{-3}$$

número médio de galáxias brilhantes no campo:

$$n_g (campo) \sim 1.5 \times 10^{-2} h^3 \text{ galáxias Mpc}^{-3}$$

contraste de densidade dos aglomerados:

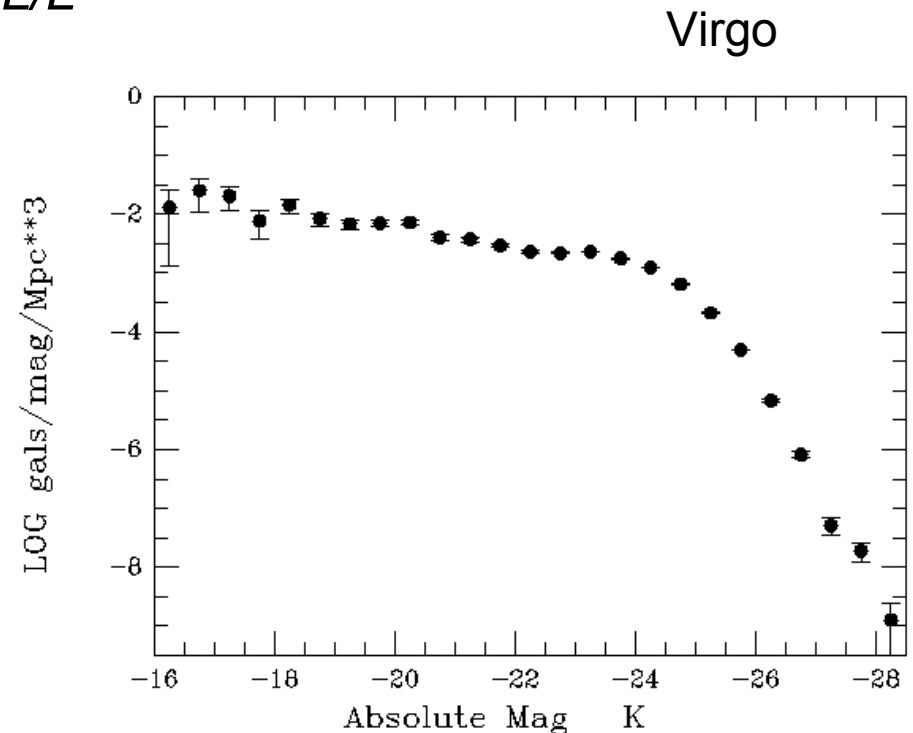
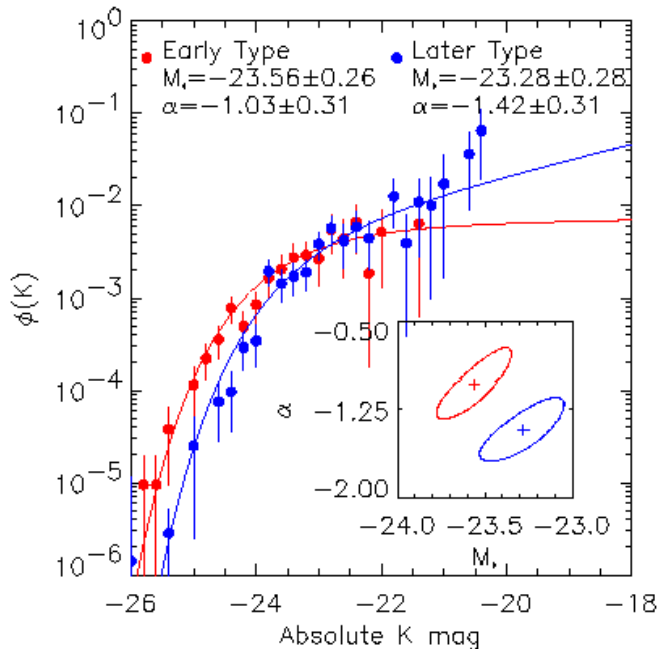
$$[n_g (agl) - n_g (campo)] / n_g (campo) \sim 200$$

função de luminosidade

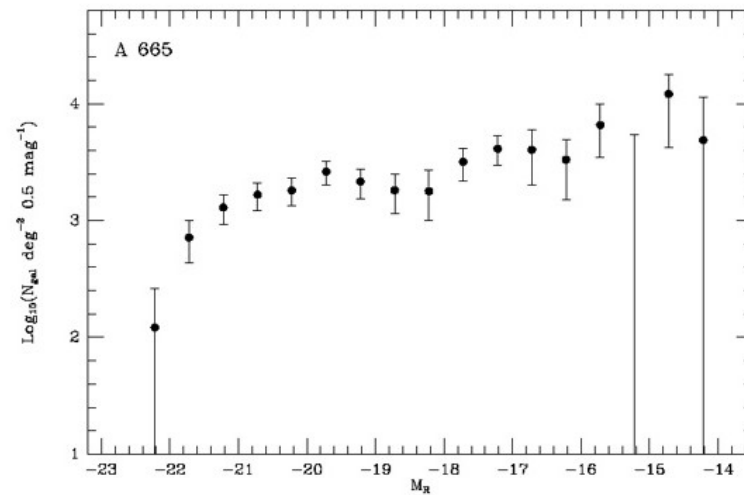
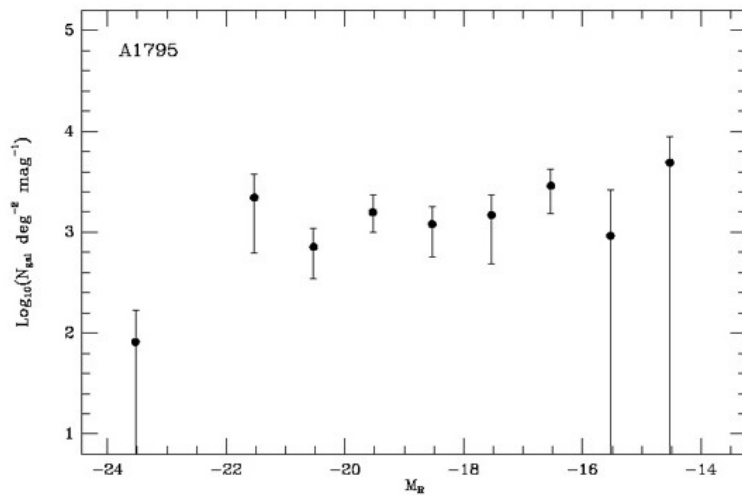
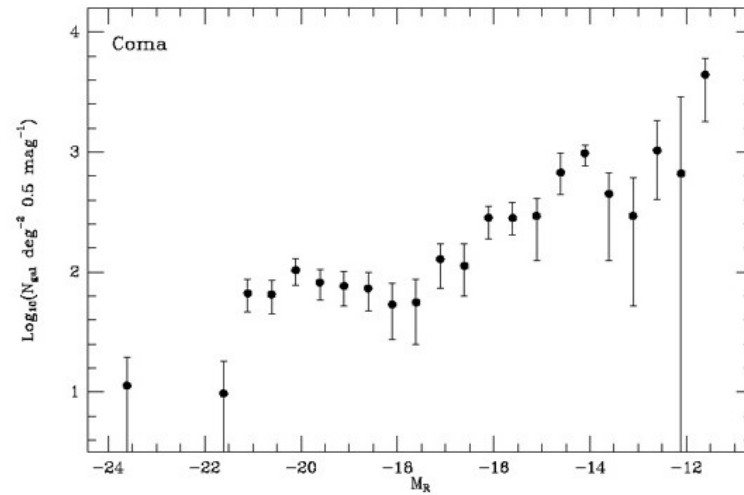
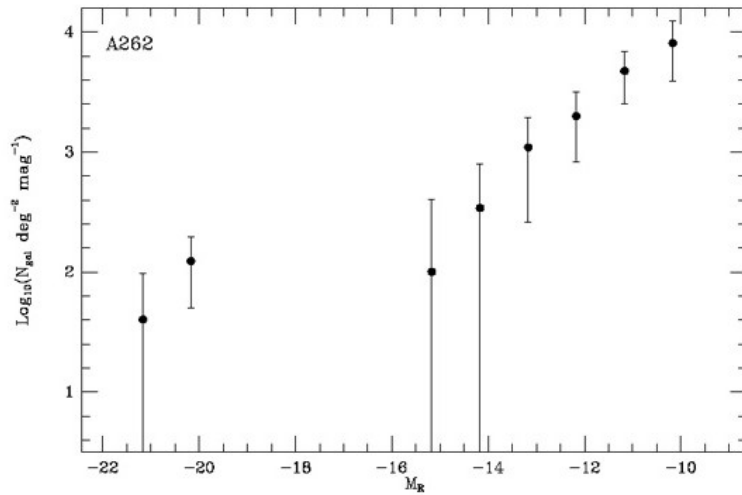
- Função de luminosidade de Schechter (1976)

$$\Phi(L)dL = \Phi^* (L/L^*)^{-\alpha} \exp(-L/L^*)dL/L^*$$

- aglomerados: $\alpha \sim 1.2$
- “campo”: $\alpha \sim 1$
- $M_V^* \simeq -20.4 + 5 \log h$



função de luminosidade



distribuição das galáxias nos aglomerados

Abell 970

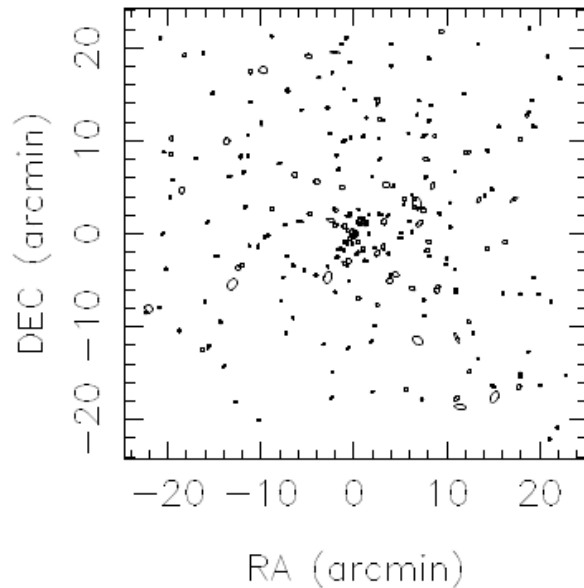


Fig. 1- Galaxies brighter than $b_J^{cosmos} < 19.75$ in the field of Abell 970. The plot is centered on galaxy number 1 in Table 1.

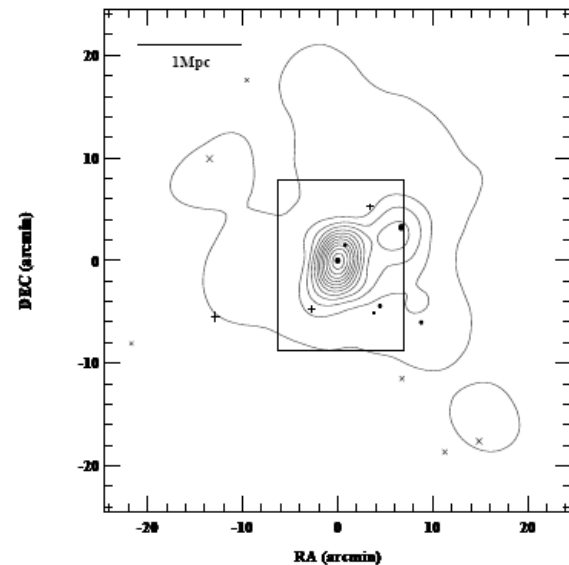


Fig. 2- Projected density map of the galaxies brighter than $b_J^{cosmos} = 19.75$ in the field of Abell 970, together with the positions of the 15 brightest ones. The peak density of this map corresponds to about $210 \text{ galaxies Mpc}^{-2} h_{50}^2$. All density levels in this map are significant. Other symbols are as follows- Dots: galaxies kinematically linked to the cluster; Pluses: galaxies projected in this field but not belonging to the cluster; Crosses: galaxies with no measured velocities. The central rectangle displays the area covered by the X-ray image of Fig. 4.

distribuição das galáxias nos aglomerados

- Vamos supor que as galáxias no aglomerado se distribuem com simetria esférica

$n(r)$: densidade volumétrica

r : distância radial

R : densidade projetada

- exemplos de alguns ajustes empíricos:

– perfil de King

distribuição volumétrica:

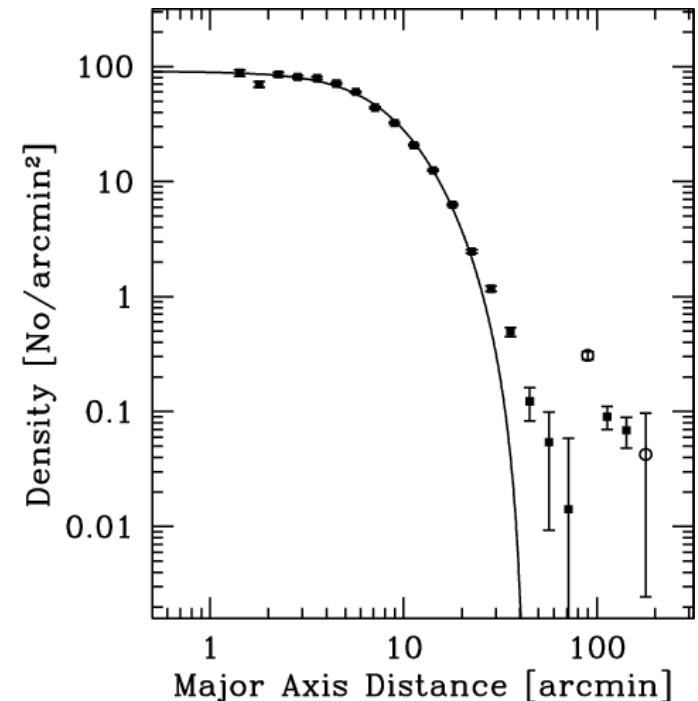
$$n(r) = n_0 [1 + (r/r_c)^2]^{-3/2}$$

r_c : raio do “core” - $r_c \sim 0.12 h^{-1}$ Mpc

distribuição projetada no plano do céu:

$$\Sigma(R) = 2 \int_R^\infty n(r) r dr / (r^2 - R^2)^{1/2} = \Sigma_0 [1 + (R/r_c)^2]^{-1}$$

onde $\Sigma_0 = 2 n_0 r_c$



distribuição das galáxias nos aglomerados

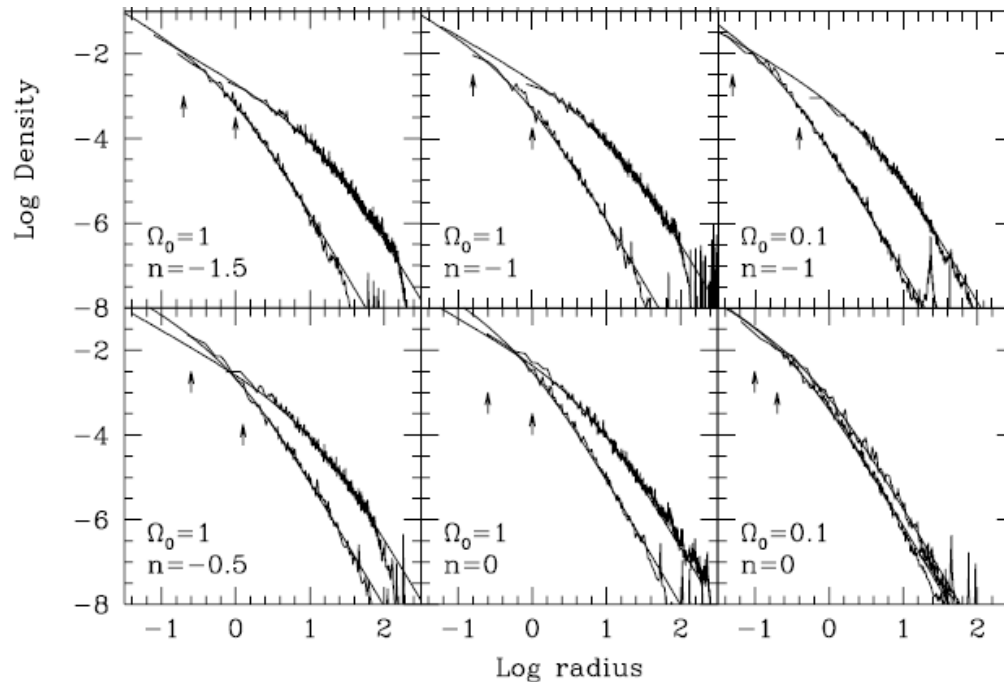
-perfil de Navarro-Frenk-White (1997):

ajusta bem os halos de matéria escura em simulações numéricas

$$n(r) = n_0 (r / r_c)^{-1} (1 + r / r_c)^{-2}$$

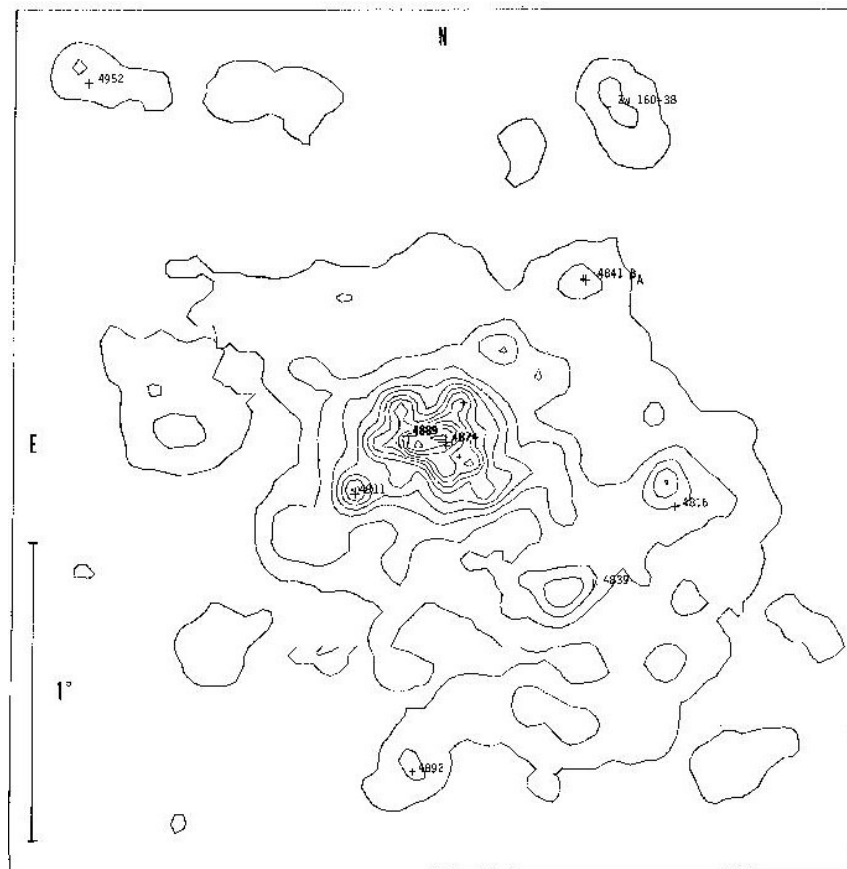
- usa-se também para o perfil de densidade de massa:

$$\rho(r) = \rho_0 (r / r_c)^{-1} (1 + r / r_c)^{-2}$$



distribuição das galáxias nos aglomerados

Coma: perfil aproximadamente de King até $\sim 2 h^{-1} \text{ Mpc}$; depois tem um halo que se estende até $\sim 5 h^{-1} \text{ Mpc}$, onde se mistura com o super-aglomerado de Coma



Tamanhos e velocidades

- raio do core da distribuição de galáxias: $R_c \approx (0.1 - 0.3) h^{-1} \text{ Mpc}$
- raio típico da concentração de galáxias: $R \approx 1.5 h^{-1} \text{ Mpc}$
- raio gravitacional: $R_g \equiv 2 G M / (3 \sigma_v^2)$
 σ_v : dispersão de velocidades unidimensional
 $R_g \equiv 1.5 (M / 5 \times 10^{14} M_\odot) (\sigma_v / 1000 \text{ km/s})^{-2} h^{-1} \text{ Mpc}$
- dispersão de velocidades: $\sigma_v \sim 400 - 1400 \text{ km/s}$
mediana: $\sim 750 \text{ km/s}$
- raio R_{200} : raio dentro do qual o contraste de densidade médio é 200
 $R_{200} \equiv 3^{1/2} \sigma_v / [10 H(z)]$
- “tempo de cruzamento”:
 $t_c = R / \sigma_v \sim 10^9 (R / 1.5 h^{-1} \text{ Mpc}) (\sigma_v / 1000 \text{ km/s})^{-1} \text{ anos}$

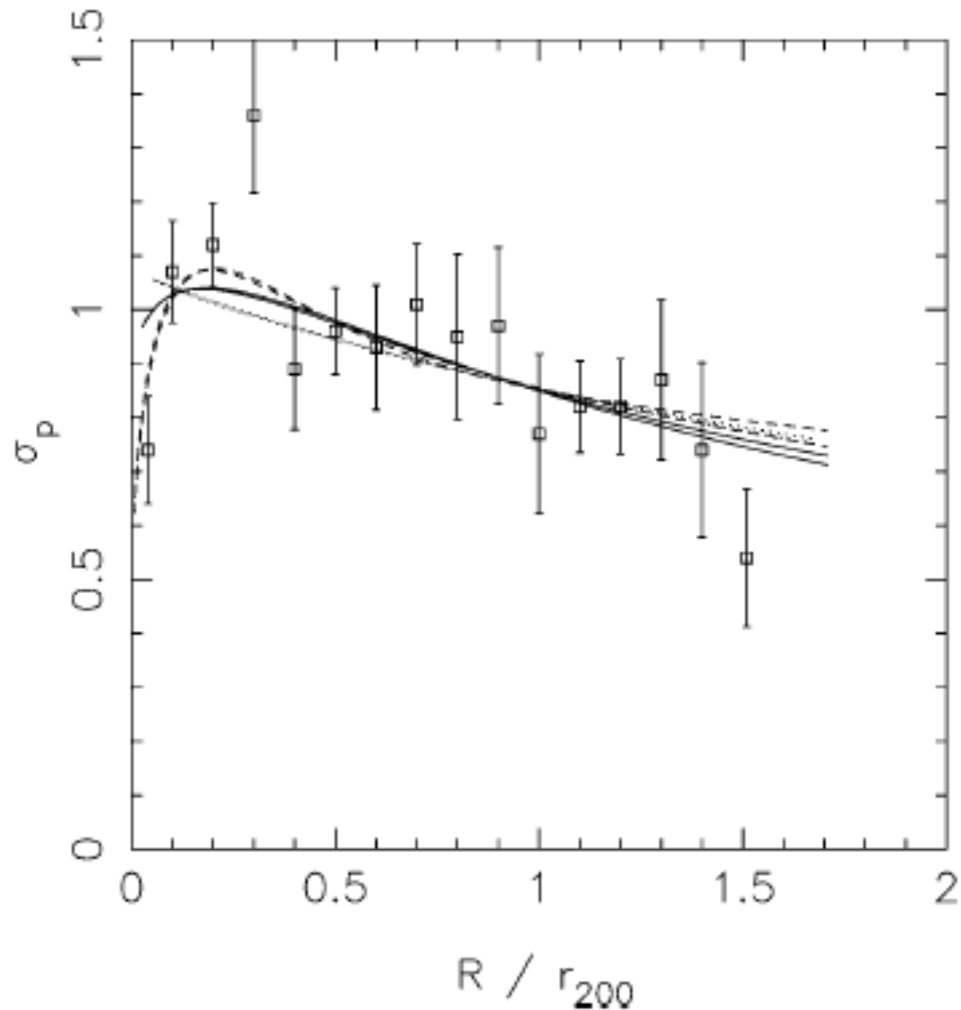


FIG. 2.—Projected velocity dispersion profile and the projection of the fitted profiles for both $\beta_m = 0.3$ and 0.5 , which are nearly indistinguishable on this plot. The dotted line is for $[c_1, c_2] = [0, 1]$, the dashed line is for $[1, 0]$ and the solid line is for $[8, 1/2]$ (see text for details).

massa dos aglomerados

- equilíbrio dos aglomerados: sustentados pela dispersão de velocidades das galáxias
- métodos de determinação de massa:
 - teorema do virial
 - emissão de raios-X
 - lentes gravitacionais

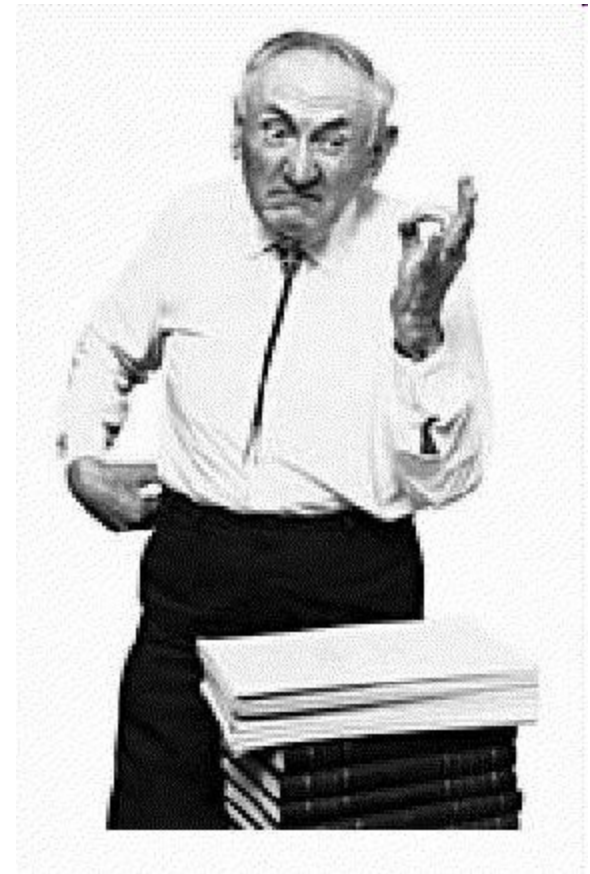
massa dos aglomerados: a descoberta da matéria escura

- teorema do virial:

$$M \sim \langle v^2 \rangle R / G$$

- $\langle v \rangle \sim 800 - 1000 \text{ km s}^{-1}$
- $R \sim \text{alguns Mpc}$
- $M \sim 10^{14} - 10^{15} M_{\odot}$

– $M/L \sim \text{centenas}$:
~ 95% da massa de um
aglomerado é escura!
(Zwicky, 1933)



massa dos aglomerados a esfera isotérmica singular

- um modelo simples para a distribuição de massa dos aglomerados de galáxias:

a esfera isotérmica singular

- consideremos um sistema esférico, sujeito apenas às forças de pressão e da gravitação

pode-se imaginar o sistema como um gás cujas partículas são estrelas, galáxias, ou matéria escura

- suponhamos que o sistema esteja em equilíbrio hidrostático:

$$dp / dr = -G M(< r) \rho(r) / r^2$$

onde p e ρ são a pressão e a densidade do gás

massa dos aglomerados a esfera isotérmica singular

- pressão de um gás ideal de partículas de massa m :

$$p = \rho kT/m$$

Para um sistema gravitacional, é mais conveniente usar-se a dispersão de velocidades das partículas que a temperatura.

Seja σ_v a dispersão de velocidades unidimensional. Se o sistema é isotrópico, sua dispersão de velocidades total será $3\sigma_v^2$

Pelo teorema da equipartição da energia,

$$1/2 m 3\sigma_v^2 = 3/2 kT$$

de modo que a equação de estado deste gás gravitacional é

$$p = \rho \sigma_v^2$$

- agora vamos supor que o sistema é isotérmico (σ_v constante)

massa dos aglomerados

a esfera isotérmica singular

- nesse caso a solução da equação de equilíbrio hidrostático é

$$\rho(r) = \sigma_v^2 / (2 \pi G r^2)$$

e, portanto, a massa dentro do raio r é

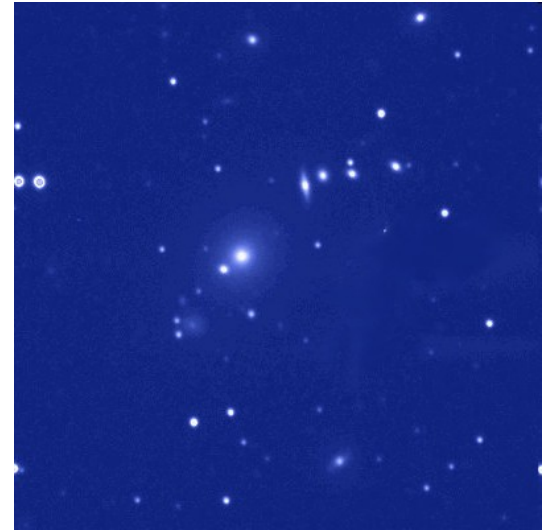
$$M(< r) = \int_0^r 4 \pi r'^2 \rho(r') dr' = 2 \sigma_v^2 r / G$$

note que uma esfera isotérmica singular tem massa infinita, a menos que seja truncada

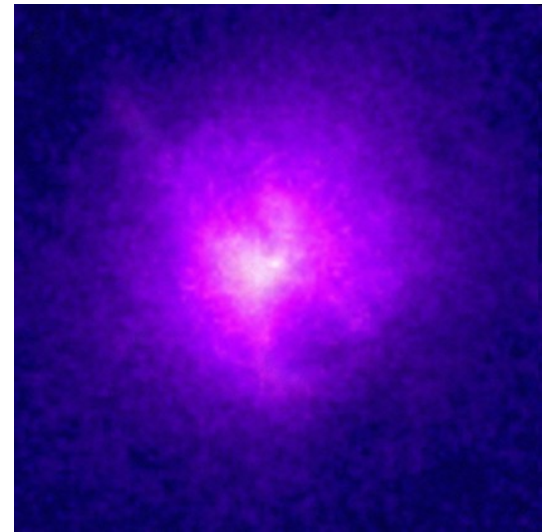
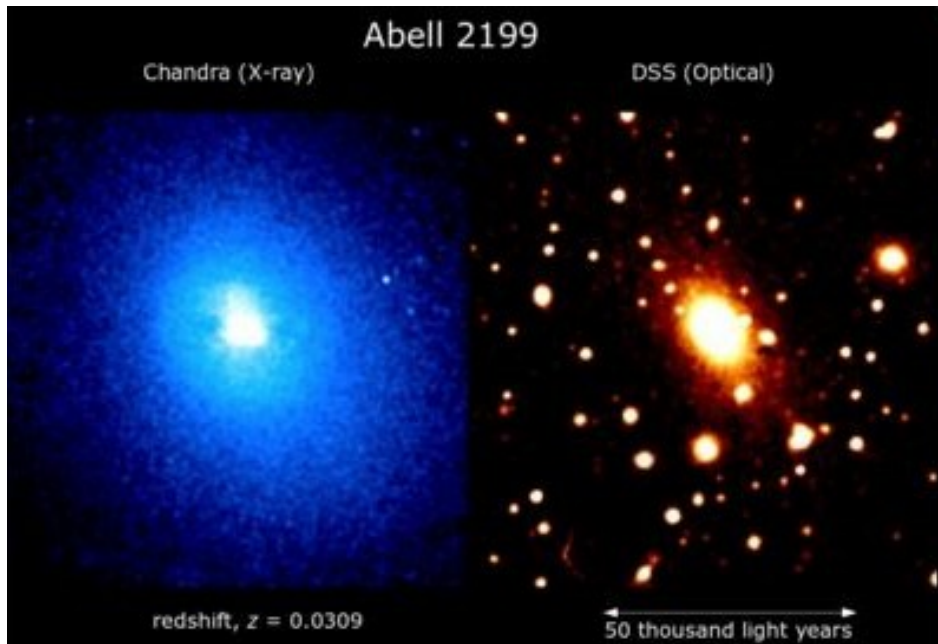
esse modelo é dito singular porque a densidade é infinita em $r=0$

O Meio Intra-Aglomerado

- os aglomerados possuem um meio intergaláctico (MIG) que contém gás quente que emite raios X
 - $T \sim 10^7 - 10^8 \text{ K}$
 - $n \sim 10^{-4} - 10^{-2} \text{ cm}^{-3}$
 - $L_X \sim 10^9 - 10^{11} L_{\odot}$



Hydra A



O Meio Intra-Aglomerado

- fração da massa em gás quente:
~ 0.07
(0.03 a 0.15 $h^{-1.5}$ dentro de $1.5 h^{-1} Mpc$)
- fração da massa em estrelas, gás frio, poeira:
~0.02 – 0.03



O Meio Intra-Aglomerado

o MIG é estudado via raios-X



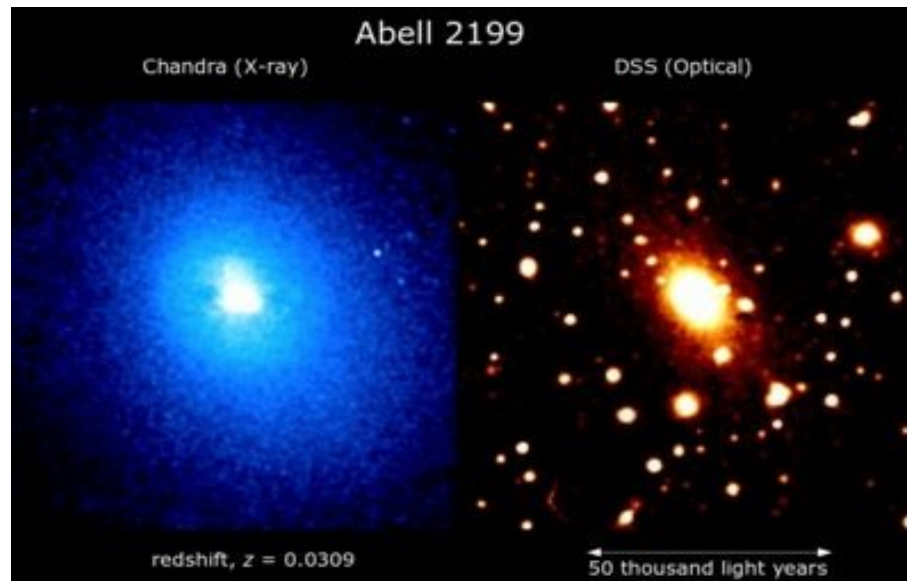
Chandra

XMM-Newton



O Meio Intra-Aglomerado

- mecanismo de emissão: *radiação de bremsstrahlung* (ou free-free): é a radiação emitida por um plasma quente
- emissividade do gás:
 $\varepsilon = 2.4 \times 10^{-27} n_e^2 T^{1/2} \text{ erg cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$
- luminosidade: $L_x \sim \varepsilon V$, onde V é o volume da região emissora



O Meio Intra-Aglomerado

- a temperatura é muitas vezes medida em eV: $1 \text{ eV} = 11604 \text{ K}$
- comparação entre grupos e aglomerados:

aglomerados ricos

grupos e aglomerados
pobres

temperatura do gás (keV)

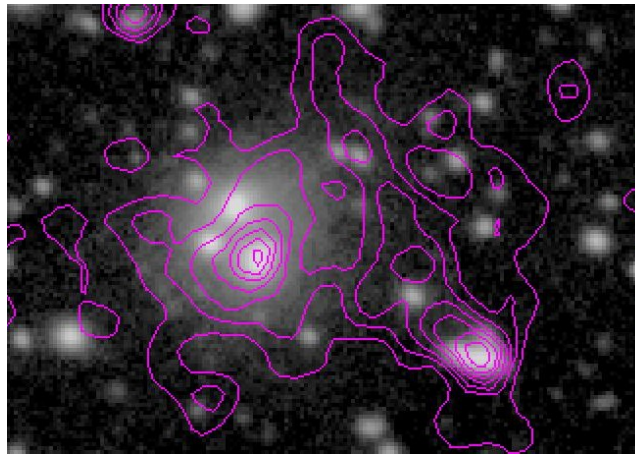
2 – 14

< 2

luminosidade em raios-X
($h^{-2} \text{ erg s}^{-1}$)

$10^{42.5} - 10^{45}$

< 10^{43}



Abell 2125

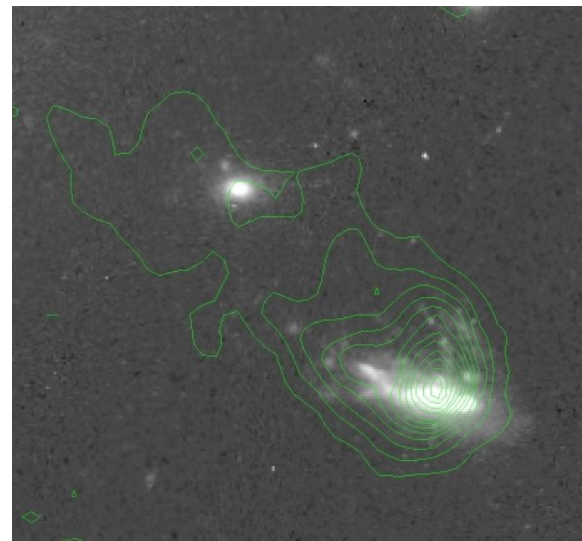
O Meio Intra-Aglomerado

- abundância de Fe no gás: $\sim 0,3$ da solar!
intervalo: $0,2$ a $0,5 Z_s$

parte do gás foi enriquecido dentro das galáxias (por ventos estelares e explosões de SN) e removido por “ventos galácticos” (as explosões das SNs aquecem o meio interestelar das galáxias, e o gás escapa como um vento) ou pela pressão de arraste do gás quente do aglomerado



NGC 4522 Stripped



remoção do gás em uma
galáxia de Abell 2125

O Meio Intra-Aglomerado

- se o gás estiver em equilíbrio hidrostático,

$$dp / dr = -GM(r)\rho(r) / r^2$$

onde p e ρ são a pressão e densidade do gás e $M(r)$ é a massa total dentro do raio r

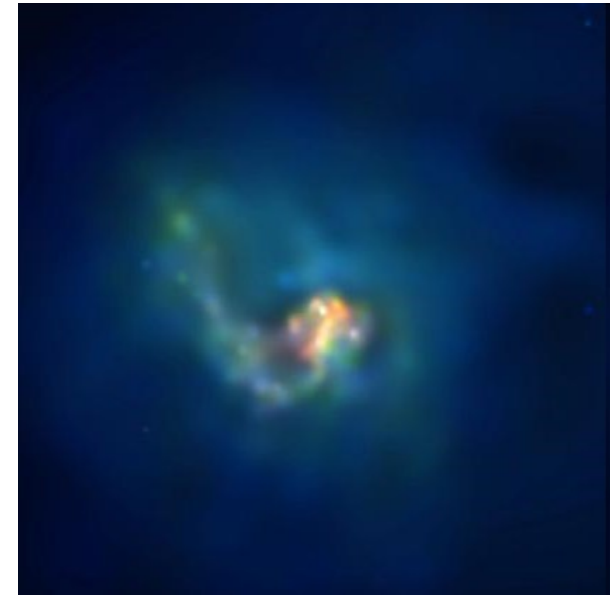
- equação de estado:

$$p = \rho kT / (\mu m_p)$$

onde μ é o peso molecular médio (~ 0.5 para um plasma ionizado) e m_p é a massa do próton

- logo,

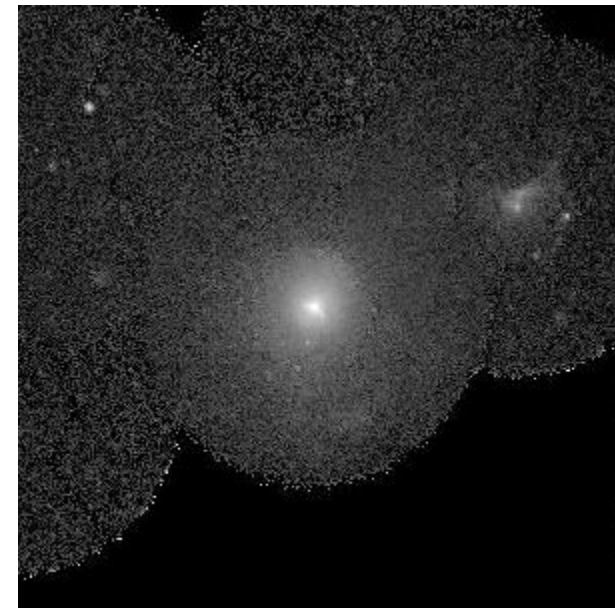
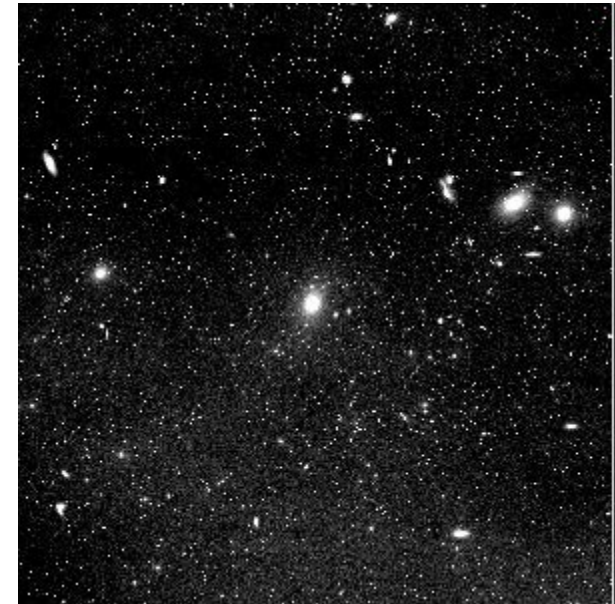
$$M(r) = -\frac{kT(r)r}{G\mu m_p} \left(\frac{d \log \rho}{d \log r} + \frac{d \log T}{d \log r} \right)$$



Centaurus

O Meio Intra-Aglomerado

$$M(r) = -\frac{kT(r)r}{G\mu m_p} \left(\frac{d \log \rho}{d \log r} + \frac{d \log T}{d \log r} \right)$$



- Exemplo:
esfera isotérmica singular de raio R
 - $\rho \propto r^2$
 - gás isotérmico: $T = \text{const.}$
logo, a massa dentro do raio R será
 $M \sim 2 k T R / (G \mu m_p)$
- aplicação: M87 (no aglomerado de Virgo)
 $M(<300 \text{ kpc}) \sim 3 \times 10^{13} M_s$

fluxos de resfriamento

- o gás quente emite radiação de bremsstrahlung e se resfria
 $\Lambda(T, Z)$: taxa de resfriamento do gás = energia perdida em $\text{erg cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$
depende da temperatura e da metalicidade do gás
- tempo de resfriamento de um gás com densidade ρ e temperatura T :

$$t_{\text{resf}} = -E / (dE/dt) \sim 3\rho kT / [2\mu \Lambda]$$

- para um aglomerado de temperatura T e densidade eletrônica n_e :

$$t_{\text{resf}} \sim 9 \times 10^7 (T / 10^8 \text{ K})^{-1/2} (n_e / \text{cm}^{-3})^{-1} \text{ anos}$$

no centro dos aglomerados o tempo de resfriamento é menor que a idade do universo: o gás nas regiões centrais dos aglomerados se resfria

fluxos de resfriamento

- até há alguns anos se achava que o gás frio caia sobre a galáxia central (a pressão não mais segurava a gravidade), produzindo um fluxo de acreção de algumas dezenas a centenas de $M_{\odot}$ /ano
- parte do gás se resfria: em alguns aglomerados se observam filamentos de gás ionizado ($T \sim 10^4$ K)
- mas com os satélites de raios-X Chandra e XMM-Newton descobriu-se que o gás não se resfriava muito: alguma coisa está aquecendo o gás
- choques? núcleos ativos?

filamentos de gás
“frio” em Perseus



fluxos de resfriamento

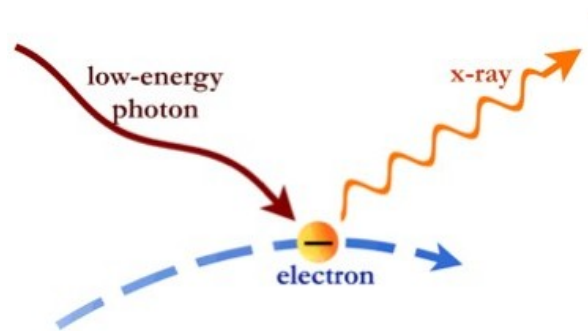
- Aglomerados *cool-core* (CC) x *non-cool-core* (NCC):
 - devido ao resfriamento do gás, alguns aglomerados ficam com a região central fria (temperatura menor ou da ordem de 2 Kev): são os CC
 - Normalmente os CC são aglomerados em equilíbrio, enquanto que os NCC mostram evidências de fusões ou colisões entre aglomerados

filamentos de gás
“frio” em Perseus

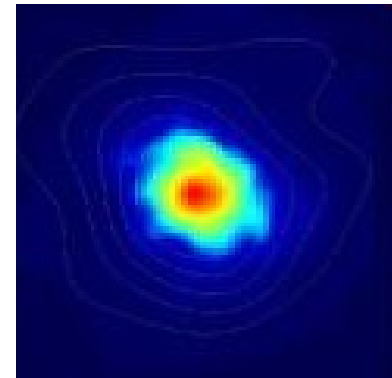
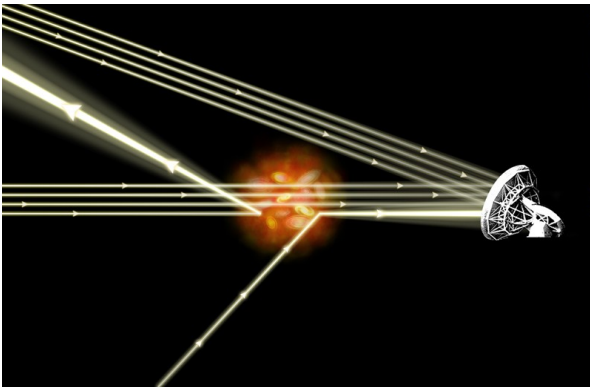


O efeito Sunyaev - Zeldovich

- os ftons da radiação cósmica de fundo (RCF), cuja temperatura é $T \approx 2.73$ K (logo, energias muito pequenas) são espalhados e aquecidos pelos eletrons relativísticos do gás quente (*efeito Compton inverso*)



- um mapa da temperatura da RCF na região revelará uma “mancha” na posição do aglomerado



O efeito Sunyaev - Zeldovich

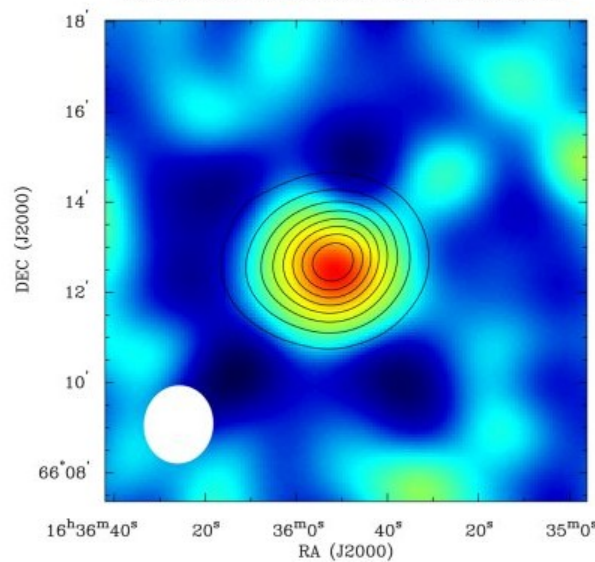
- para uma distribuição esférica de gás com densidade eletrônica n_e , temperatura eletrônica T e raio R , a flutuação da temperatura da RCF é

$$\Delta T / T \approx 4 k T \sigma_T n_e R / (m_e c^2)$$

onde m_e é a massa do eletron e σ_T é a seção de choque de Thomson

- para um aglomerado típico: $\Delta T/T \sim 10^{-4}$

Abell 2218
Color: Sunyaev-Zeldovich Effect at 28.5 GHz (Chicago/MSFC S-Z group, BIMA Interferometer)
Contours: X-ray Emission (ROSAT PSPC imager)



Exercícios

- 1. Com a função de luminosidade de Schechter, estime a razão entre o número de galáxias mais brilhantes que $M_V = -20$ e as mais brilhantes que $M_V = -22$ em um aglomerado. (Elmegreen)
- 2. Calcule o raio de Abell ($1.5 h^{-1}$ Mpc), em minutos de arco, para um aglomerado próximo com redshift z ($z \ll 1$). Nesse caso pode-se usar a lei de Hubble para determinar a distância.
- 3. A emissividade j de um gás quente emitindo radiação de bremsstrahlung é dada por

$$4\pi j_\nu \approx 6.8 \times 10^{-38} n_e^2 T^{-1/2} e^{-h\nu/kT}$$

em unidades de $\text{erg cm}^{-3} \text{ s}^{-1} \text{ Hz}^{-1}$. Estime a luminosidade X entre 1 e 10 keV (em $L_\odot$) de um aglomerado de galáxias cujo gás tem temperatura de 10^8 K e possui densidade de 10^{-3} cm^{-3} . Suponha que o raio do aglomerado é de 1 Mpc. Estime quanto vale M_{gas}/L_X . Suponha que o gás está uniformemente distribuído dentro do aglomerado.

- 4. Estime a flutuação de temperatura devido ao efeito Sunyaev - Zeldovich para um aglomerado rico típico.