

Aglomerados de Galaxias

Gastão B. Lima Neto
IAG/USP

10 arcmin

Introdução

- Primeiros aglomerados descobertos no séc. XVIII:
 - ✓ *Virgo*, por Charles Messier --- *Coma*, por William Herschel

XII. *On the Construction of the Heavens.*

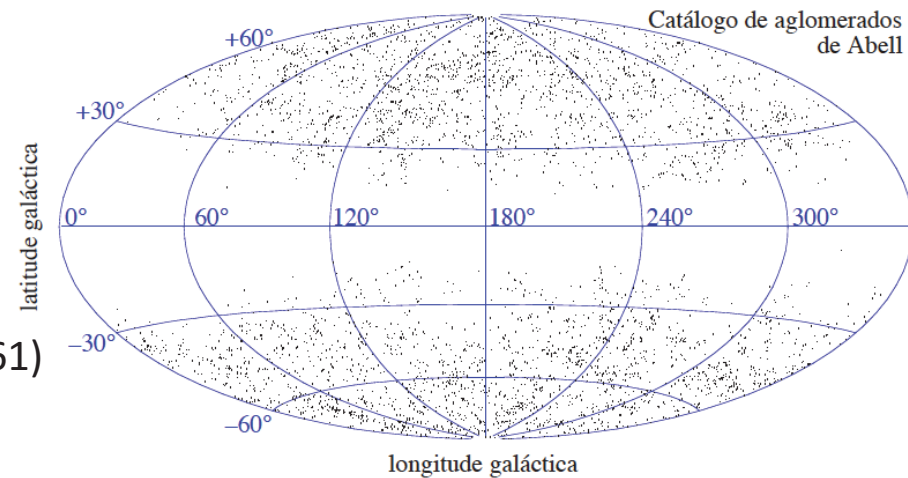
By William Herschel, Esq. F. R. S.

Read February 3, 1785.

This view of the present subject throws a considerable light upon the appearance of that remarkable collection of many hundreds of nebulae which are to be seen in what I have called the nebulous stratum of Coma Berenices. It appears from the extended and branching figure of our nebula, that there is room for the decomposed small nebulae of a large, reduced, former great one to approach nearer to us in the sides than in other parts. Nay, possibly, there might originally be another very large joining branch, which in time became separated by the condensation of the stars; and this may be the reason of the little remaining breadth of our system in that very place: for the nebulae of the stratum of the Coma are brightest and most crowded just opposite our situation, or in the pole of our system.

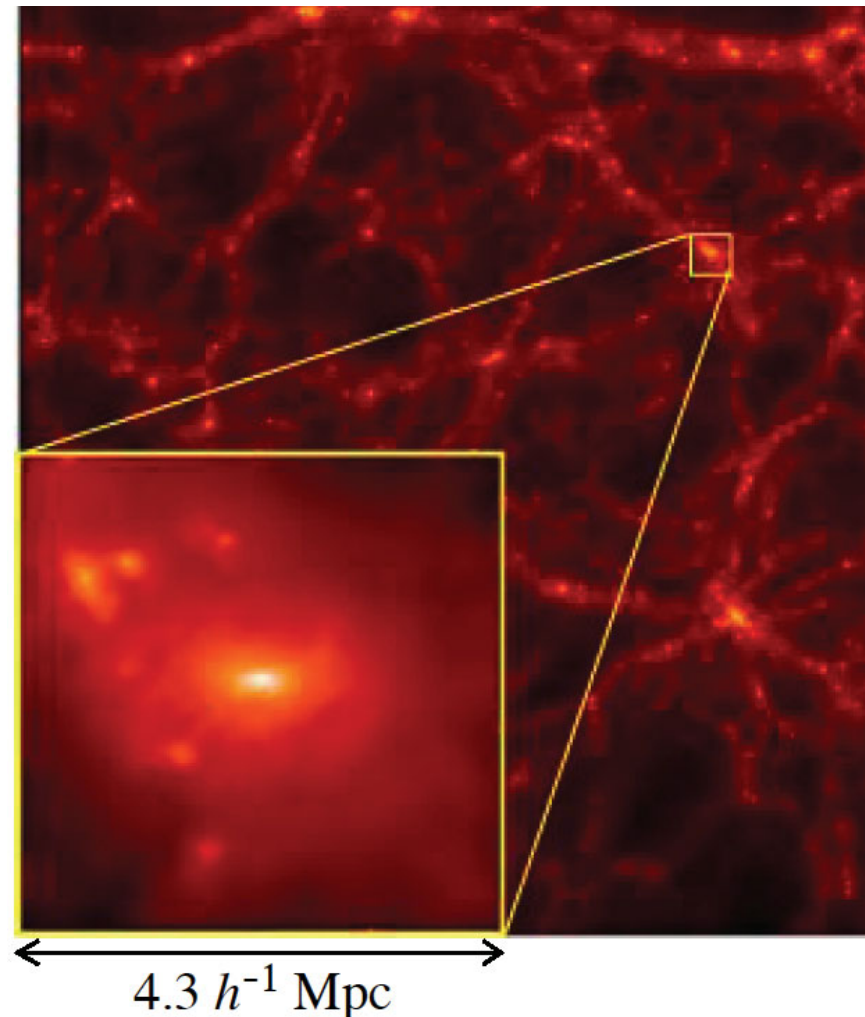
Introdução

- Primeiros aglomerados descobertos no séc. XVIII:
 - ✓ *Virgo*, por Charles Messier --- *Coma*, por William Herschel
- Estudo sistemático começa na década de 1930
 - ✓ Hubble, Shapley, Zwicky, Shane & Wirtanen, et al.
- A partir de 1950:
 - ✓ Catálogos, classificação:
Abell (1958), Abell et al. (1989); Zwicky et al. (1961)
- 1980+ : raios-X
- 1990+: Aglomerados em alto redshift, lentes gravitacionais.
- 2000+: micro-ondas (efeito Sunyaev-Zel'dovich)
- Para um review completo da história da pesquisa de aglomerados de galáxias: A. Biviano in: "Constructing the Universe with Clusters of Galaxies", IAP 2000 meeting, Paris.

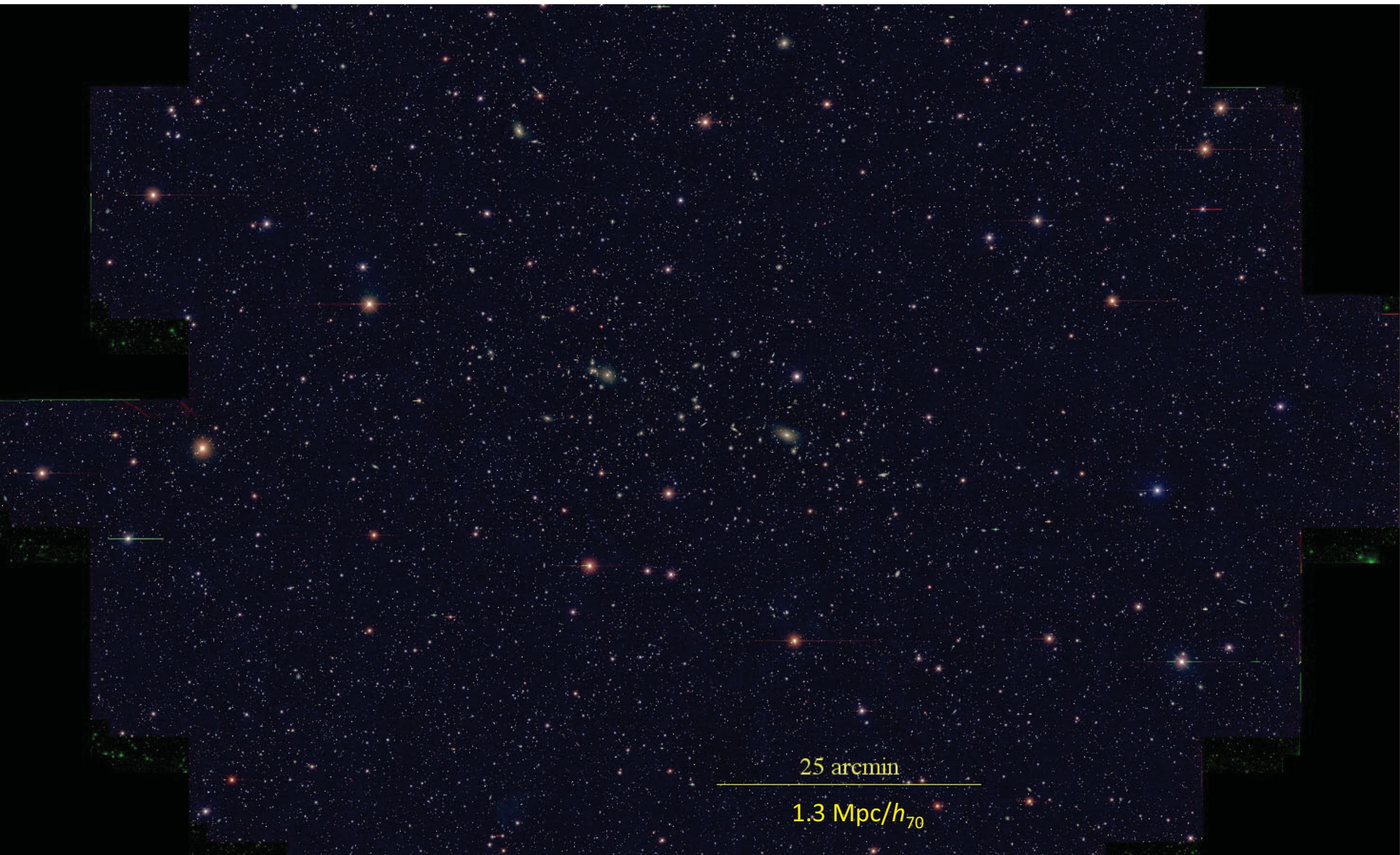


Definições

- Aglomerados ricos: $\sim 10^3$ galáxias, $M \sim 10^{15} M_{\odot}$.
- Aglomerados pobres: $\sim 10^2$ galáxias, $M \sim 10^{14} M_{\odot}$.
 - ✓ definição se confunde com grupos ricos.
- Dimensão: $R \sim 1\text{--}2$ Mpc.
 - ✓ região central (core) $\sim 50\text{--}150\text{kpc}$.
- Densidade de matéria: $\sim 200 \times \rho_c$
 - ✓ ($\sim 2000 \times \rho_c$ na região central).
- Relativamente raros, contêm $\sim 7\%$ das galáxias.
- Objetos jovens: formação em $z \leq 2$.



Abell 3376



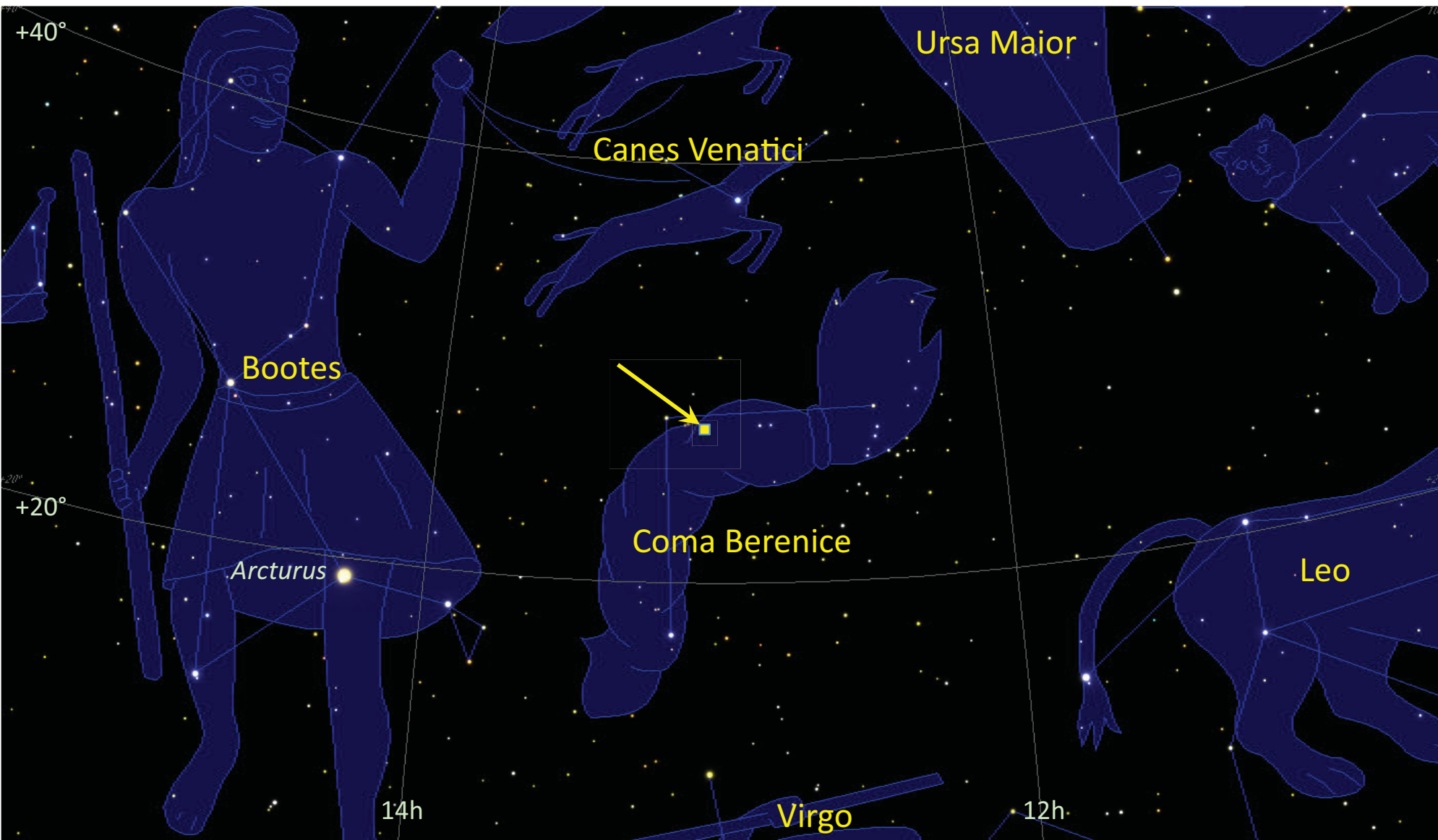
$z = 0.0456$; “true-color” grz DECam/Blanco/CTIO image

Abell 3376



$z = 0.0456$; “true-color” *grz* DECam/Blanco/CTIO image

Coma: o aglomerado mais rico no Universo local



Coma: o aglomerado mais rico no Universo local



- Região central, ~ 1 Mpc. Distância ~ 110 Mpc.

Catálogos

- Abell (1958: Norte; 1989: todo céu)
 - ✓ 4076 aglomerados ricos, completo até $z \sim 0,1$, $\sim 10\%$ de falso-positivo
 - ✓ baseado em fotos (Palomar)
 - ✓ $N > 30$ galáxias entre m_3 e $m_3 + 2$ (banda V).
 - ✓ Raio de Abell = $1,5 h^{-1}$ Mpc $\Rightarrow R_A = (1,72/z)$ arcmin.
- Zwicky, Herzog & Wild (1961–1968)
 - ✓ fotos Palomar
 - ✓ $\rho_{\text{gal}} > 2 \rho_{\text{campo}}$.
 - ✓ 50 galáxias entre m_1 e $m_1 + 3$.
- Aglomerados de Zwicky são mais difusos e pobres devido ao critério de seleção.

Catálogos

- Raios-X

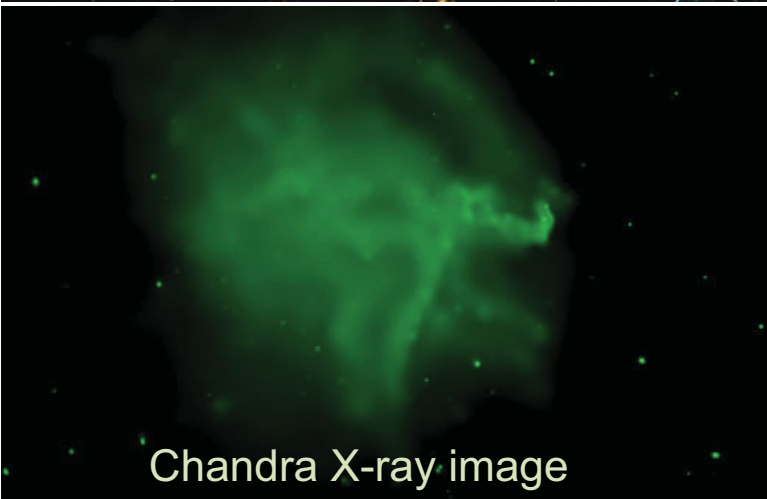
Catálogo	Alcance em redshift	Membros	com z medido
Henry et al. (1992) EMSS	$z \lesssim 0.6$	~ 95	$\sim 70+$
Rosati et al. (1998) RDCS	$z \lesssim 0.8$	~ 70	$\sim 60+$
Vikhlinin et al. (1998)	$z \lesssim 0.6$	~ 200	...
Boehringer et al. (1998) REFLEX	$z \lesssim 0.3$	~ 450	$\sim 380+$

- Óptico, automático.
 - ✓ SDSS, 2dF...
 - ✓ Uso de observações em várias bandas, grandes catálogos de velocidade.
- Para depois de 2010, micro-ondas (efeito S-Z).
 - ✓ *Planck*, South Pole Telescope.

Composição



CFHT optical image



Chandra X-ray image



Weak lensing mass reconstruction

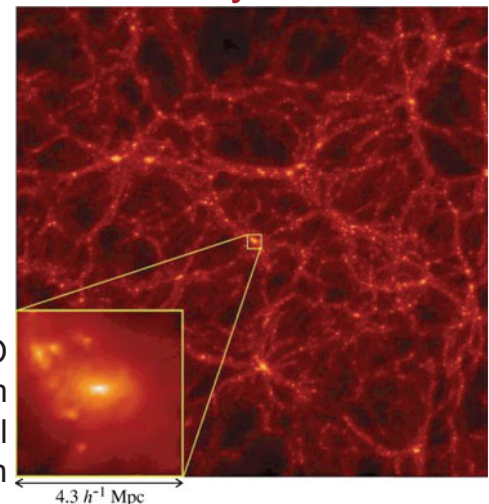
Abell 520: NASA, ESA, CFHT,
CXO, Jee M.J. & Mahdavi A.
VIRGO Consortium
Cosmological Simulation

~ 3% de estrelas (nas galáxias e no
meio intra-aglomerado [luz difusa]);

~ 12% de plasma quente (gás intra-
aglomerado);

~ 85% de matéria escura

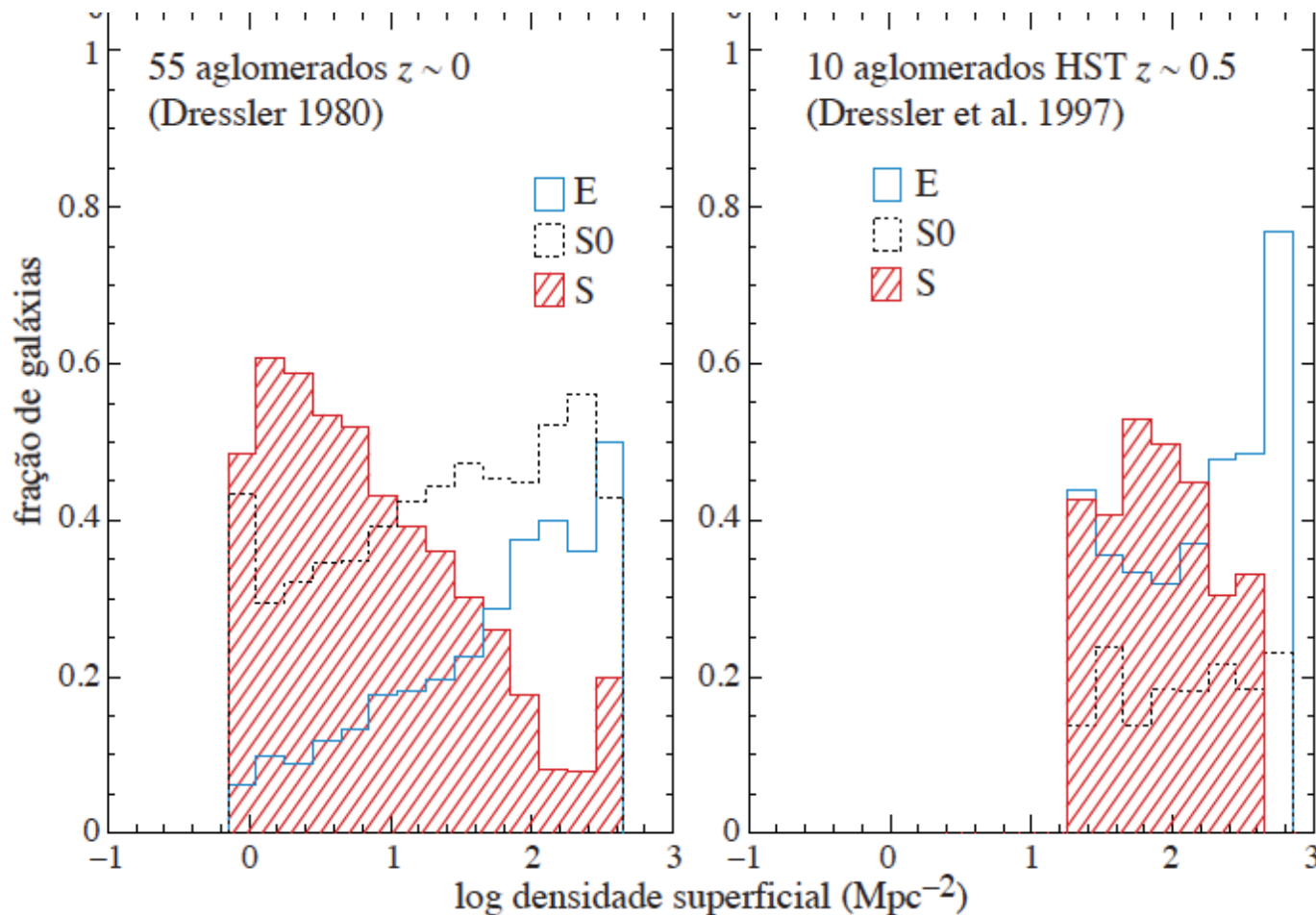
DM N-body simulation



VIRGO
Consortium
Cosmological
Simulation

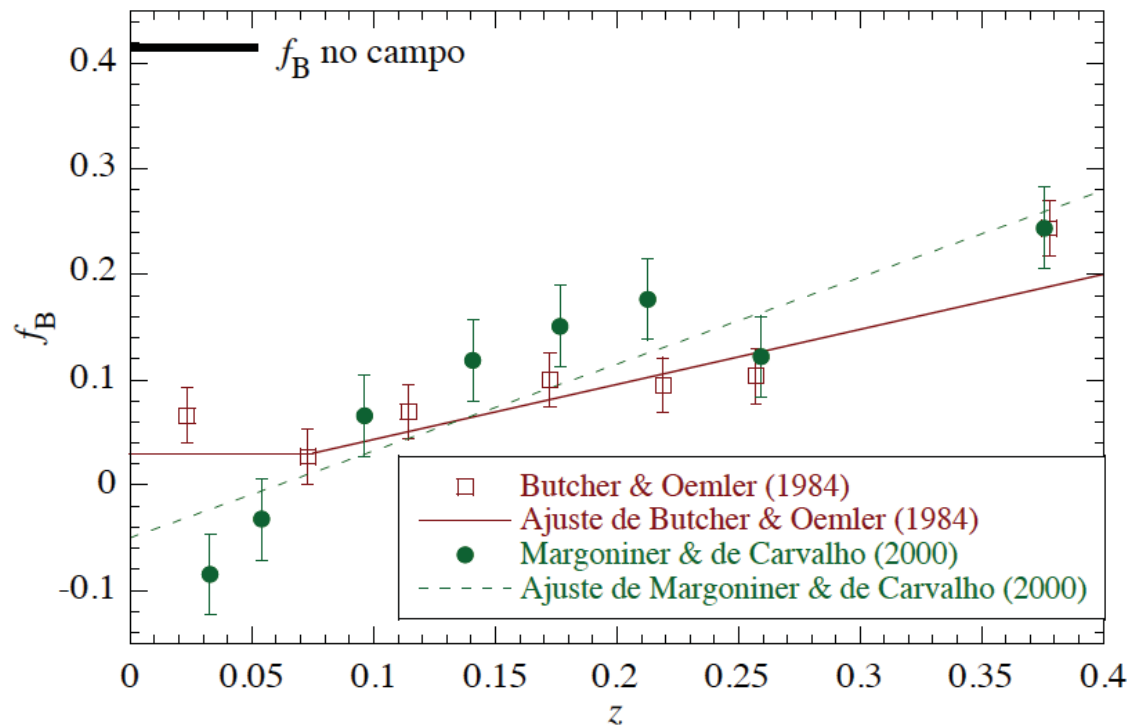
Galáxias em aglomerados

- Segregação densidade–morfologia (Dressler 1980).
 - ✓ Mais marcada em aglomerados regulares.
 - ✓ Elípticas + lenticulares formam a população predominante em aglomerados em $z \sim 0$.
 - ✓ Note a diminuição de lenticulares em aglomerados mais distantes, $z \sim 0.5$.



Galáxias em aglomerados

- Efeito Butcher-Oemler (1984): aumento da fração de galáxias azuis com o redshift.
 - ✓ Dependência com a posição: a fração de galáxias azuis também aumenta com o raio do aglomerado.
 - ✓ Evolução e queda de galáxias em aglomerados.
 - ✓ Transformação morfológica → transição de galáxias azuis para galáxias vermelhas.
 - ✓ Transformação de espirais em queda em lenticulares.



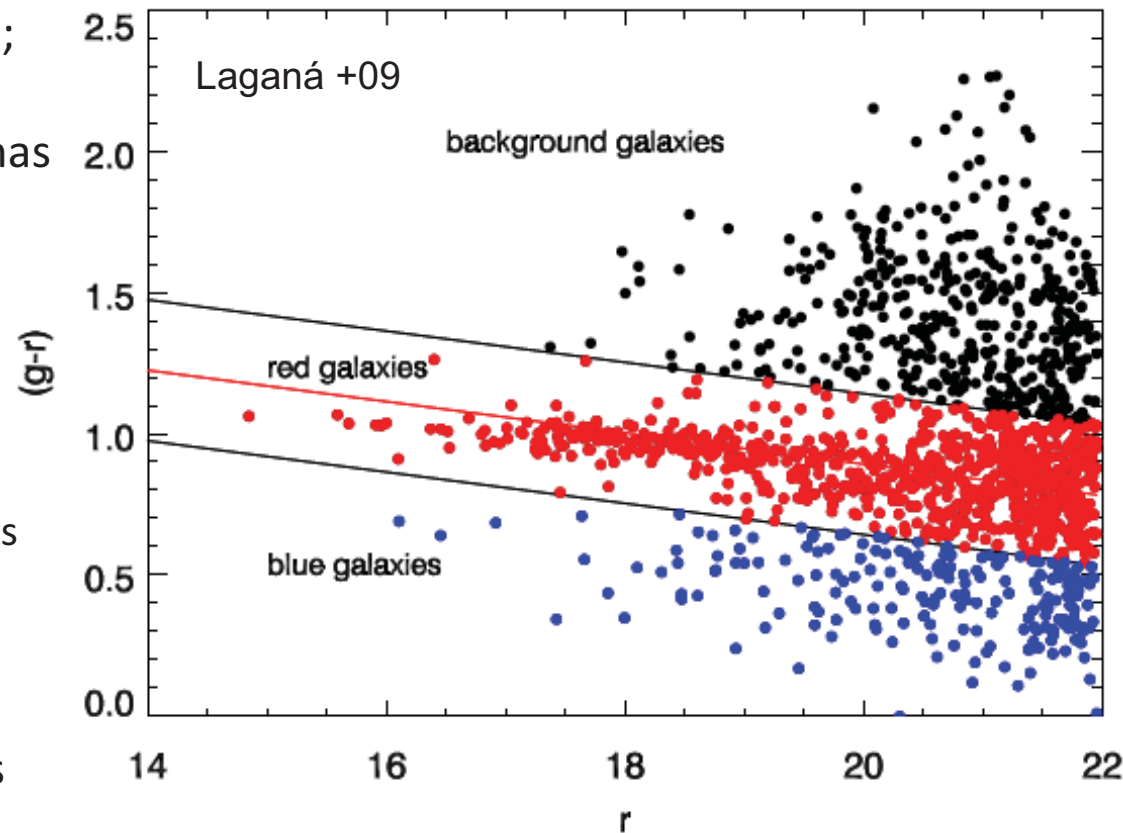
Sequência vermelha

- Relação cor-magnitude das galáxias elípticas em aglomerados (Baum 1959; Faber 1973).
→ elípticas + luminosas são + vermelhas

- Efeito de idade ou metalicidade?
 - ✓ modelos semi-analíticos sugerem que a metalicidade seja o fator principal.
 - ✓ galáxias + luminosas são mais massivas e não deixam escapar os metais formados em estrelas.

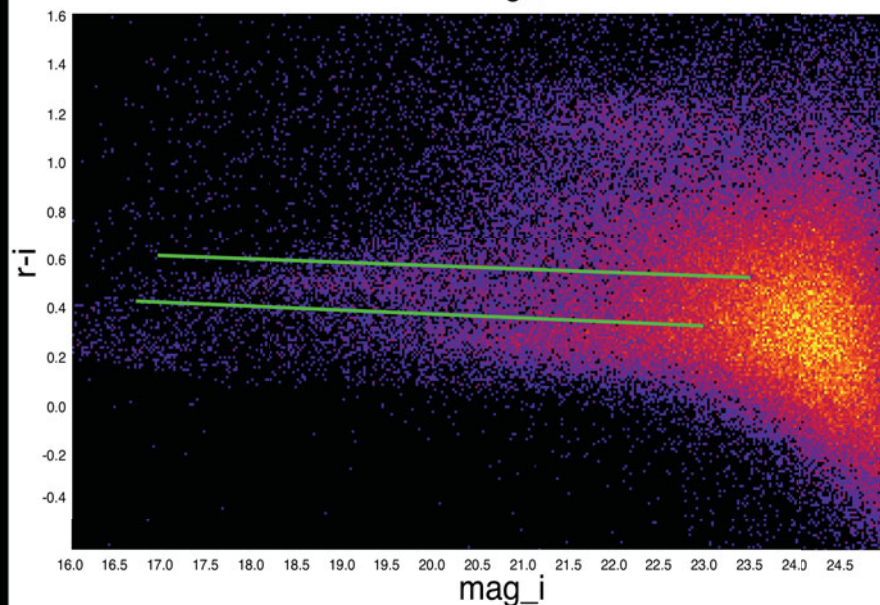
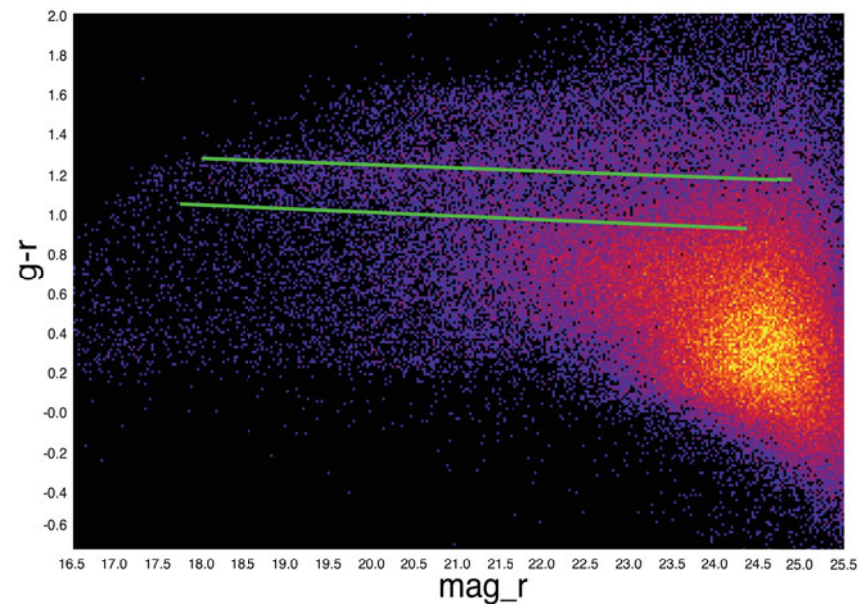
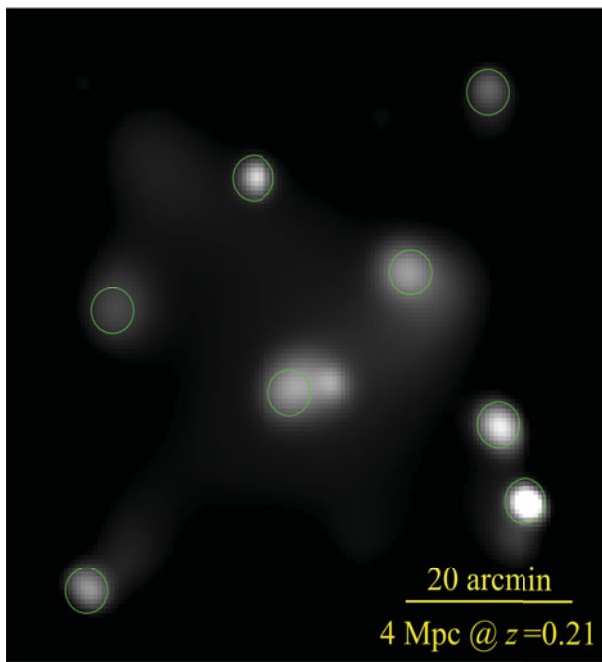
- Método para se detectar aglomerados em surveys fotométricos.

- Observação de galáxias em alto z com população estelar madura (vermelha)
=> pouca evolução da sequência vermelha.
galáxias com alta massa estelar formam estrelas de maneira mais intensa no passado
==> "downsizing".



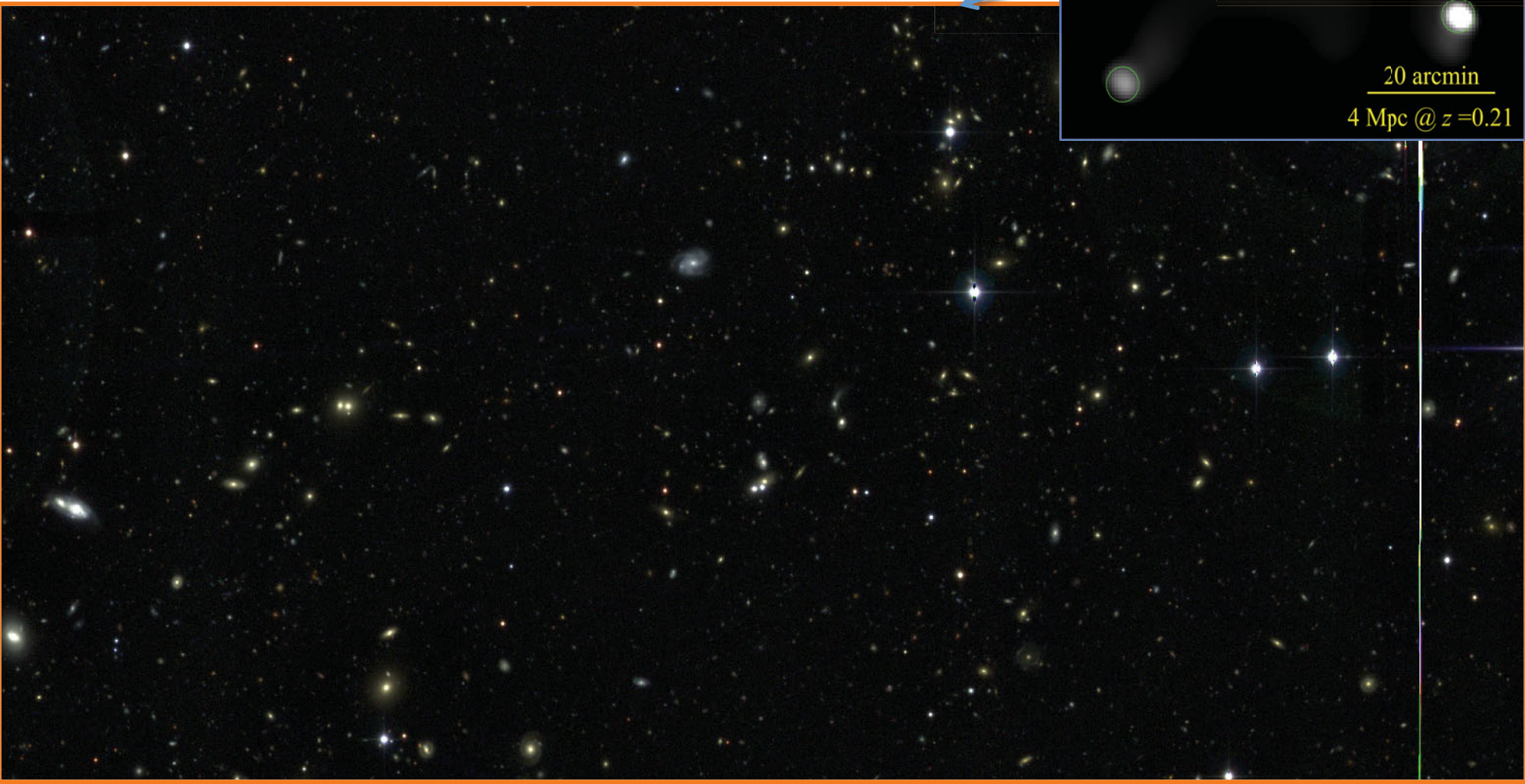
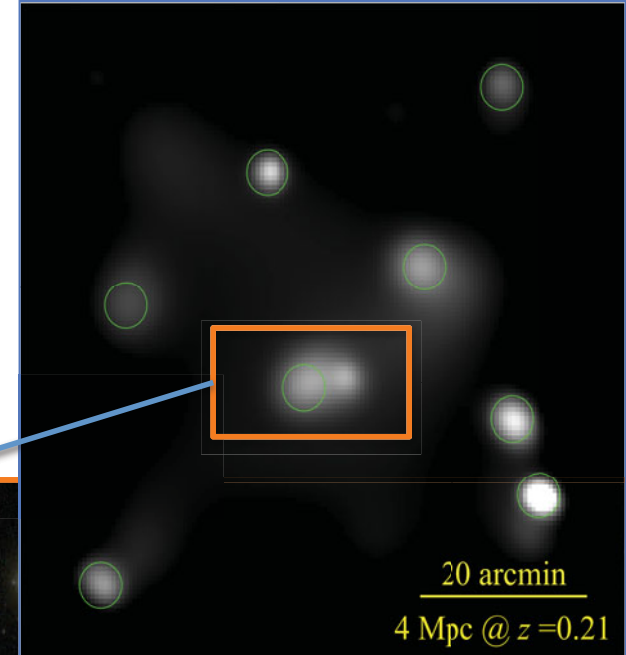
Dynamics and galaxy population in a supercluster environment

- SC0028, a supercluster at $z \approx 0.21$
- Observed by Megacam @ CFHT in 09/2010.
- Reduced by the Terapix team in 12/2010, producing 3 20000x20000 pixel images of 0.186 ''/pixel.
- Select galaxies using the red sequence with $r-i$ and $g-r$ colors.
- Adaptively smoothed of the projected density map of galaxy count.



Dynamics and galaxy population in a supercluster environment

- Identify clusters/groups as well as background galaxies
- Weak lensing mass reconstruction
- Combine with redshift catalogue (O'Mill et al. 2014 in prep.).



Efeitos de aglomerados em galáxias e vice-versa

Efeitos do aglomerado nas galáxias	Efeitos das galáxias no aglomerado
Segregação morfológica	Enriquecimento do ICM em metais
Galáxia Gigante (cD)	Aquecimento do ICM
Perda de gás das espirais	Injeção de partículas relativísticas
Efeito Butcher-Oemler	



- Exemplo de galáxia tipo cD
- AWM 4/NGC 6051,
 $z = 0.03195$
- Principal característica é seu envelope estelar estendido.
 - ✓ Captura de estrelas
 - ✓ Canibalismo
 - ✓ Luz intra-aglomerado

Imagem grz MegaCam/CFHT

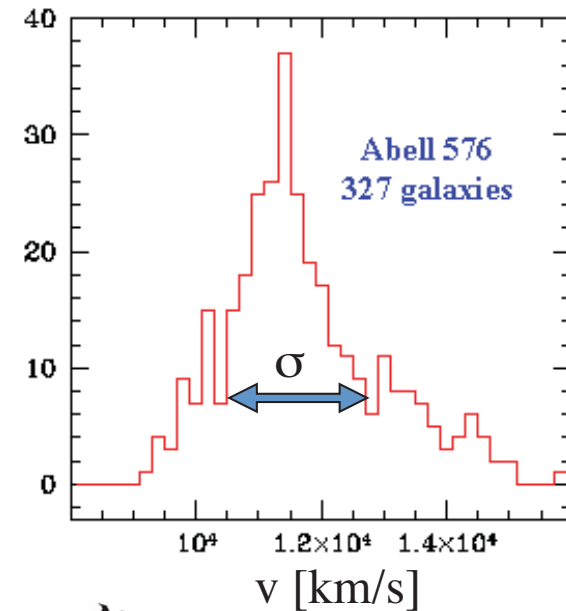
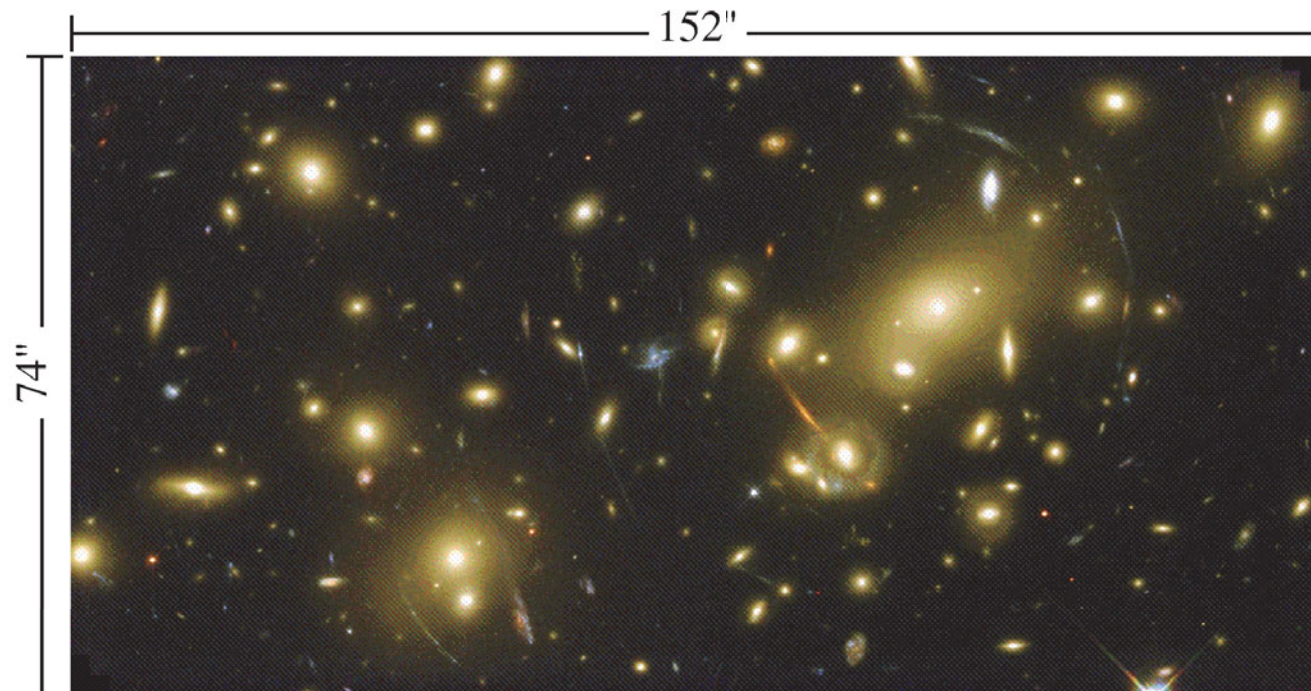
Composição de aglomerados

- **Matéria escura:** $\sim 80\%$ da massa.

✓ equilíbrio hidrodinâmico do gás (raios-X): $\frac{1}{\rho} \nabla P = -\nabla \phi$

✓ teorema do virial (galáxias): $2T + U = 0$

✓ lentes gravitacionais



Abell 2218
HST

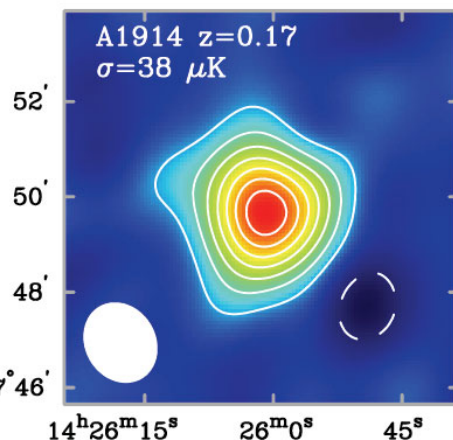
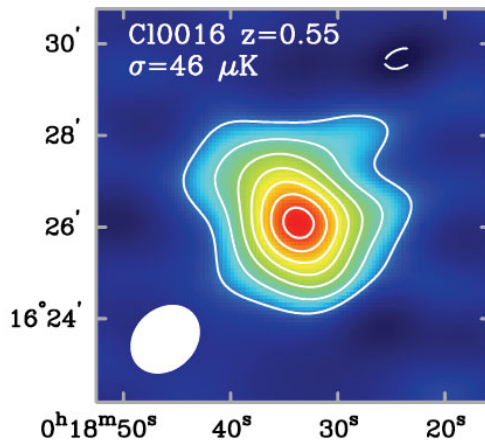
Composição de aglomerados

- **Gás intra-aglomerado:** $\sim 18\%$ da massa

✓ emissão em raios-X

✓ ram-pressure

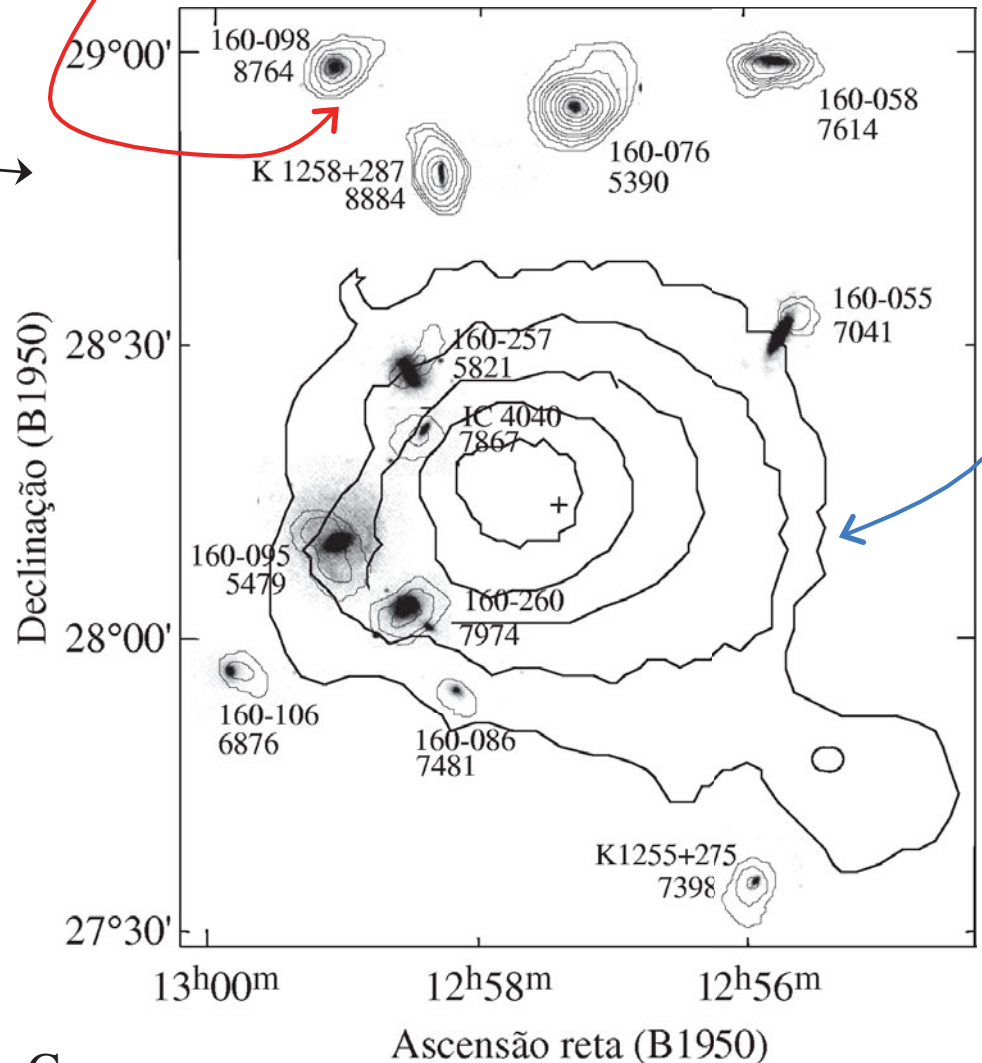
✓ efeito SZ:



Reese 2003

HI (galáxias) VLA

Gas intra-aglomerado (ROSAT)



Coma

Bravo et al. 1999

Efeito Sunyaev-Zel'dovich (micro-ondas)

- Espalhamento compton-inverso dos fótons da CMB pelos elétrons livres (térmicos, $kT \sim \text{keV}$) do gás intra-aglomerado.

- Parâmetro Compton:
$$y = \frac{\sigma_T}{m_e c^2} \int kT(l) n_e(l) dl$$
 ← $n k T = \text{pressão}$

- Relacionado com a variação da temperatura da CMB:

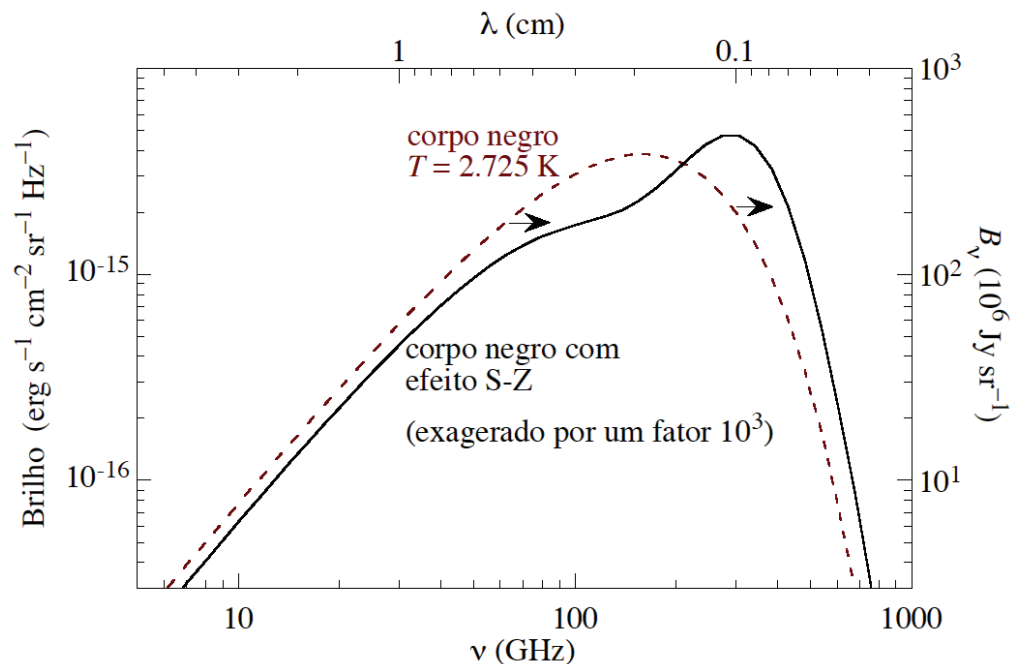
✓ válido no regime Rayleigh-Jeans

$$\frac{\Delta T_{\text{CMB}}}{T_{\text{CMB}}} = -2 y$$

- Espectro de corpo negro deformado

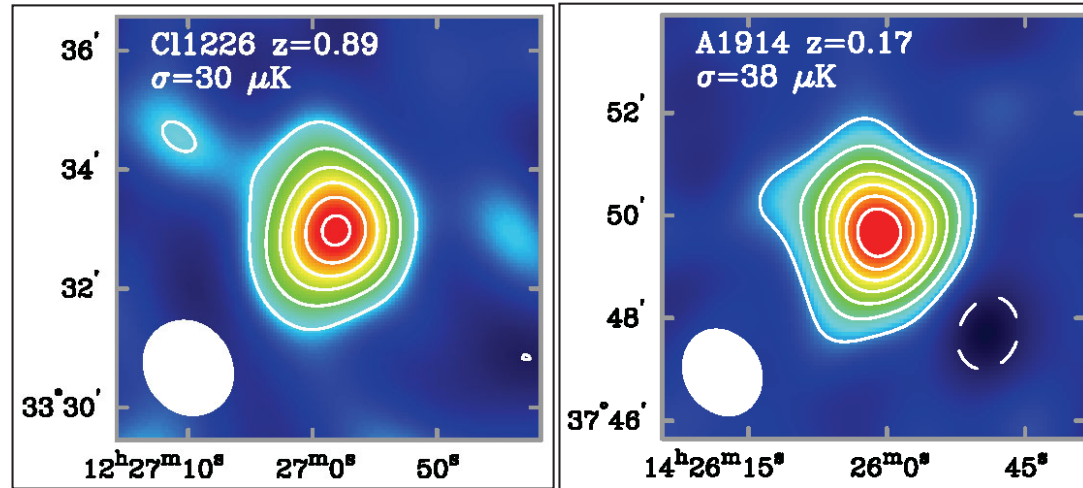
✓ temperatura aparentemente menor quando medida em rádio

✓ $\Delta T/T \sim 10^{-4} - 10^{-5}$.
(ordem de grandeza das perturbações de temperatura primordiais)



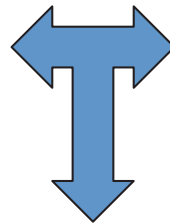
Efeito Sunyaev-Zel'dovich

- Sinal não depende da distância (redshift).
- Limitado por resolução espacial (ainda...).
- Combinando com observação em raios-X, indicador de distância.



mapas de decréscimo de temperatura da CMB note a diferença de redshift

$$\Delta T_{\text{CMB}}/T_{\text{CMB}} \propto \int n_e T_X dl$$

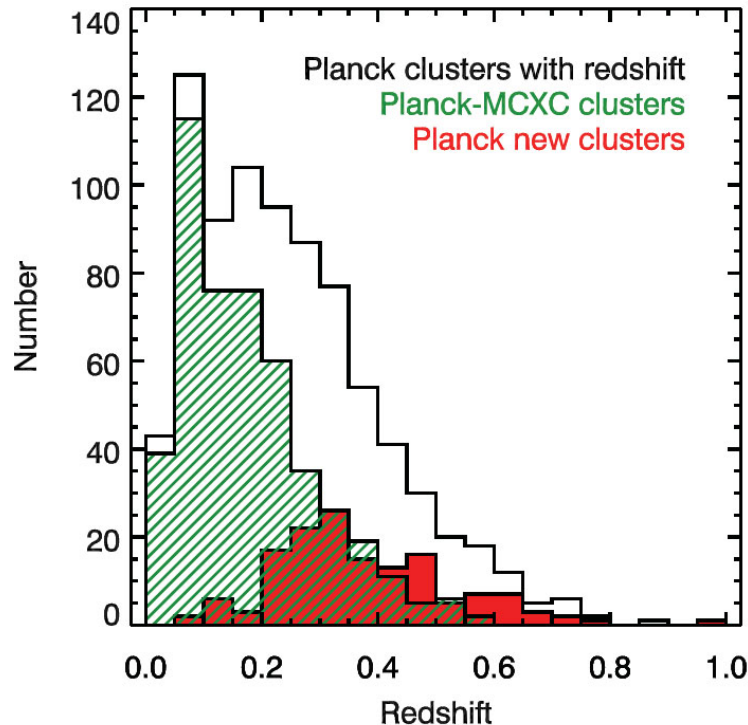


$$L_X = 4\pi f_X d_L^2 \propto \int n_e^2 \Lambda(T_X) dV$$

$$d_A \approx 4 \left(\frac{\Delta T/T}{10^{-5}} \right)_{\text{CMB}}^2 \left(\frac{f_X}{10^{-11}} \right)^{-1} \left(\frac{T_X}{10^8 \text{K}} \right)^{-3/2} \theta_c \text{ Mpc}$$

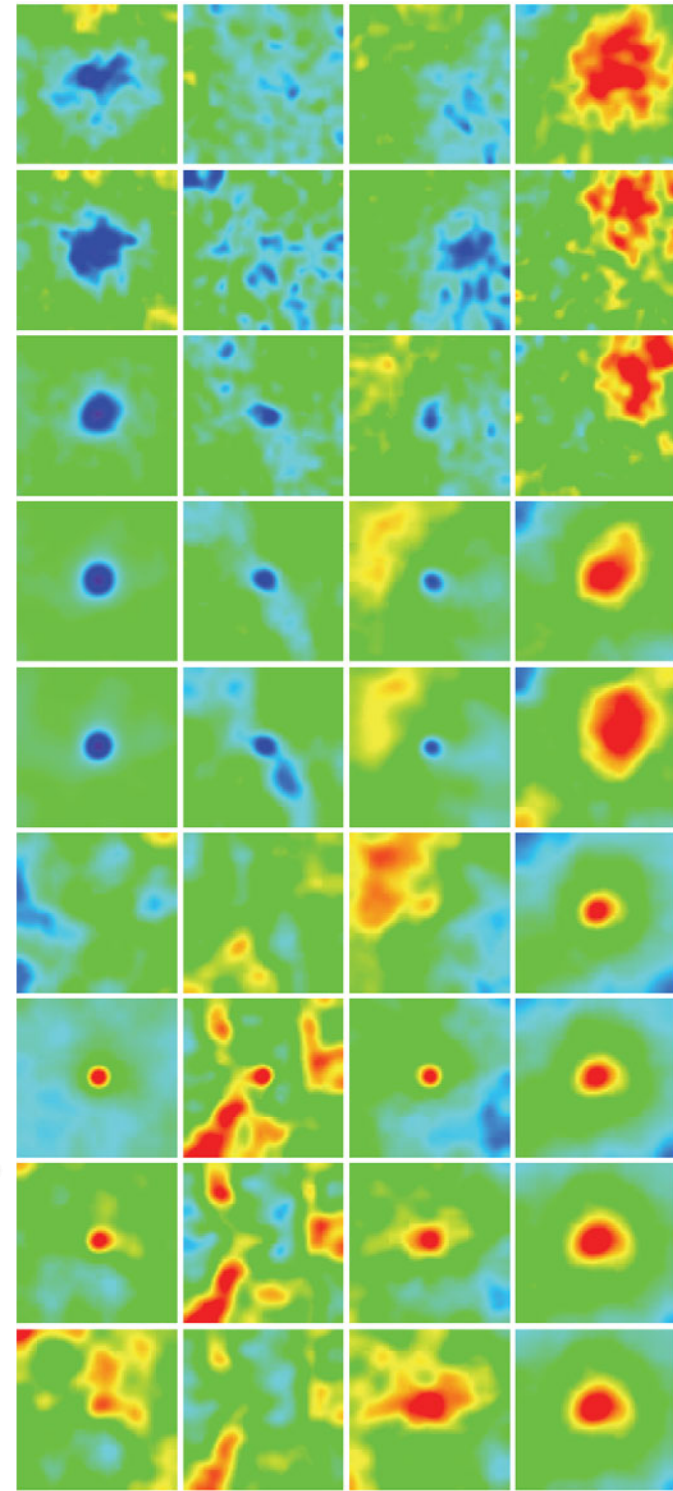
Efeito Sunyaev-Zel'dovich

- Procura de aglomerados.
- Primeiros catálogos: Planck e SPT.
- Dificuldades: resolução espacial, necessidade de várias bandas (para não confundir com outras flutuações da CMB).



Imagens nos canais do Planck, de 30 a 857 GHz.
Planck Collaboration, 2013

frequência aumenta



Planck SZ catalogue;
é o mais profundo
all-sky.
 $0.1-1.6 \times 10^{15} \text{ Mo.}$
 $z < 1$.
1227 objetos.

Determinação de massa

- Problema da “massa faltante” ou matéria escura
 - ✓ Zwicky 1933, Smith 1936
- $M/L \sim 8$ para galáxias elípticas. Com 10^2 galáxias com $10^{10} L_{\odot}$, esperaríamos uma massa $M \sim 10^{13} M_{\odot}$.
Massa medida dinamicamente, $M \sim 10^{15} M_{\odot}$.

Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln

von F. Zwicky.

(16. II. 33.)

Inhaltsangabe. Diese Arbeit gibt eine Darstellung der wesentlichsten Merkmale extragalaktischer Nebel, sowie der Methoden, welche zur Erforschung derselben gedient haben. Insbesondere wird die sog. Rotverschiebung extragalaktischer Nebel eingehend diskutiert. Verschiedene Theorien, welche zur Erklärung dieses wichtigen Phänomens aufgestellt worden sind, werden kurz besprochen. Schliesslich wird angedeutet, inwiefern die Rotverschiebung für das Studium der durchdringenden Strahlung von Wichtigkeit zu werden verspricht.

Determinação dinâmica: teorema do virial

- Sistemas em equilíbrio: $2K + U = 0$
 - ✓ Na verdade, válido para $\langle K \rangle$ e $\langle U \rangle$, a média feita no tempo.

- Para um sistema de N corpos:

$$2K + U = \frac{1}{M} \sum_i m_i v_i^2 - \frac{GM}{r_g} = 0$$

- Portanto:

$$M = \frac{r_g \overline{v^2}}{G}$$

- Não pode ser utilizado diretamente ==> necessitamos de uma expressão que dependa de grandezas observáveis.

✓ estimadores do teorema do virial: quanto mais galáxias melhor!

✓ por exemplo:

$$M = k_{\text{geo}} \frac{R_{\text{eff}} \sigma_0^2}{G}$$

- Estimadores robustos (testados com simulações):

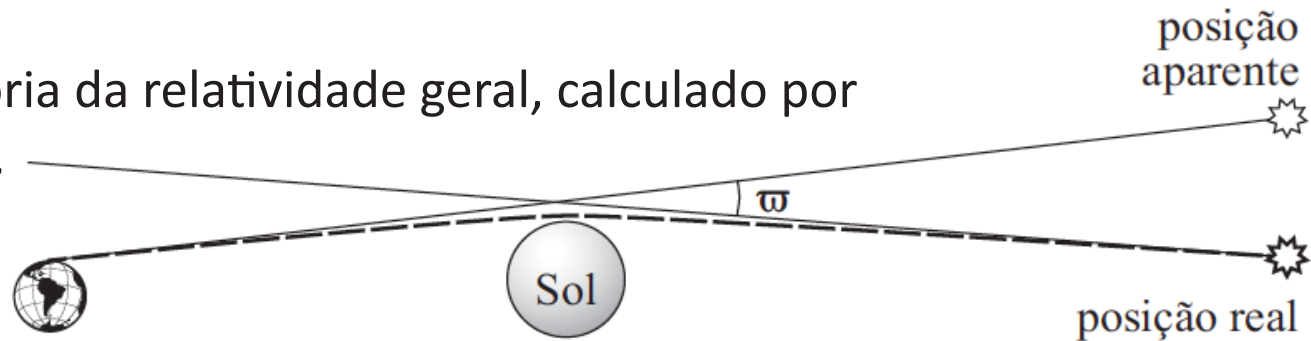
$$M = \frac{3\pi N}{2G} \frac{\sum_i \overline{v_z^2}}{\sum_{i < j} (1/R_{\perp})}$$

$$M = \frac{k}{G(N - \alpha)} \sum_i v_z^2 R_{\perp}$$

Determinação de massa: lentes gravitacionais

- Desvio gravitacional da luz calculado por Johann von Soldner (1804) usando mecânica newtoniana.

- Predito pela teoria da relatividade geral, calculado por de Sitter (1916).



- Verificado em 05/1919 no eclipse de Sobral, Ceará.

- Imagens múltiplas de QSOs em 1979 (Walsh et al.).

- Arcos gravitacionais (deformação da imagem) em 1987, Soucail et al; Lynds & Petrosian.

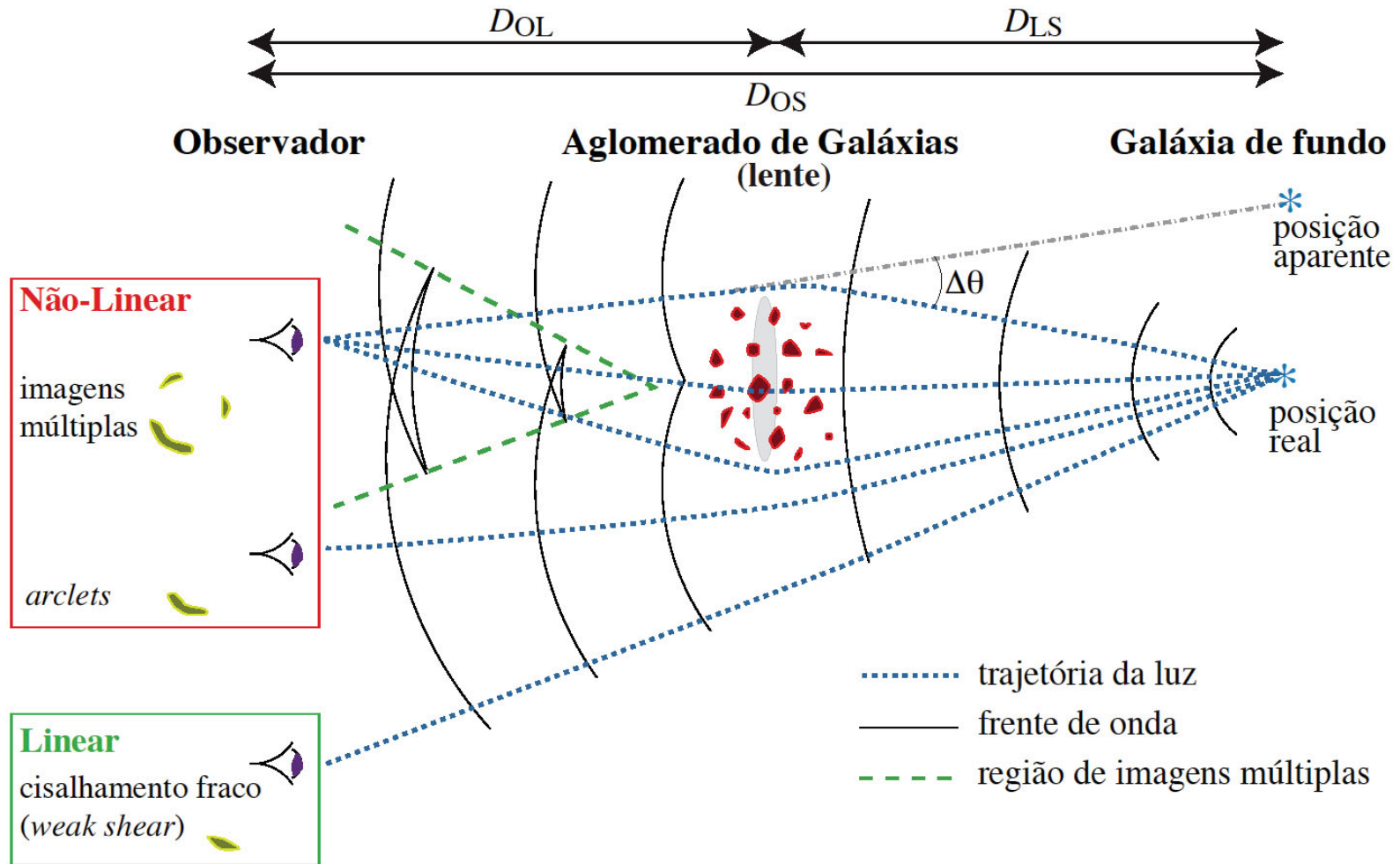


Determinação de massa: lentes gravitacionais

- O brilho superficial da imagem produzida por uma lente é invariante.
- Como o tamanho da imagem muda, a imagem pode aparecer mais brilhante: "telescópio gravitacional".

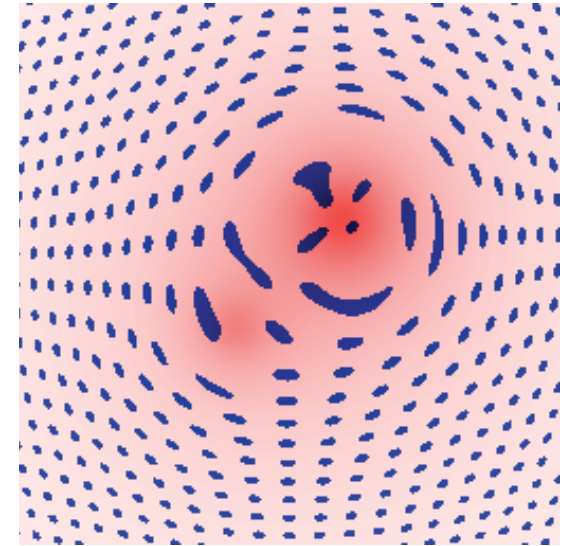
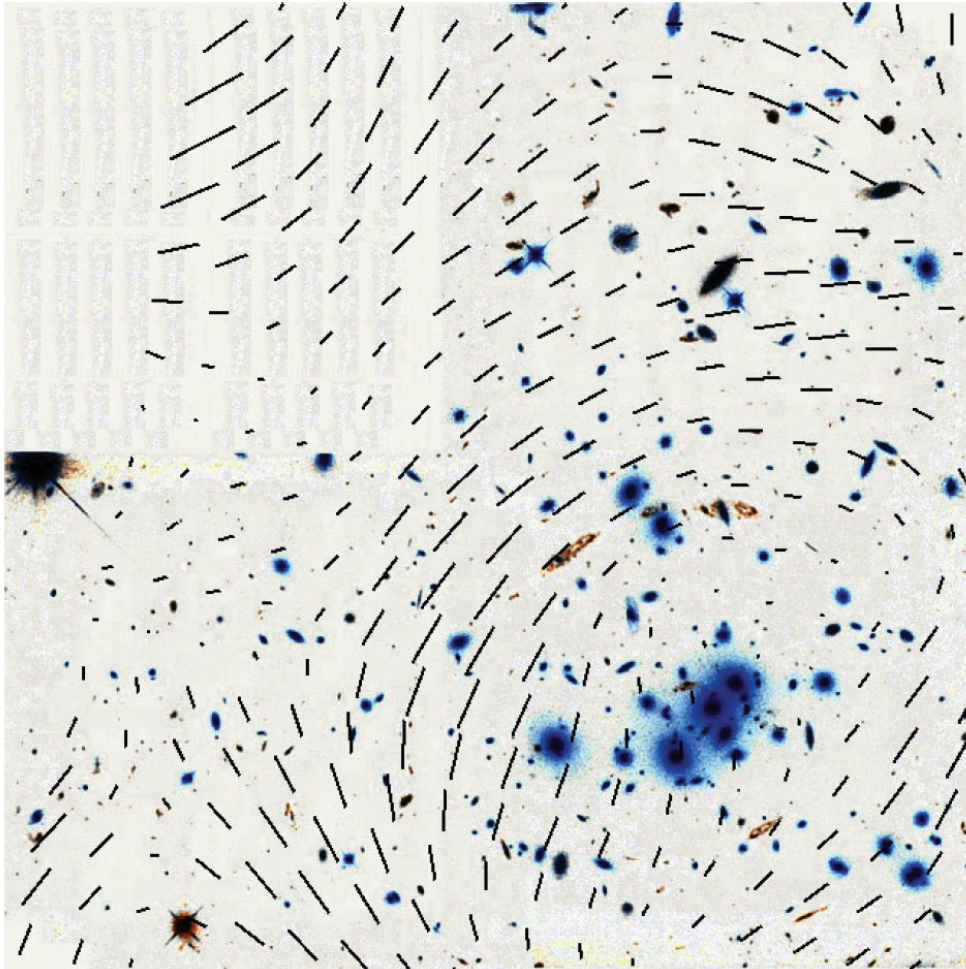


Arcos gravitacionais

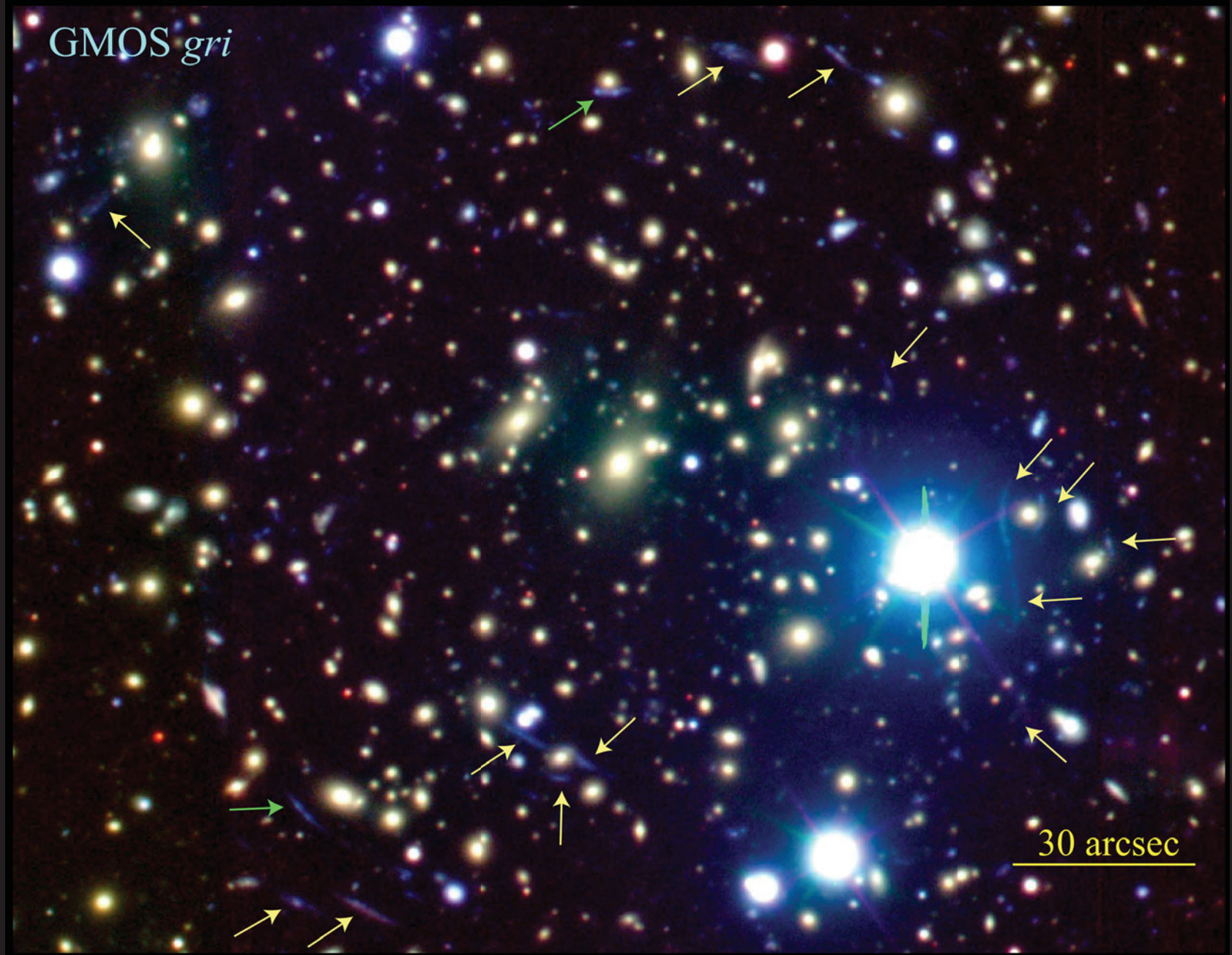


Cisalhamento (shear)

- Deformação sistemática das galáxias de fundo.
 - ✓ alinhamento com o potencial gravitacional projetado.

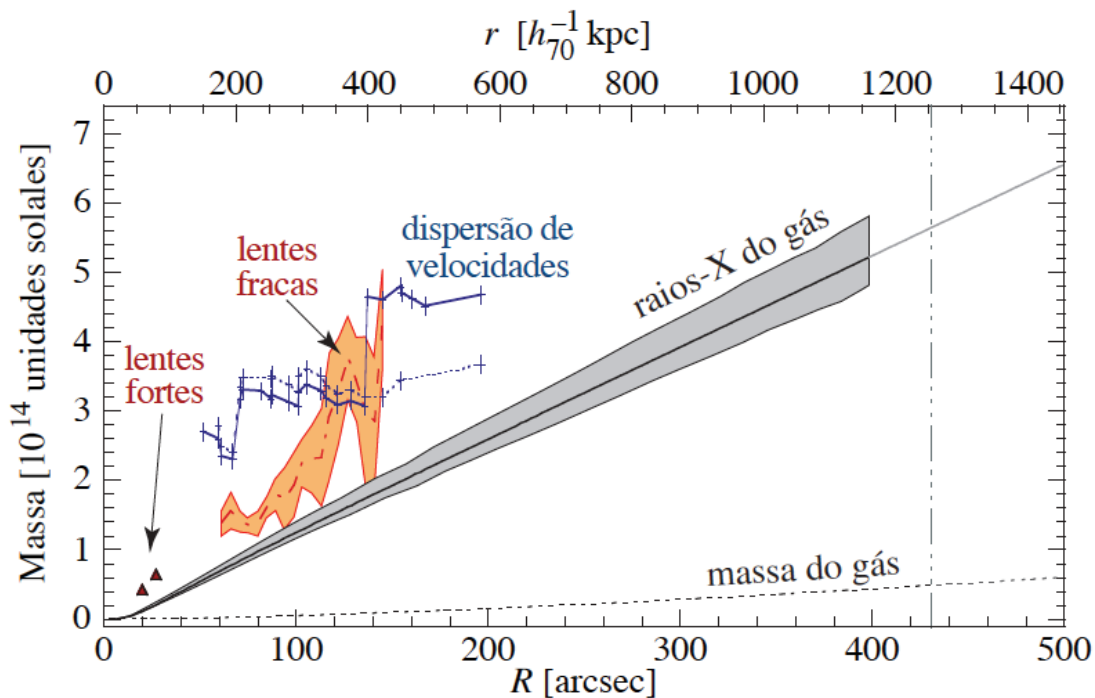


animação de Ned Wright

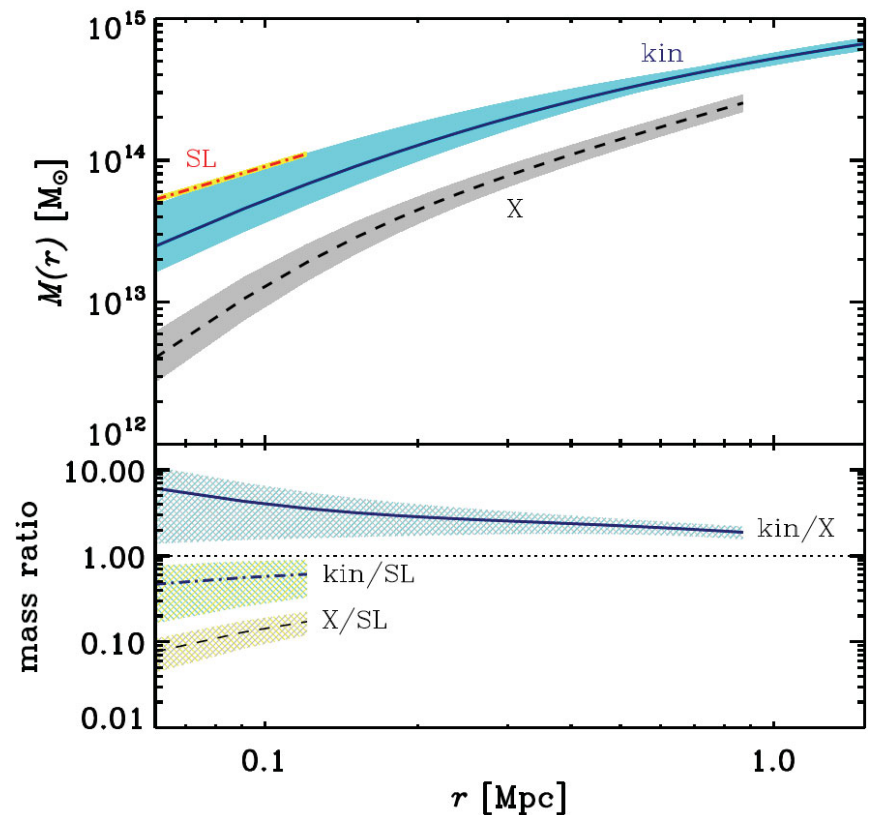


- Imagem obtida com Gemini-South/GMOS de um aglomerado detectado pelo satélite Planck.

Comparação entre diversos métodos



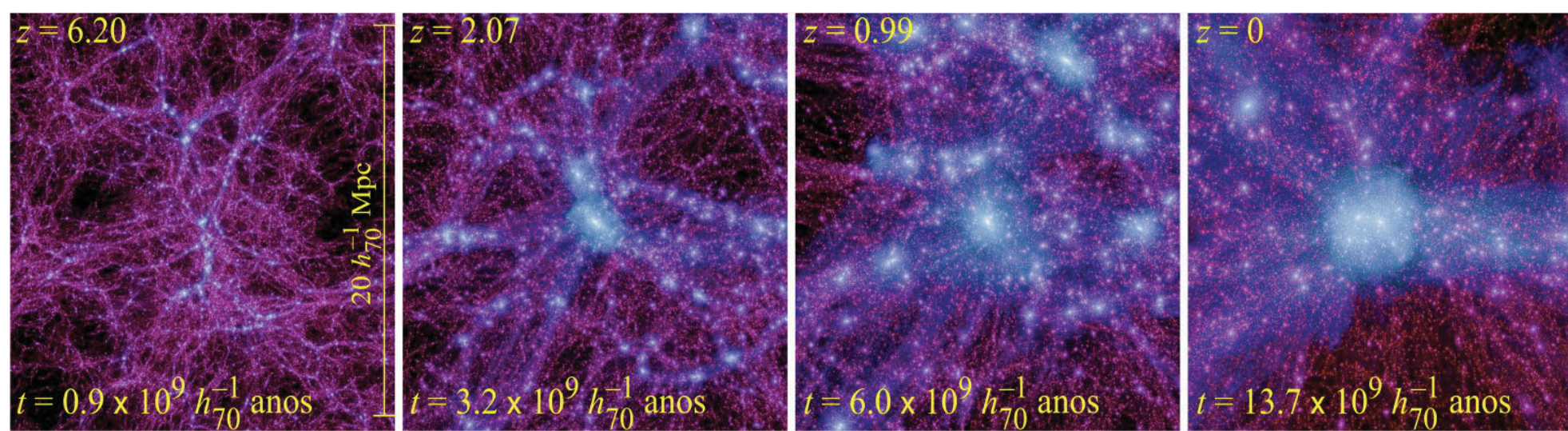
Aglomerado próximo, Abell 586, $z=0.171$;
Cypriano +05



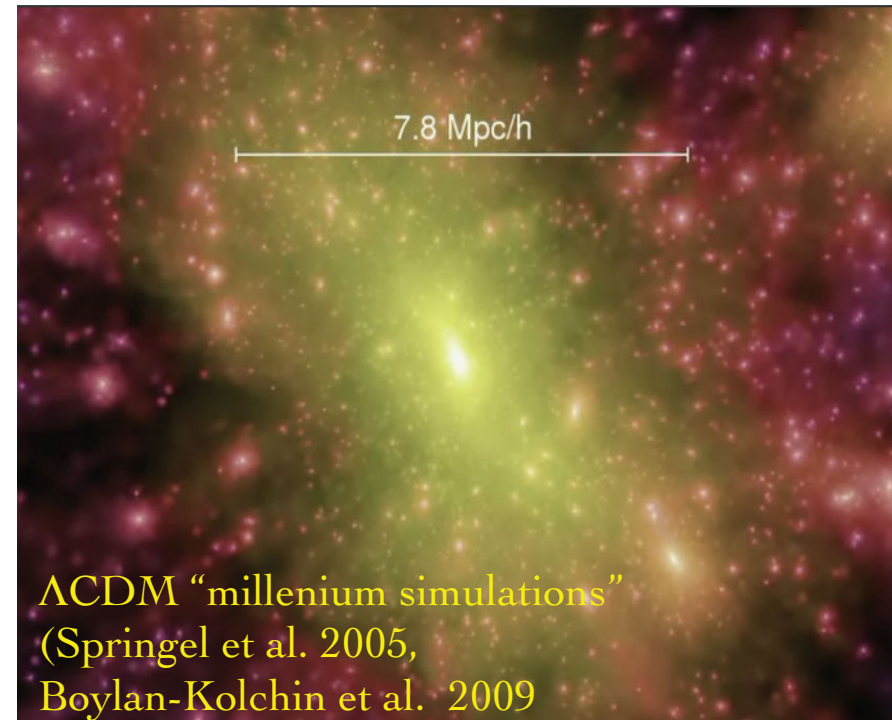
Aglomerado distante, LCDCS
0504, $z = 0.8$; Guennou +14

Discrepância atribuída (inferior a 2 sigma) a fatores dinâmicos e/ou efeitos de projeção e/ou ação de feedback.
Acordo entre determinações de massa é suficientemente bom para dar suporte à hipótese de matéria escura.

Aglomerado de galáxias => halos de matéria escura

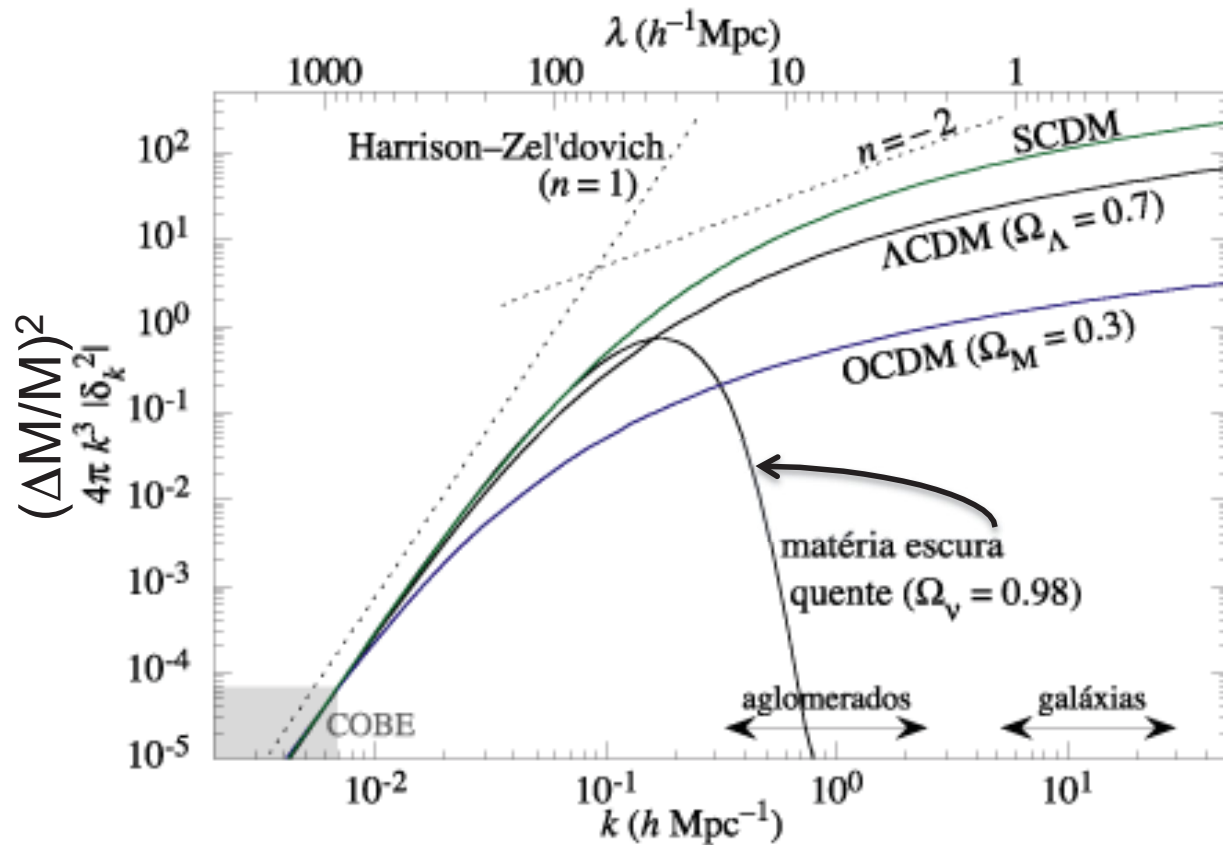


- Aglomerados $\Rightarrow$ intersecção/nós nos filamentos cósmicos de CDM
- Cenário hierárquico de formação de estrutura em grande escala (universo Λ CDM):
 - $\Rightarrow$ Aglomerados ainda estão se formando.
 - $\Rightarrow$ queda de matéria ao longo dos filamentos.

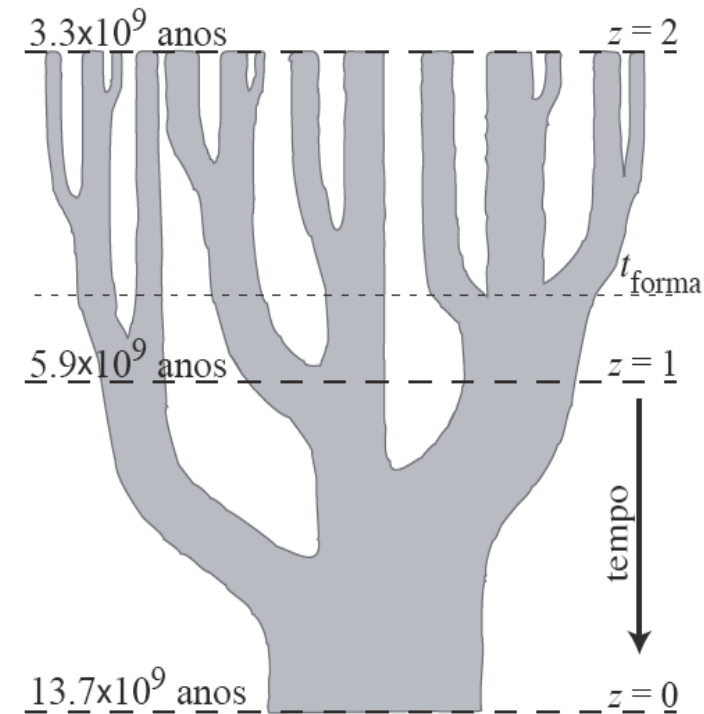


Large scale structure formation

- Λ CDM scenario => Hierarchical formation, from small to large scale



Power spectrum of density fluctuations



“merging tree” showing the events leading to the formation of a massive halo at $z = 0$ (Lacey & Cole 1993).

Emissão de raios-X do
meio intra-aglomerado

Descoberta de emissão difusa

- Primeiras observações
- Boldt et al. (1966); Felten et al. (1966): detecção de fonte extensa na direção do aglomerado de Coma por experimento em balão.

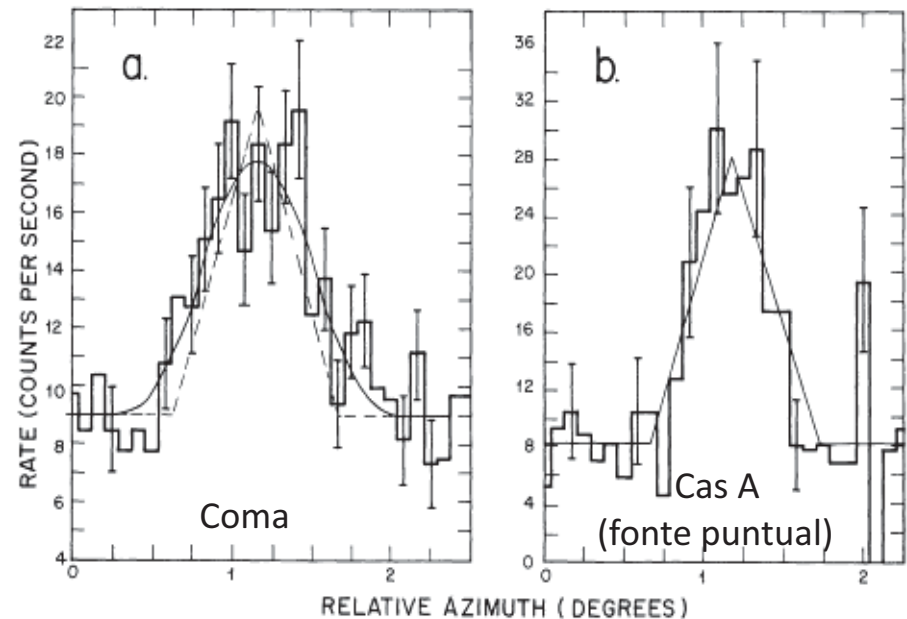
- Detecção confirmada em 1971 pelo satélite Uhuru (Coma e Virgo).
- Entre 1974 e 1980, observações com satélite Ariel V mostra que todos os aglomerados ricos e próximos ($z < 0,1$) são fontes extensas de raios-X.

- Qual seria o mecanismo de emissão?
 - ✓ Debate até 1974. Detecção das linhas de Fe.
 - ➔ Plasma difuso e quente.

L82

H. GURSKY ET AL. (1971)

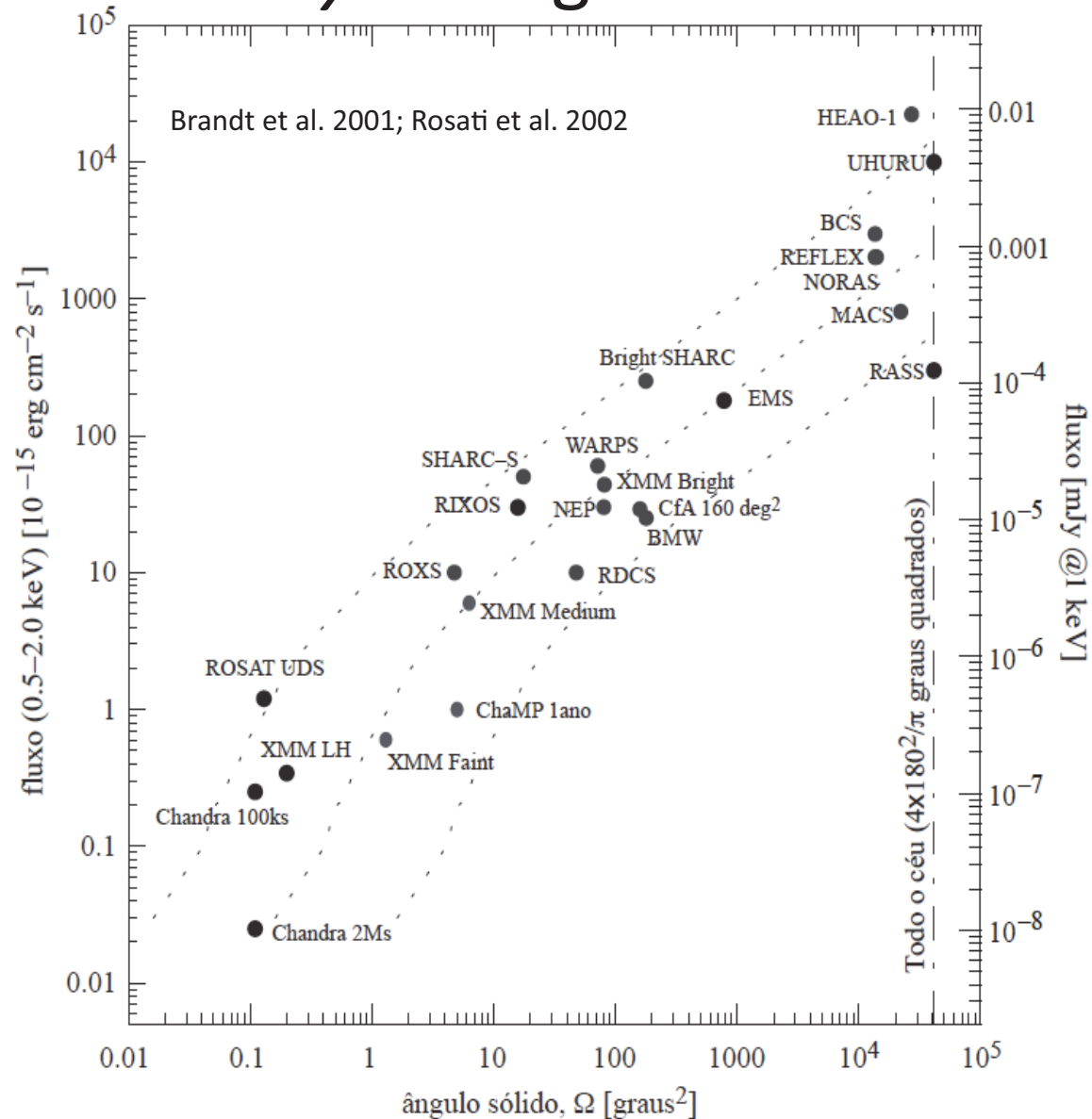
Vol. 167



Contagens de fótons de raios-X em função da posição.
[Uhuru]

Função de seleção de *surveys* de aglomerados

- Para referência, 10^{-12} erg/s/cm² corresponde a cerca de 1 fóton/minuto / cm² (@ 2 keV).
 - ✓ Uma observação com um detector de 300 cm² (área efetiva) durante 60 ks, obteríamos cerca de 5600 contagens.
- Emissão em raios-X proporciona um meio eficaz de identificar aglomerados de galáxias.
- Os catálogos mais “populares” ainda são baseados nas observações do ROSAT, o único satélite que fez um *survey* do céu inteiro.
- REFLEX, p. ex., fluxo limite $\sim 10^{-12}$ erg/s/cm².
- Catálogos mais profundos, mas área do céu muito menor.

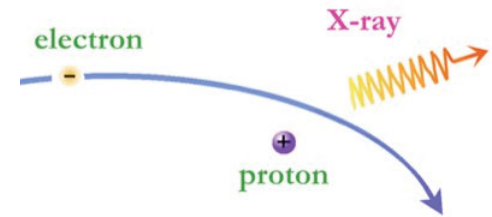


Contínuo bremsstrahlung

- Bremsstrahlung térmico:

Plasma opticamente fino, equilíbrio colisional

- ✓ hipótese: distribuição de velocidades maxwelliana dos elétrons e íons
- ✓ equipartição de energia
- ✓ espalhamento elétron – próton
(principalmente, ~90% dos íons são prótons)

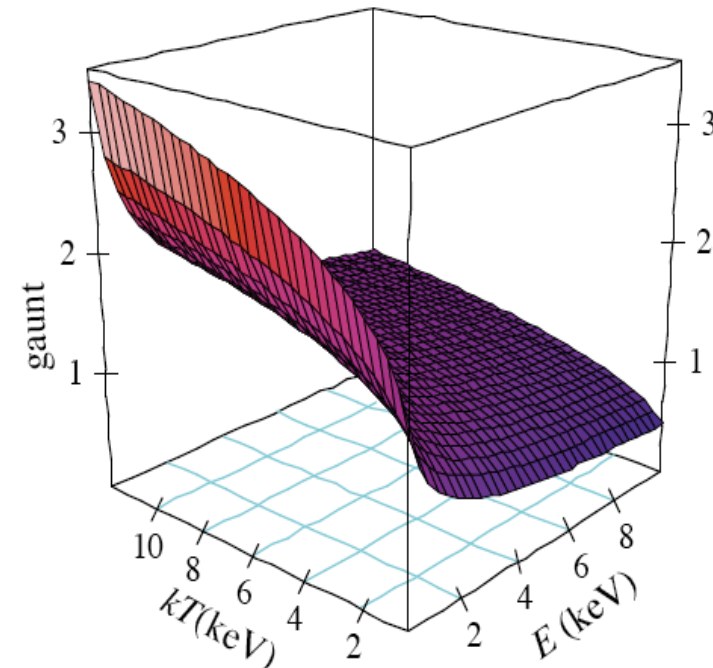


- $$\varepsilon_\nu \equiv \frac{dE}{dV dt d\nu} = 6,8 \times 10^{-38} Z^2 n_e n_i T^{-1/2} e^{-h\nu/kT} g(E,T) \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-3} \text{ Hz}^{-1}$$

- Para um plasma primordial (~ 24% massa de He):

$$Z^2 n_e n_i \sim 1,4 n_e^2.$$

- $g(E,T) \Rightarrow$ fator de Gaunt: correções relativísticas e quânticas para espalhamento com pequeno parâmetro de impacto e/ou $E_{\text{fóton}} > kT$.
 - ✓ Para aglomerados $g(E,T) \sim 1,0\text{--}1,5$



Gás intra-aglomerado: raios-X

- A componente do aglomerado responsável pela emissão de raios-X é o plasma intra-aglomerado.
 - ✓ cerca de 13% da massa total de um aglomerado
 - ✓ 6 vezes mais massa do que o conjunto de galáxias no aglomerado.
- Características:
 - ✓ $T \sim 10^7 - 10^8$ K [para comparação, núcleo do Sol $\sim 1,5 \times 10^7$ K]
 - ✓ Geralmente é utilizada unidades de energia: keV
 - ✓ $kT \sim 2 - 12$ keV
 - ✓ densidade central $\sim 10^{-2} - 10^{-3} \text{ cm}^{-3}$ (muito mais rarefeito que ISM).
 - ✓ Enriquecido em metais. $Z \sim Z_{\odot}/3$.
 - Linhas de emissão de elementos ionizados: Fe XXV, XXVI.
Também elementos alfa (O, Si, S) e grupo do Fe (Ni).

Fração de bárions

- Se aglomerados são um “fair sample” do Universo, devemos ter:

Aglomerados: $\frac{M_B/V}{M_{\text{total}}/V} = \frac{\rho_B}{\rho_{\text{total}}}$



$$\frac{M_B}{M_{\text{total}}} = \frac{\Omega_B}{\Omega_M}$$

Universo: $\frac{\Omega_B}{\Omega_M} = \frac{\rho_B/\rho_c}{\rho_M/\rho_c} = \frac{\rho_B}{\rho_M}$

- Em 1993, White et al. usaram este argumento para por em evidência um problema do cenário SCDM (Universo Einstein – de Sitter):

$$\frac{\Omega_B}{\Omega_M} = 0,15 \quad \Rightarrow \quad \Omega_M = \frac{0,02h^{-2}}{0,15} \quad \begin{array}{l} \text{(nucleossíntese primordial)} \\ \text{(medido em aglomerados)} \end{array}$$

- Se $\Omega_M = 1 \quad \Rightarrow \quad h = 37 \text{ km/s/Mpc}$

Gás intra-aglomerado

- Luminosidade total em raios-X: $L_X \sim 10^{43} - 10^{45} \text{ erg/s}$.
- Para comparação:
 - ✓ QSOs, Seyferts: podem chegar a $L_X \sim 10^{44} \text{ erg/s}$.
 - ✓ Espirais gigantes (p. ex., Via Láctea, M31): $L_X \sim 10^{39} \text{ erg/s}$.
 - ✓ Variáveis cataclísmicas: $L_X \sim 10^{32} - 10^{38} \text{ erg/s}$.
 - ✓ Sol (estrelas tipo GV): $L_X \sim 10^{28} \text{ erg/s}$.
- Aglomerados podem emitir tanta energia em raios-X quanto no óptico:
 - ✓ $L_{\text{óptico}} \sim 100 \text{ galáxias } L^* \sim 10^{45} \text{ erg/s}$

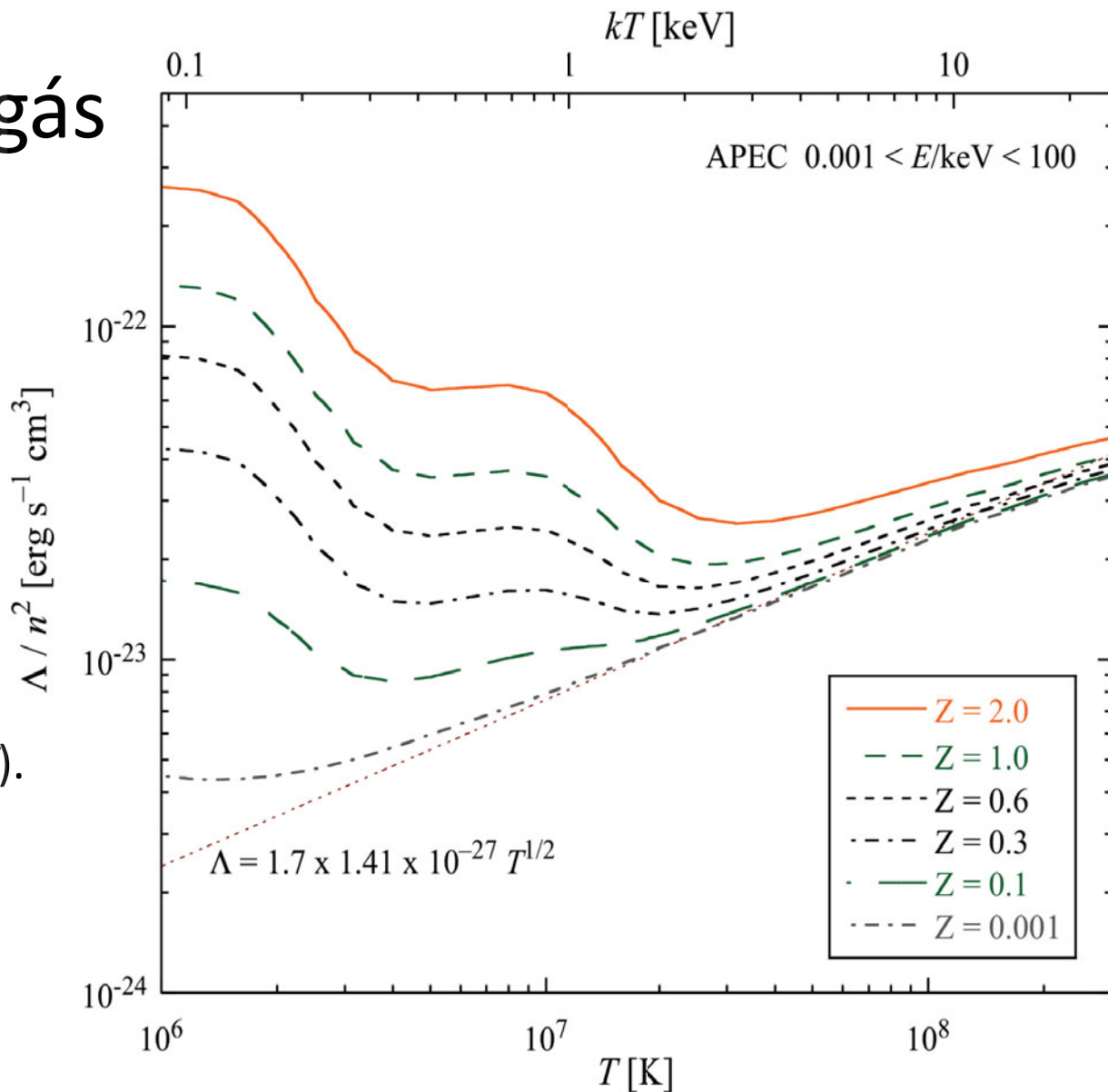
Porque o gás é quente e enriquecido?

- Em $z = 1100$ (recombinação), $T_{\text{matéria}} = 3000$ K e metalicidade nula.
- Aglomerados colapsam em $z \sim 1$.
- Qual mecanismo que aquece o gás do meio intra-aglomerado de alguns ~ 10 K até ~ 1 keV?
- (1) Aquecimento por choque durante o colapso.
- (2) Aquecimento por supernovas das 1^{as} gerações de estrelas (starbursts das galáxias que estão no aglomerado).
 - ✓ Isto ocorre (em parte pelo menos), pois o gás é enriquecido (em parte pelo menos) por metais ejetados em ventos galácticos.
 - ✓ Fonte de elementos alfa (SN II).
 - ✓ $\sim 10^{51}$ erg/evento $\rightarrow$ precisaria de $\sim 10^{11}$ supernovas

Resfriamento do gás

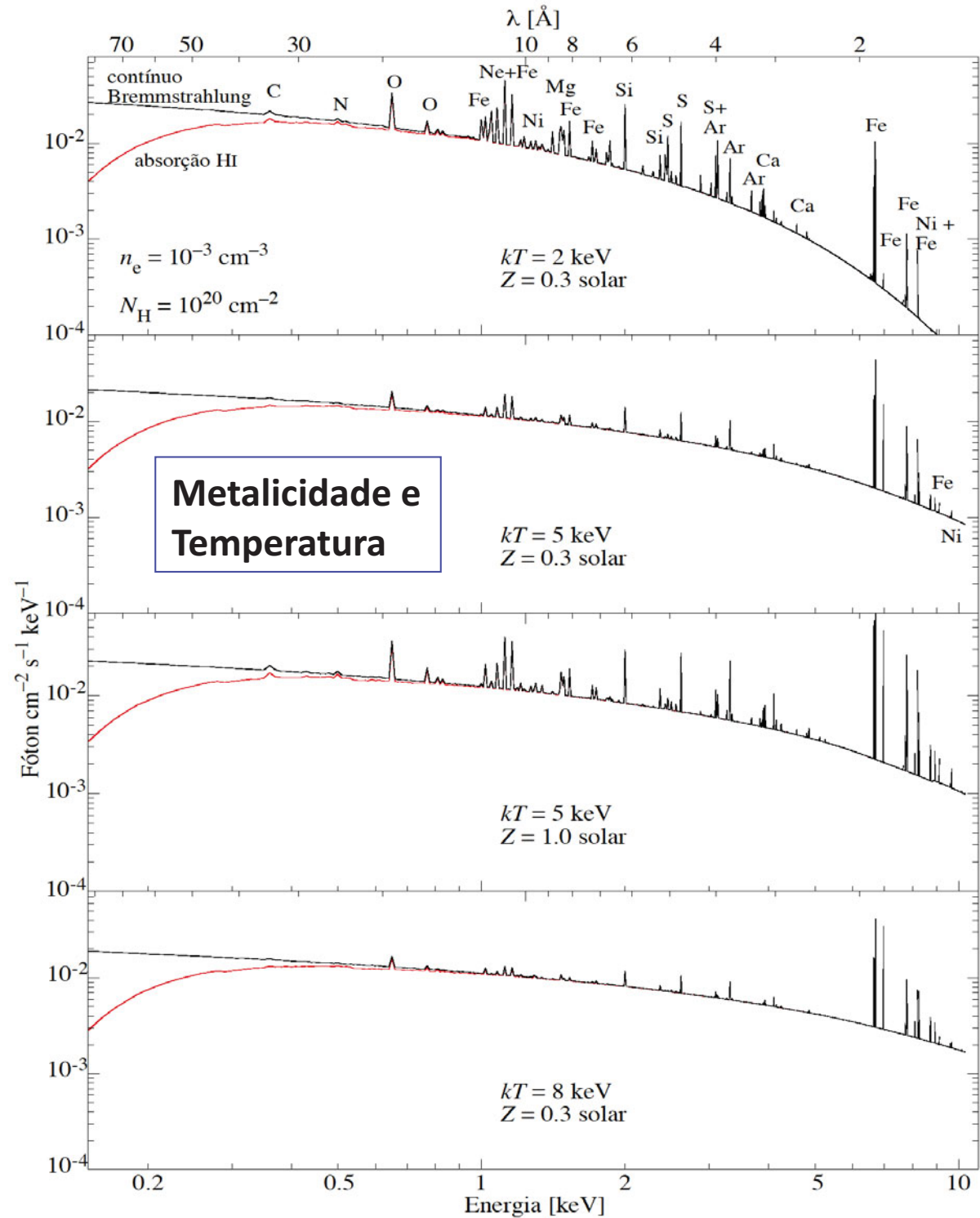
- Função de resfriamento, $\Lambda(T)$.
- $\Lambda(T) = \varepsilon(T)/n^2$
- Para Bremsstrahlung:

$$\varepsilon \equiv \frac{dE}{dV dt} = 1,426 \times 10^{-27} Z^2 n_e n_i T^{1/2} g(T) \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-3}$$



Espectro do plasma intra-aglomerado

- Absorção pelo hidrogênio neutro da Galáxia para $E < 1\text{--}2\text{ keV}$.
✓ $N_{\text{H}} \sim 10^{20}\text{--}10^{22}\text{ cm}^{-2}$.
- Queda exponencial a partir de $E \sim kT$.
- Para $kT > 1,5\text{ keV}$, complexo de linhas do Fe XXV e XXVI em $6,8/(1+z)\text{ keV}$.
✓ linhas K (caem no nível fundamental).
✓ Por volta de $1/(1+z)\text{ keV}$, linhas L do Fe (camada $n=2$).



Imageamento em raios-X

- Emissão bremsstrahlung do gás integrada em energia (imagem):

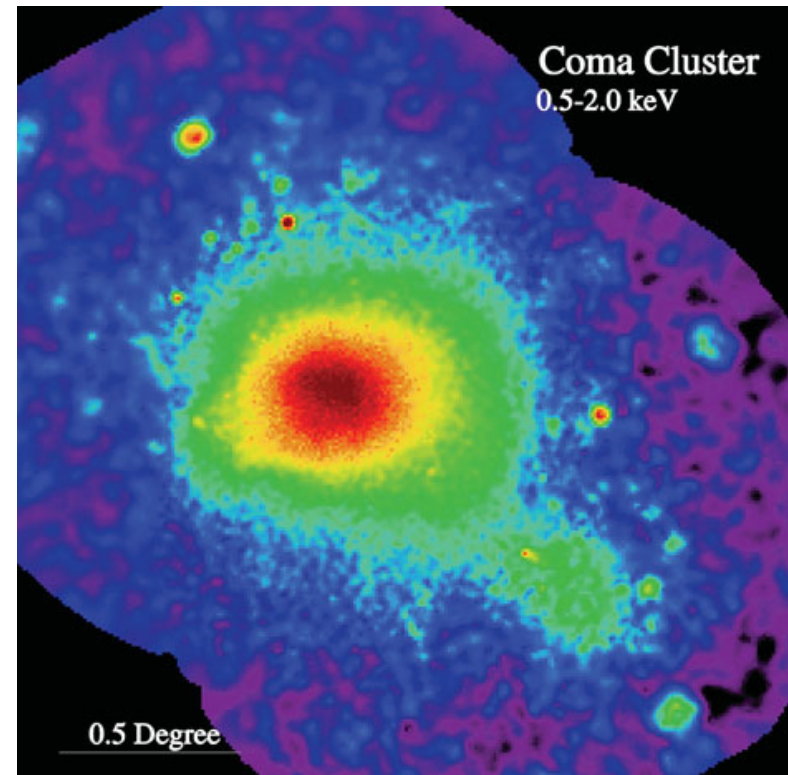
$$\varepsilon \equiv \frac{dE}{dV dt} = 1,426 \times 10^{-27} Z^2 n_e n_i T^{1/2} g(T) \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-3}$$

✓ dependência em n^2 e $kT^{1/2} \Rightarrow$ imagem do gás.

- Perfil de brilho superficial:

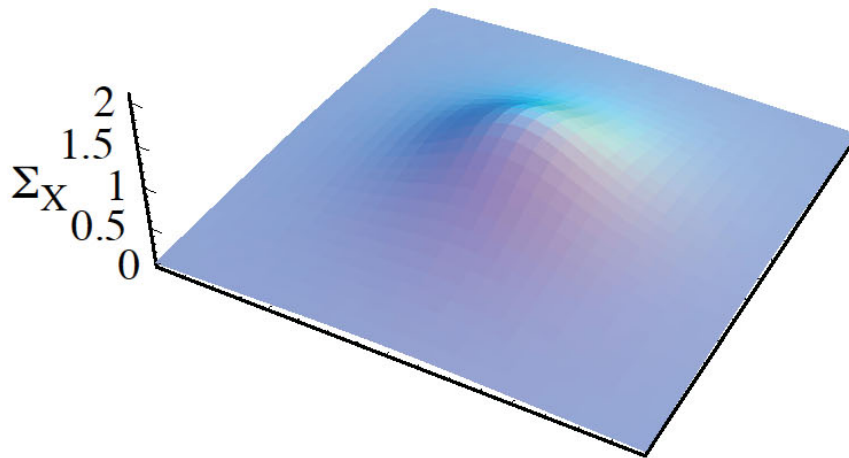
✓ modelo- β (Cavaliere & Fusco-Femiano 1976):

$$\Sigma_X(R) = \Sigma_{X,0} \left[1 + (R/R_c)^2 \right]^{-3\beta+1/2}$$

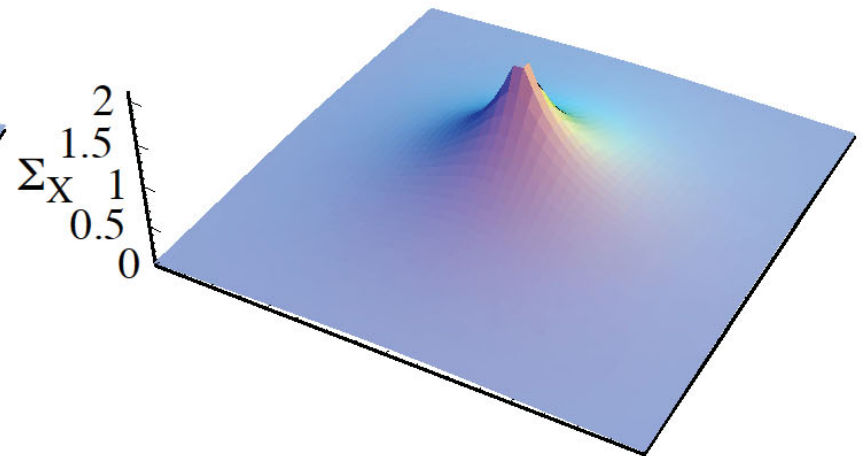


Emissão em raios-X

- Modelo- β não é sempre o mais adequado
 - ✓ aglomerados com pico de emissão no centro



modelo- β



modelo- β + cúspide

- Outros perfis analíticos são usados:
 - Sérsic (Demarco et al. A&A 2003), double- β -model (Xue & Wu, MNRAS, 2000)

Projeção e deprojeção

- Observamos a projeção no plano do céu da emissão em raios-X.

$$\Sigma_X(R) = \int_{-\infty}^{+\infty} \varepsilon(r) dz = 2 \int_R^{\infty} \varepsilon(r) \frac{r dr}{\sqrt{r^2 - R^2}} \propto \int_R^{\infty} n_e^2(r) T^{1/2}(r) \frac{r dr}{\sqrt{r^2 - R^2}}$$

- Para obter a distribuição de densidade do gás
 ➔ Inversão de Abel
 (deprojeção):

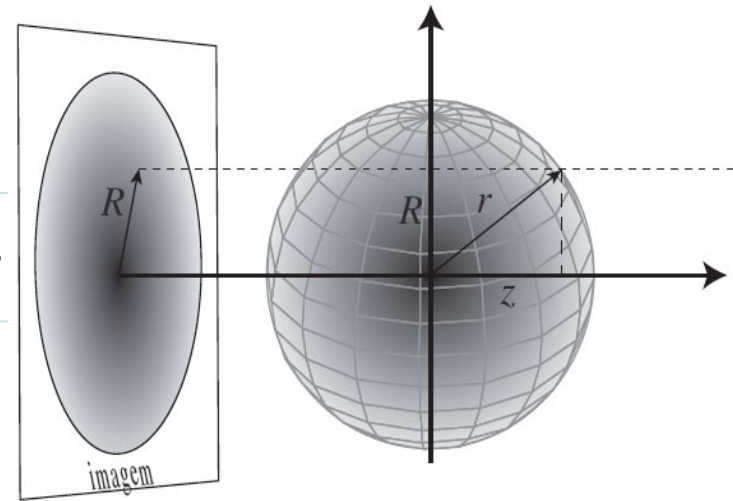
$$n(r) = \left\{ \frac{-1}{\pi \sqrt{T(r)}} \int_r^{\infty} \left(\frac{\partial \Sigma'(R)}{\partial R} \right) \frac{dR}{\sqrt{R^2 - r^2}} \right\}^{1/2} \quad (\text{assumindo gás isotérmico})$$

- Modelo- β é um perfil de densidade que modela satisfatoriamente muitos aglomerados e corresponde a uma inversão simples:

$$n_e(r) = n_0 \left[1 + (r/r_c)^2 \right]^{-3\beta/2}$$

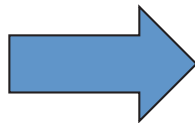
↔

$$\Sigma_X(R) = \Sigma_{X,0} \left[1 + (R/R_c)^2 \right]^{-3\beta+1/2}$$



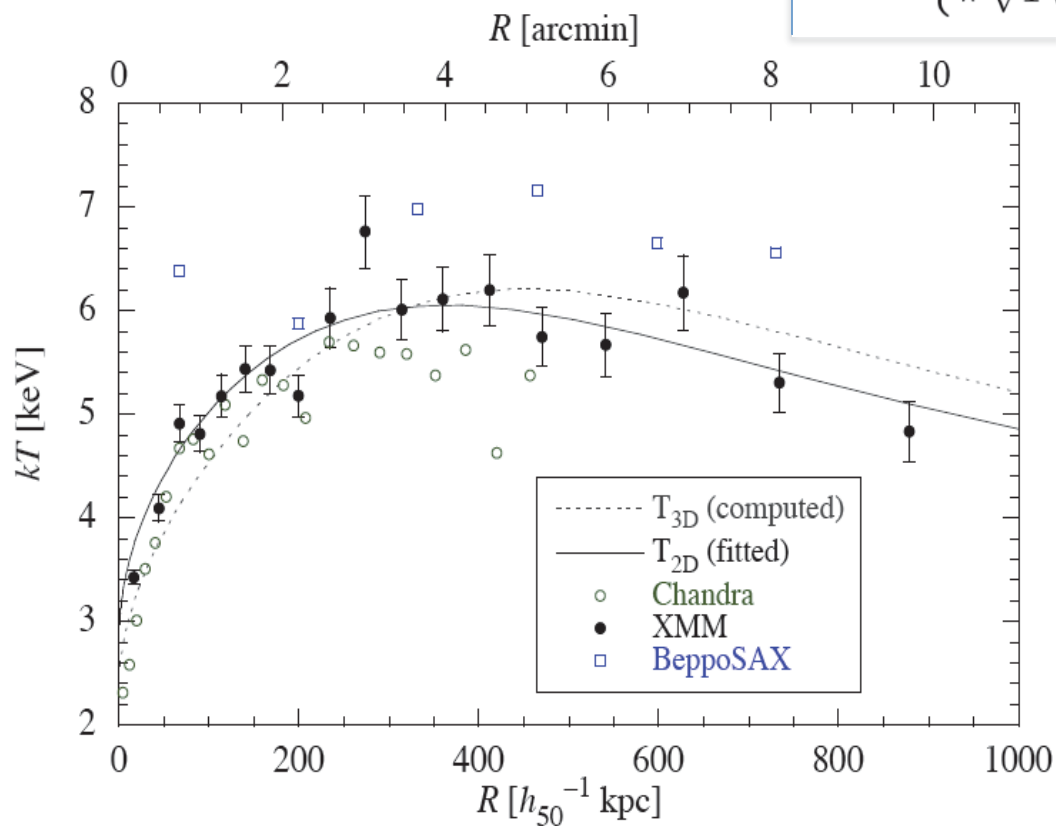
Deprojeção: caso geral

$$\left\{ \begin{array}{l} \Sigma'(R)T_{2D}(R) = 2 \int_R^\infty T^{3/2}(r)n^2(r) \frac{r dr}{\sqrt{r^2 - R^2}} \\ \Sigma'(R) = 2 \int_R^\infty T^{1/2}(r)n^2(r) \frac{r dr}{\sqrt{r^2 - R^2}} \end{array} \right.$$



$$T(r) = \frac{\int_r^\infty \left(\frac{\partial[\Sigma'(R)T_{2D}(R)]}{\partial R} \right) \frac{dR}{\sqrt{R^2 - r^2}}}{\int_r^\infty \left(\frac{\partial\Sigma'(R)}{\partial R} \right) \frac{dR}{\sqrt{R^2 - r^2}}}$$

$$n(r) = \left\{ \frac{-1}{\pi \sqrt{T(r)}} \int_r^\infty \left(\frac{\partial\Sigma'(R)}{\partial R} \right) \frac{dR}{\sqrt{R^2 - r^2}} \right\}^{1/2}$$



Determinação de massa: hidrostática

- Equilíbrio hidrostático: $\frac{1}{\rho} \nabla P = -\nabla \Phi$
- Com simetria esférica: $\frac{1}{\rho(r)} \frac{dP(r)}{dr} = -\frac{d\Phi(r)}{dr}$
- Gás quente ($\sim 10^7$ K), rarefeito (10^{-3} cm^{-3}) $\Rightarrow$ gás perfeito.
✓ $P = n kT$. Também temos $\rho = n \mu m_{\text{H}}$.
- Gradiente do potencial gravitacional: $\frac{d\Phi}{dr} = -F(r) = \frac{G M(r)}{r^2}$
- Logo, $\frac{k}{\mu m_{\text{H}}} \frac{d(\rho T)}{dr} = -\rho \frac{G M(r)}{r^2}$

Determinação de massa: hidrostática

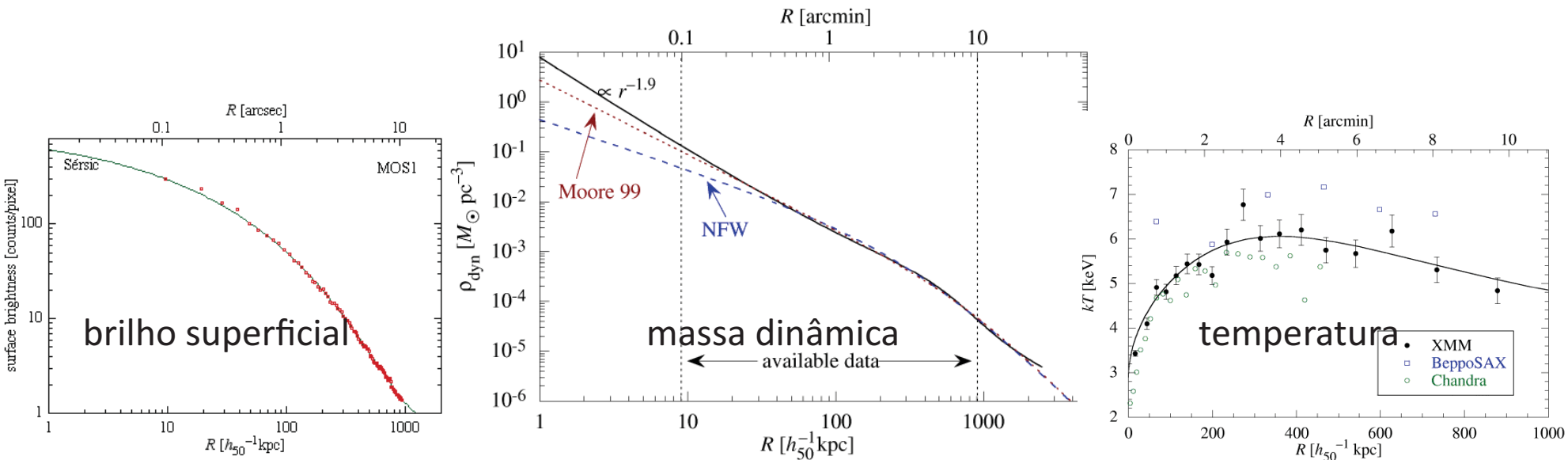
- Equilíbrio hidrostático, sistema esférico:

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

*massa total ou
massa dinâmica*

*densidade e
temperatura do gás*

- ✓ Perfil de densidade do gás determinado pela emissão em raios-X (imagem).
- ✓ Perfil de temp. determinado pela espectroscopia resolvida espacialmente.
- ✓ Forte evidência da presença de matéria escura



Atenção: deprojeção!

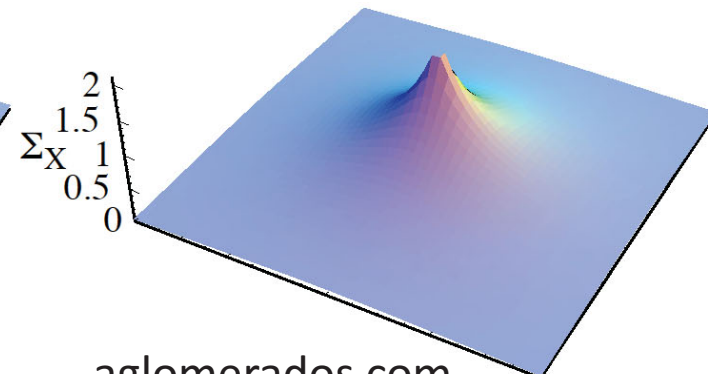
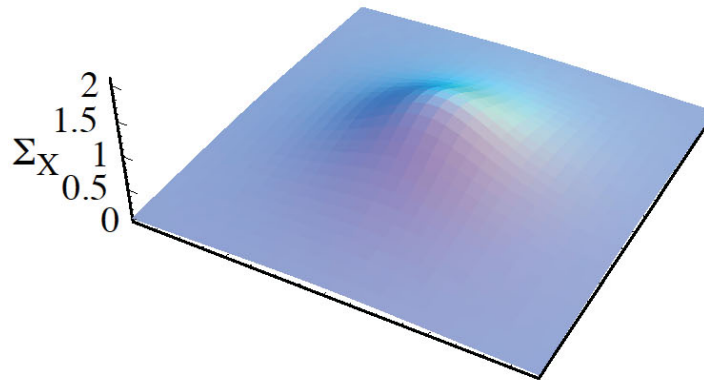
Cooling-flow

- O gás perde energia via emissão bremsstrahlung.
 - ✓ deve se resfriar com uma escala de tempo $E/(dE/dt)$,
onde $E = (3/2) n kT$ é a energia interna do gás e $(dE/dt = L_X)$.

$$t_{\text{cf}} \approx 9,3 \times 10^9 \frac{(kT_{\text{keV}})^{1/2}}{n_3} \text{ anos}$$

(alguns autores argumentam que a entalpia, $(5/3) n kT$, deveria ser usada)

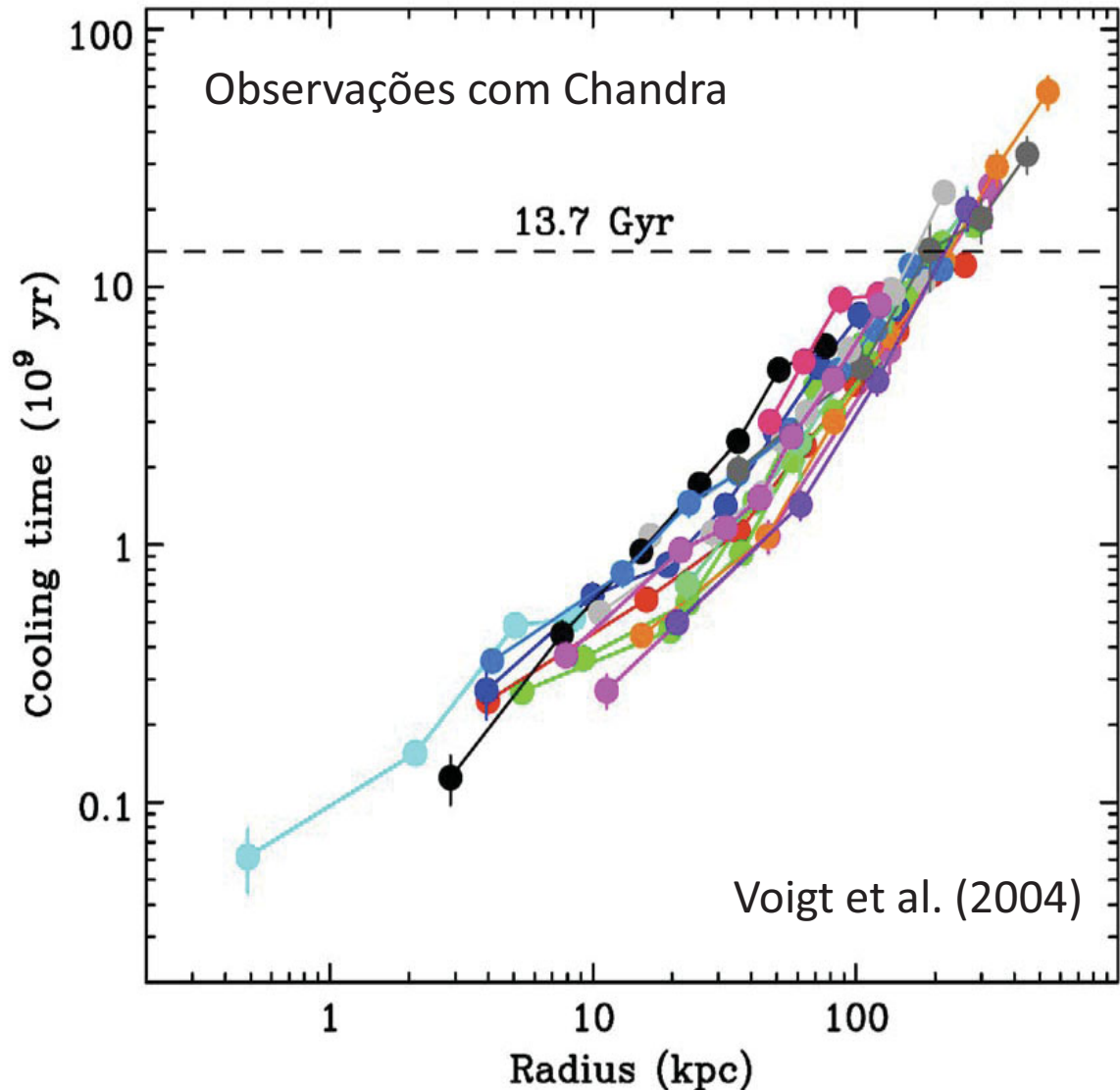
- Previsão: no centro onde a densidade é mais elevada, o tempo de resfriamento é menor que a idade do aglomerado e gás deve resfriar completamente.



aglomerados com
“cool-core”

Cooling-flow

- Tempo de resfriamento e função da distância ao centro do aglomerado.
- No interior de 100-200 kpc, o gás deveria esfriar significativamente no tempo de Hubble.



Cooling-flow

- Escala de tempo de resfriamento:

$$t_{\text{cf}} \approx 9,3 \times 10^9 \frac{(kT_{\text{keV}})^{1/2}}{n_3} \text{ anos}$$

- Ordem de grandeza da taxa de deposição de matéria:

$$\frac{d\mathcal{M}}{dt} \approx \frac{\mathcal{M}(r_{\text{cf}})}{t_{\text{cf}}} \approx \frac{10^{12} M_{\odot}}{t_{\text{cf}}} \approx 60 \left(\frac{T_8^{1/2}}{n_3} \right)^{-1} M_{\odot}/\text{ano}, \text{ ou } 530 \left(\frac{[kT_{\text{keV}}]^{1/2}}{n_3} \right)^{-1} M_{\odot}/\text{ano}$$

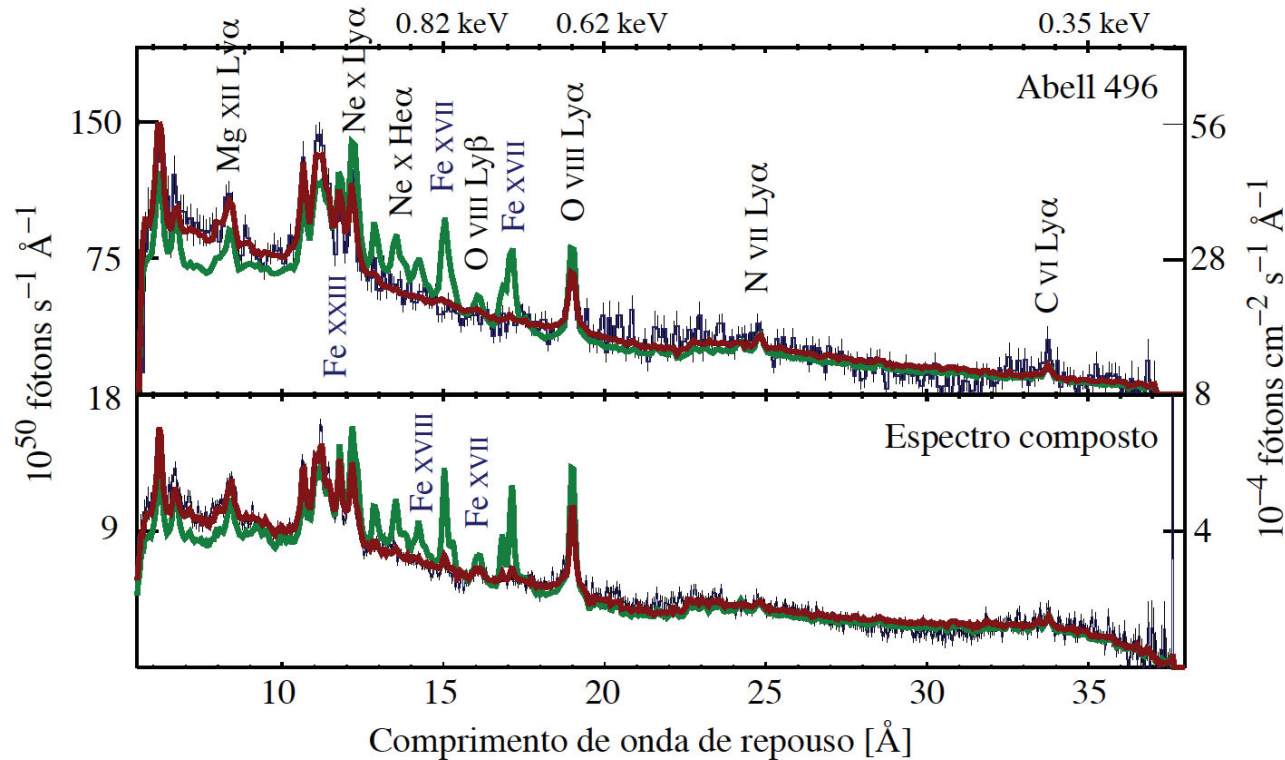
- Ordem de grandeza da queda de matéria no centro:

$$\dot{\mathcal{M}} = \frac{\rho dV}{dt} = 4\pi\rho v_r r^2 \Rightarrow v_r \approx 0,5 \left(\frac{\dot{\mathcal{M}}}{M_{\odot}/\text{ano}} \right) \left(\frac{10^{-3} \text{cm}^{-3}}{n} \right) \left(\frac{100 \text{ kpc}}{r_c} \right)^2 \text{ km s}^{-1}$$

(muito menor do que a velocidade do som).

Cool-core

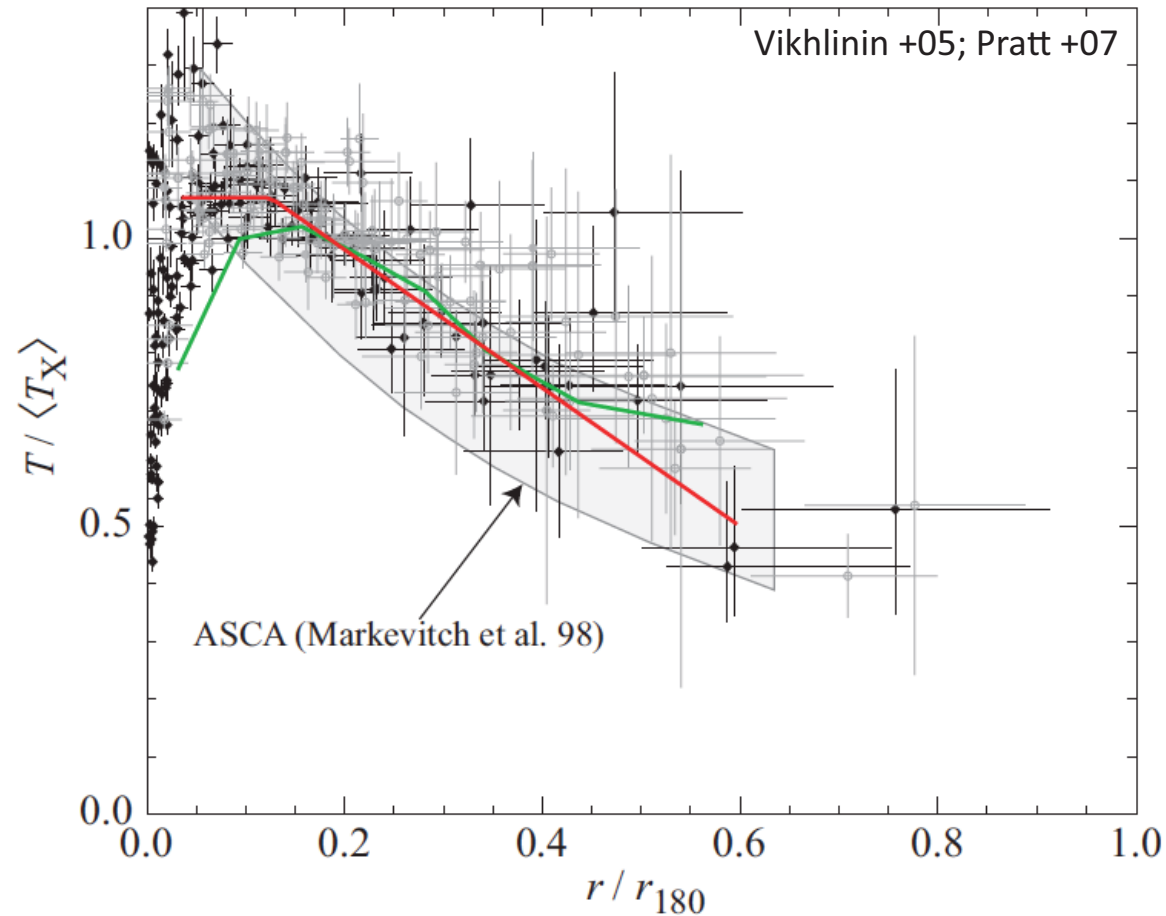
- Taxa de deposição de massa tão elevada não é observada.
- Depois de 2001, confirmação que não há gás se resfriando.
 - ✓ observação com XMM-Newton, Peterson et al. 2001, 2003:



- Mecanismo de aquecimento do gás
 - ✓ AGN, SNs, condução térmica, fusões de aglomerados...
 - ✓ Feedback? (temperatura no centro de aglomerados $\sim (1/3)$ temperatura do virial).

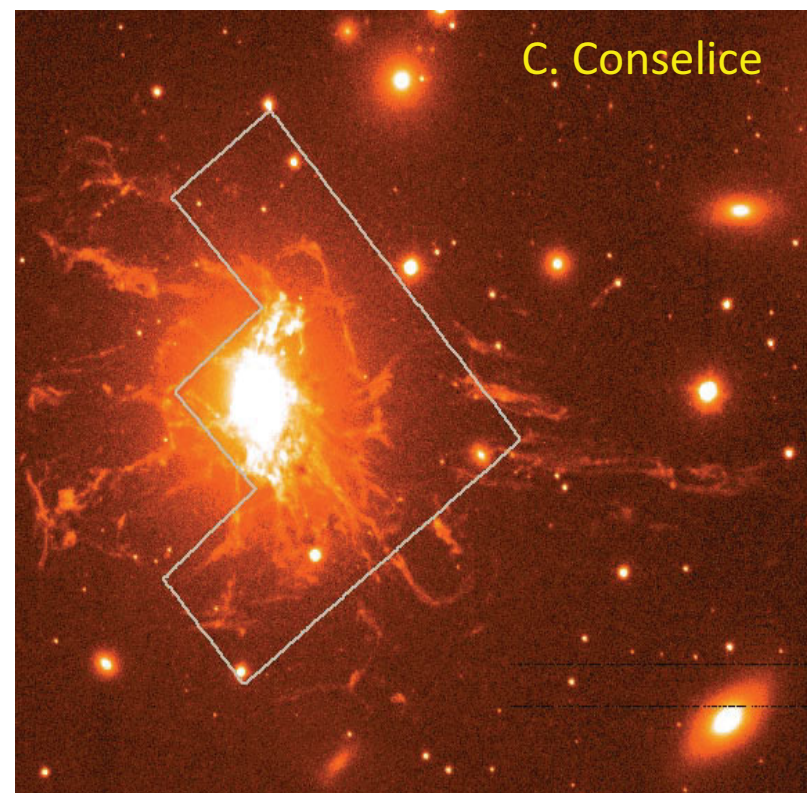
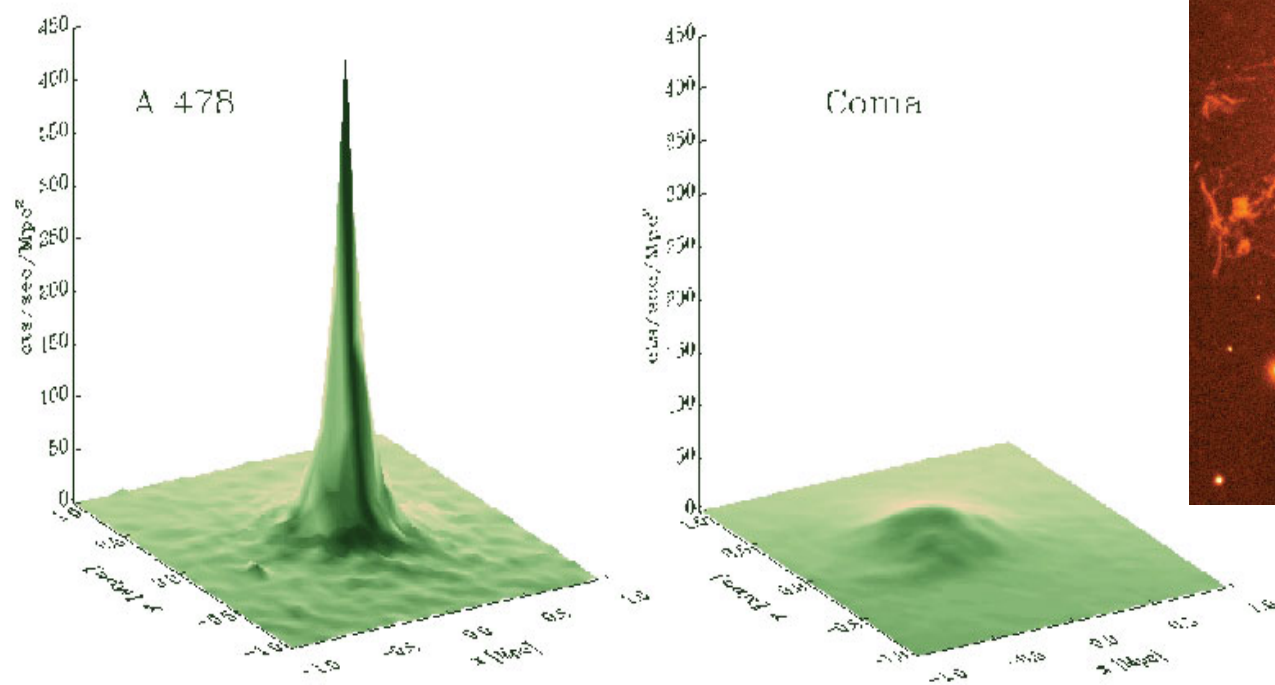
Perfil de temperatura

- Decréscimo observado em direção ao centro.
- Para os aglomerados com cool-core,
 $T_{\text{central}} \sim T_{\text{virial}}/3$
- Decréscimo lento para $r > 0.2 r_{\text{vir}}$.
- Não há (ainda) temperatura bem determinada para $r \sim r_{\text{vir}}$.

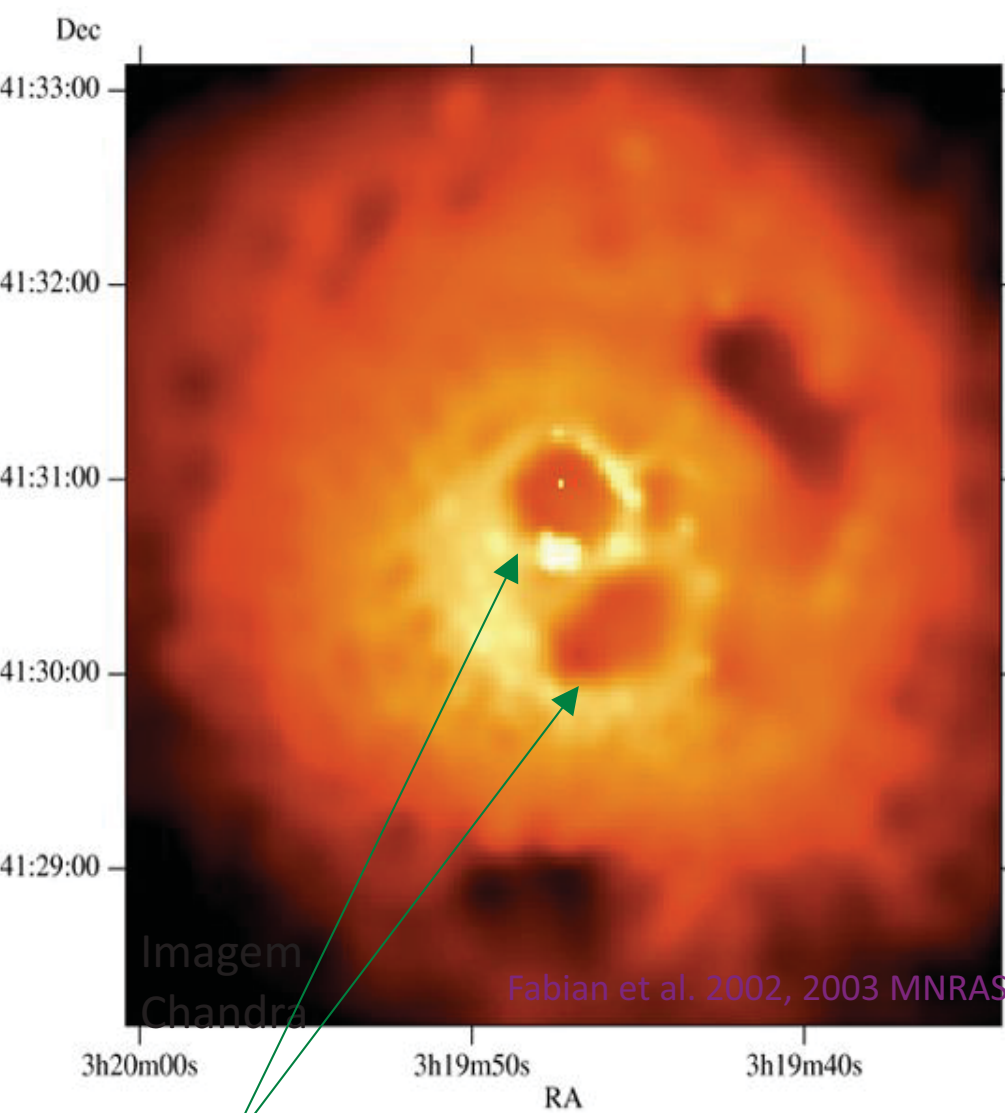


Cool-core

- O cooling-flow pode não ser tão grande, mas existe.
 - ✓ Observação de gás molecular, $\sim 10^9 - 10^{11} M_{\odot}$, (Edge 2001; Salomé & Combes 2003)
- Filamentos observados em $H\alpha$ de Perseus.
- Luminosidade muito alta no centro.

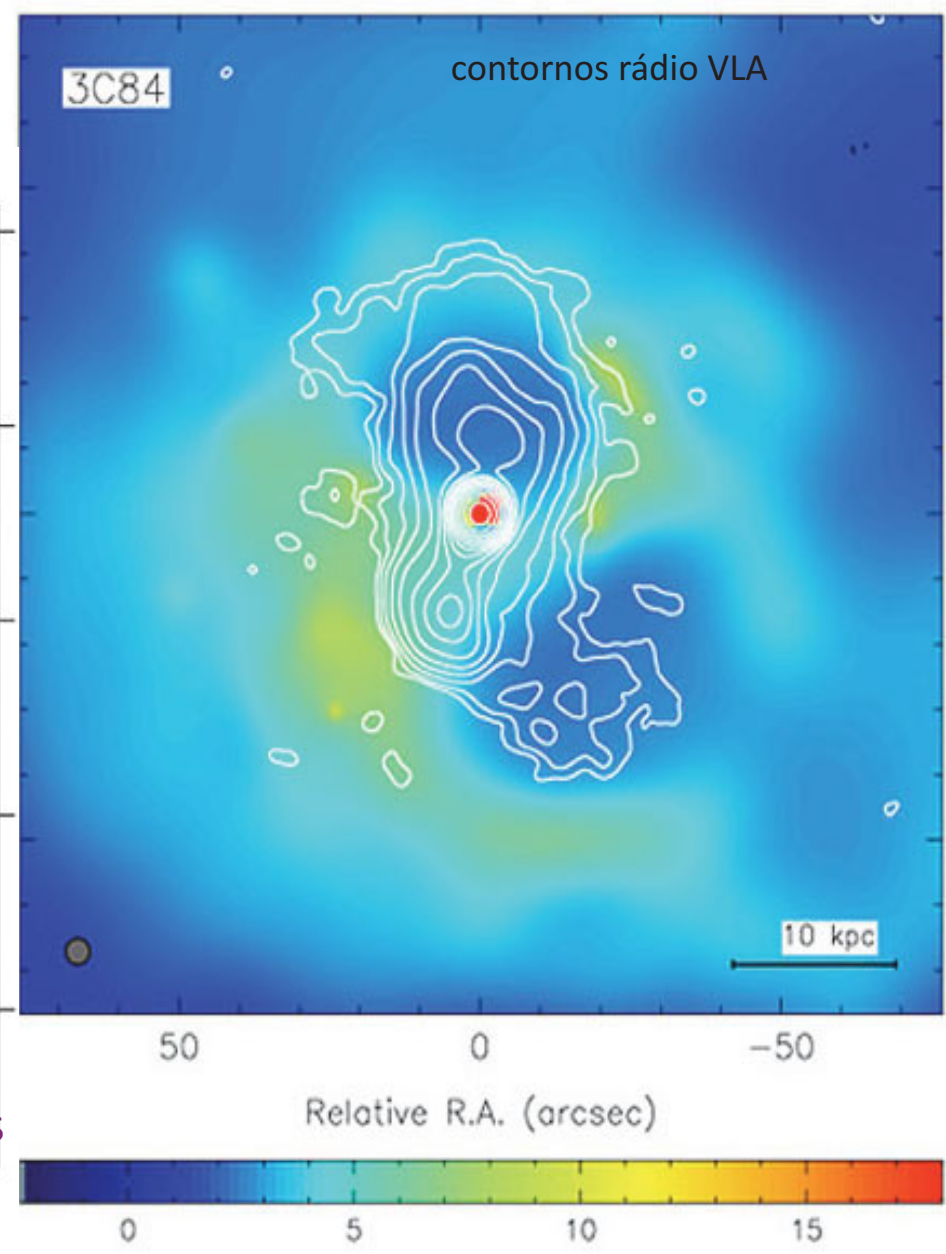


Perseus (Abell 426)



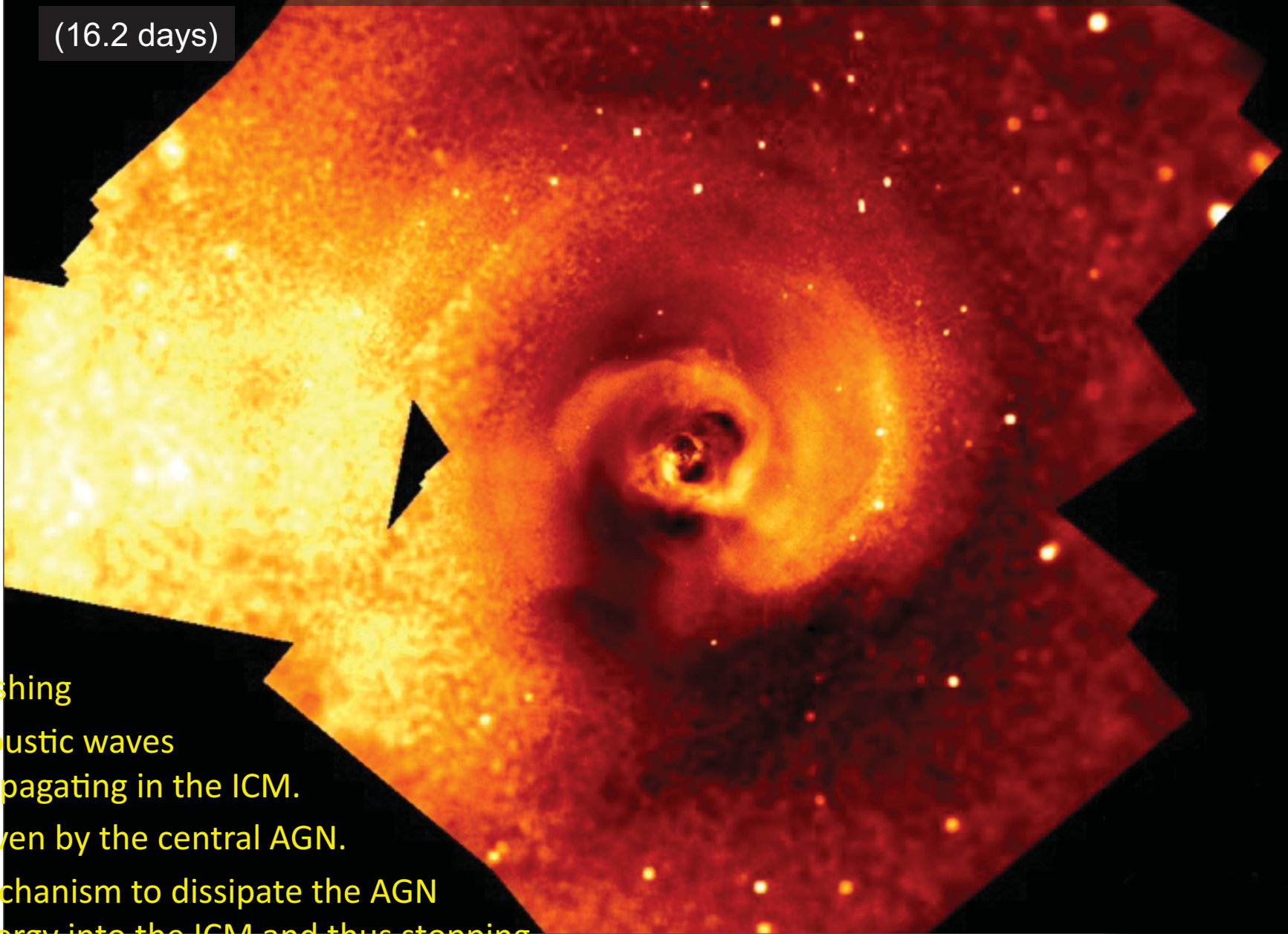
Fabian et al. 2002, 2003 MNRAS

“buracos”: gás aquecido pela AGN?



Perseus (Abell 426) 1.4 Ms Chandra image

(16.2 days)



- Sloshing
- Acoustic waves propagating in the ICM.
- Driven by the central AGN.
- Mechanism to dissipate the AGN energy into the ICM and thus stopping the cooling-flow (Fugita et al. 2003).

Evolução do estado do gás em aglomerados

- Evidências:
 - estrutura (morfologia) do gás
 - perfil de temperatura: patamar no centro $\sim T_{\text{vir}}/3$
- Feedback do cooling-flow.
 - Perda de energia: bremsstrahlung, raios-X
 - Queda de matéria no centro: gradiente de pressão radial.
 - Ativação de AGN, emissão de partículas relativísticas: radio-jets.
 - Aquecimento do gás, diminuição do fluxo de resfriamento
 - AGN deixa de ser alimentada
 - Gás volta a se resfriar e cair no centro, aumentando a densidade e perda de energia.

Relações de escala

- Associam diversas grandezas
 - ✓ útil para estimar a massa de aglomerados.
 - ✓ Comparando com modelos simples revelam propriedades evolutivas ou fenômenos físicos que atuam em aglomerados.
- Exemplo:

$$L_X \propto \int \varepsilon dE dV \Rightarrow L_X \propto \rho_0^2 R_c^3 T^{1/2}$$

$$M_g \propto \int \rho dV \Rightarrow M_g \propto \rho_0 R_c^3$$

$$M_d = \frac{kT}{G \mu m_p} r \left(-\frac{d \log \rho}{d \log r} - \frac{d \log T}{d \log r} \right) \Rightarrow M_d \propto R_c T$$

$$f = \frac{M_g}{M_d} \Rightarrow f \propto \rho_0 R_c^2 T^{-1}$$

- ✓ supondo $f = \text{constante}$:

$$\rho_0 \propto R_c^{-2} T$$

- ✓ supondo $M_d \propto R_c^3$ (mesma densidade):

$$R_c \propto T^{1/2}$$

- ✓ Logo:

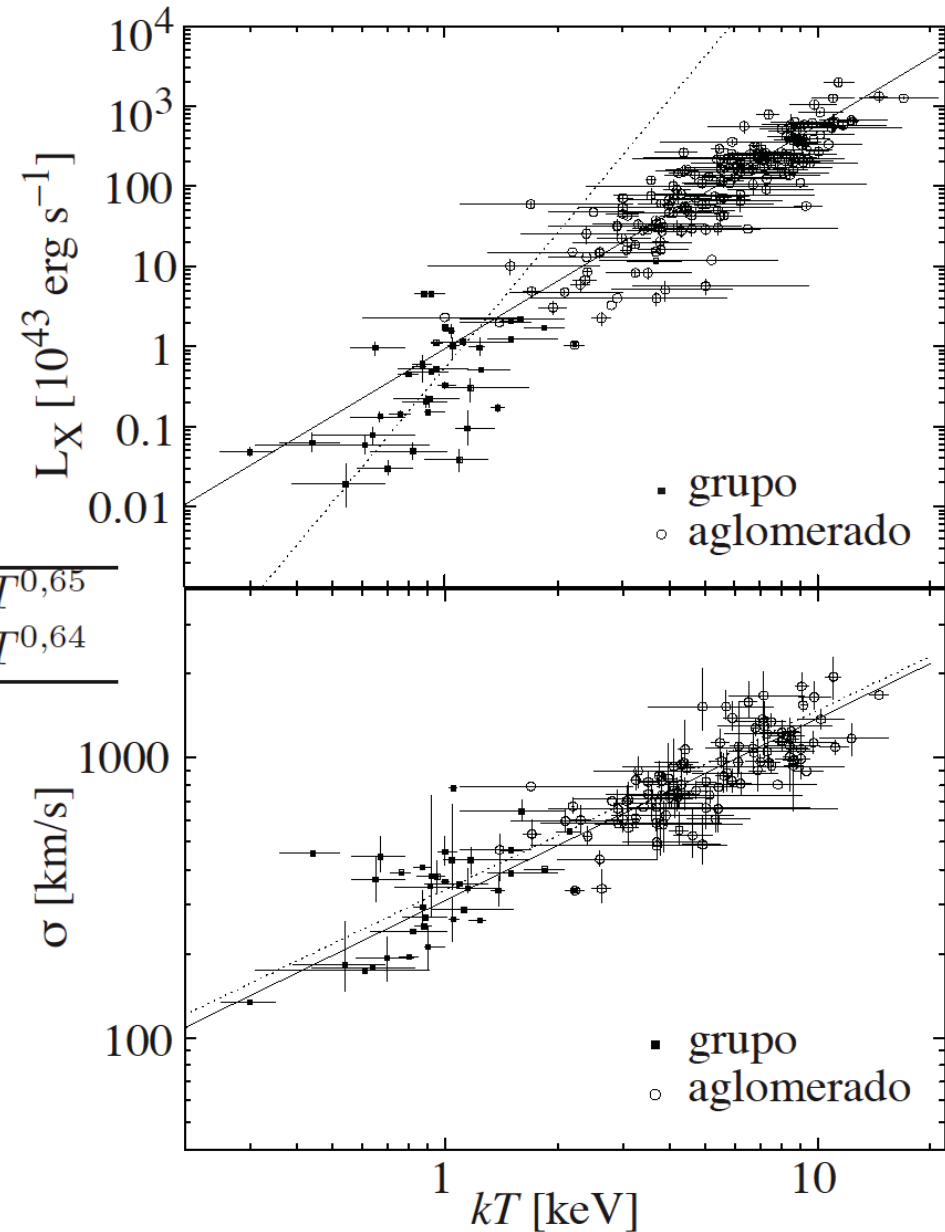
$$L_x \propto T^2 \quad \text{e} \quad M_g \propto T^{3/2}$$

Relações de escala

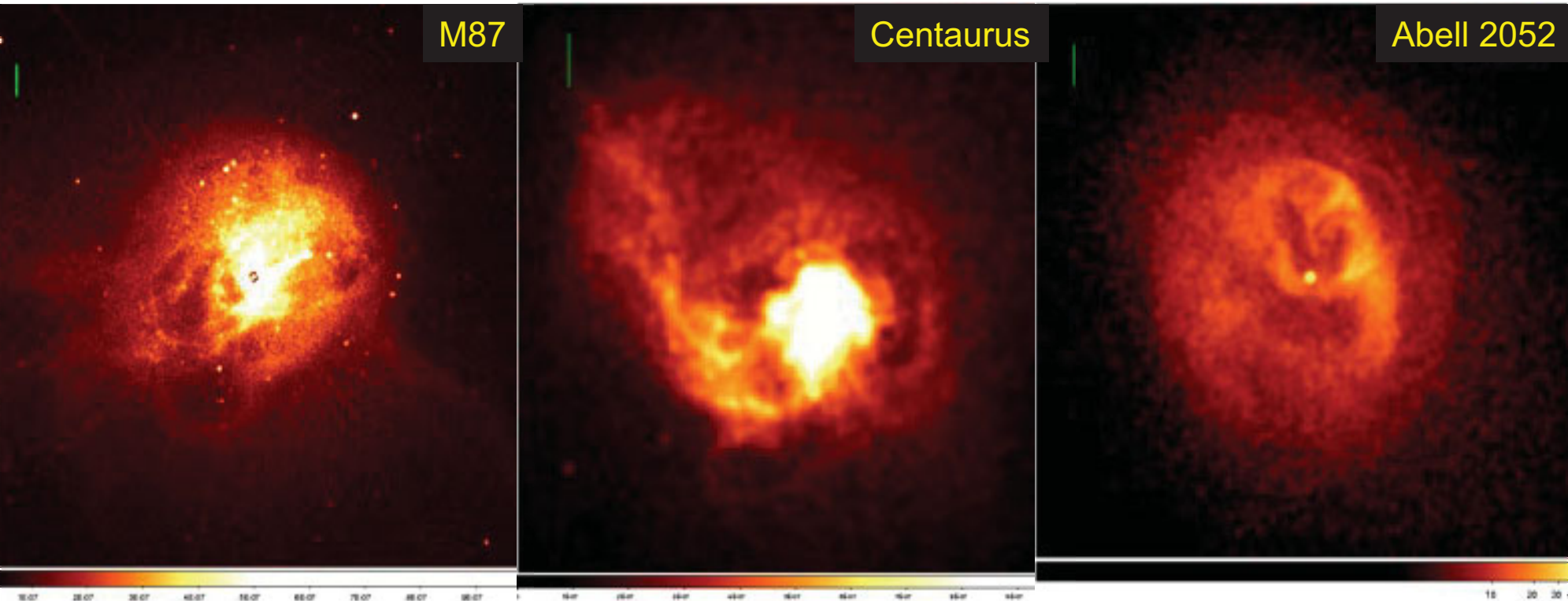
- $L_x \propto T^2$ e $M_g \propto T^{3/2}$
- Estas relação não são exatamente o que se observam.

Aglomerados	$L_X \propto T^{2,79}$	$L_X \propto \sigma^{5,30}$	$\sigma \propto T^{0,65}$
Grupos	$L_X \propto T^{5,57}$	$L_X \propto \sigma^{2,35}$	$\sigma \propto T^{0,64}$

- Processos não gravitacionais:
 - ✓ preaquecimento
 - ✓ SNs
 - ✓ AGN



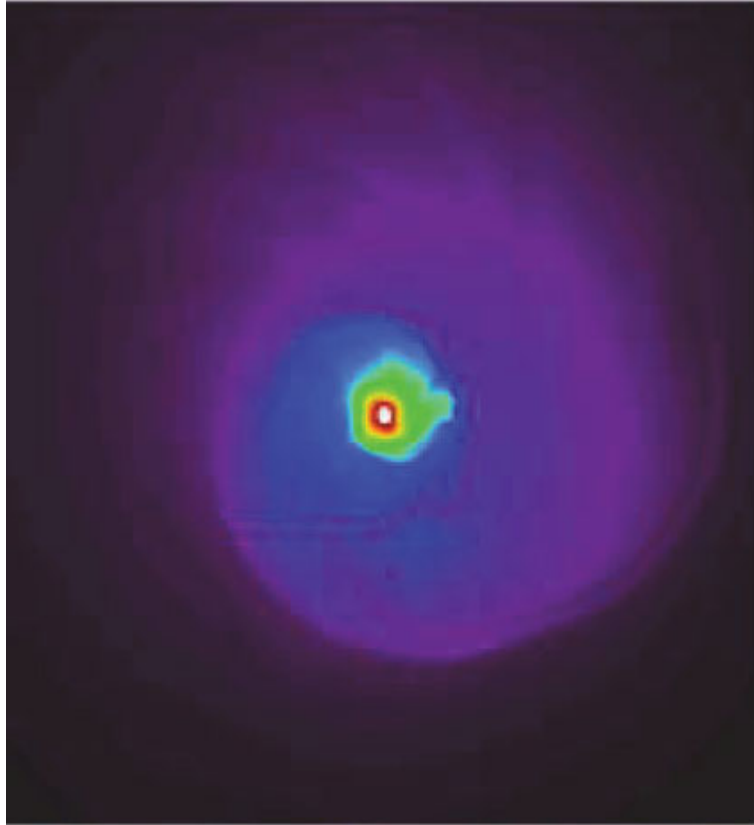
Deep imaging: dynamical activity



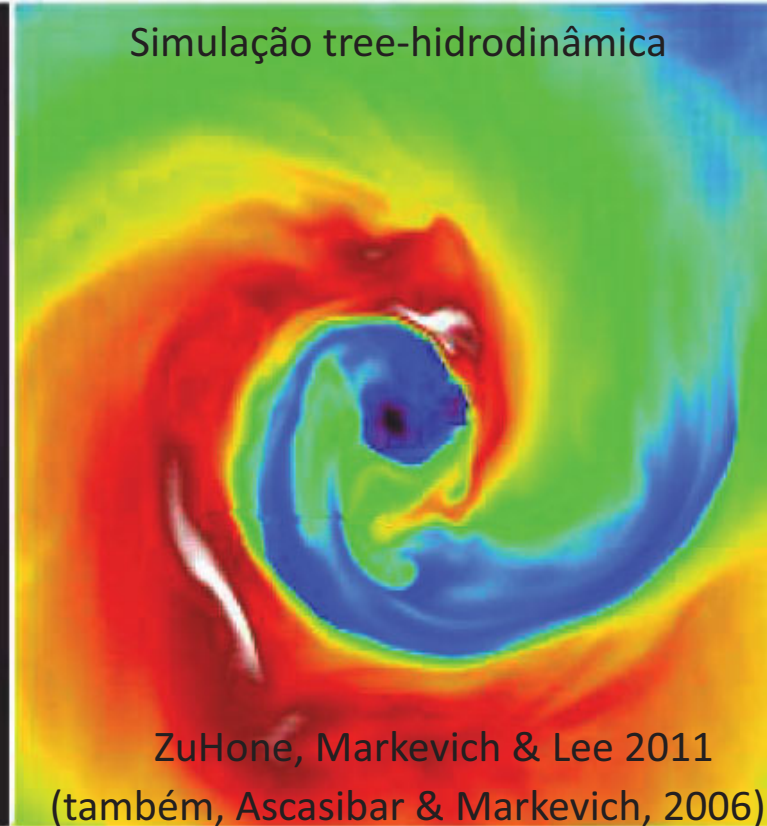
- Surface brightness of nearby cluster ($\propto$ projected n^2).
- Lots of structures, many due to non-gravitational processes (AGN feedback and shocks)
- ➔ How cluster dynamical activity affects galaxy evolution?

Colisão fora do eixo: Sloshing

Fatia de densidade ($\sim$ brilho superficial)



Temperatura



- Sloshing acontece em colisões com momento angular;
- Razão de massas entre aglomerados em colisão $\sim 1/2 - 1/10$;
- Gás frio da região central traça uma espiral (tipo braço espiral);
- Não há aquecimento do gás: este não é um mecanismo que impede o cooling-flow.

Abell 2052

Pequenas escalas: cavidades criadas pela atividade da AGN central.

Grandes escalas: estrutura espiral. Sloshing?

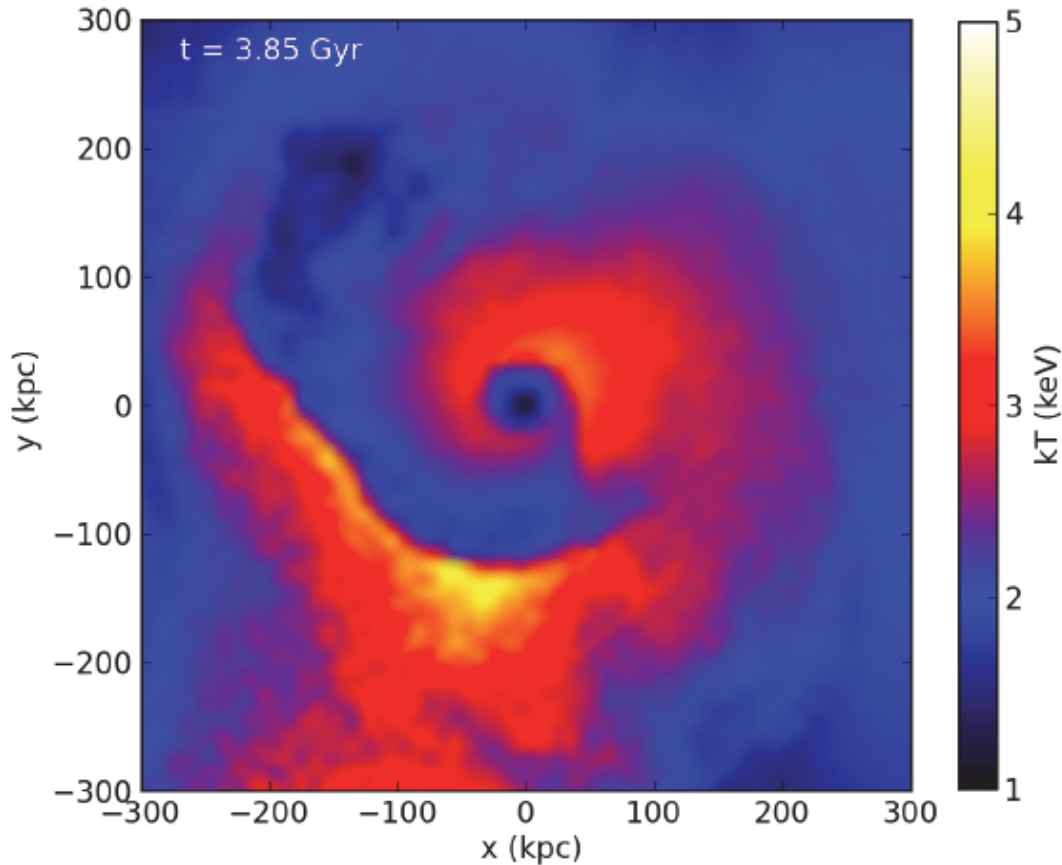


Azul: raios-X Chandra

Blanton +11

Abell 2052

Temperatura simulada



$$\begin{aligned}\frac{M_2}{M_1} &= 1/5 \\ b &= 100 \text{ kpc} \\ v_0 &= 1000 \text{ km/s} \\ i &= 0^\circ\end{aligned}$$

Machado 2013 (em preparação)

Gás frio da região central adquire momento angular e sai do centro em um padrão espiral.

Cluster--galaxy interaction

- Ram-pressure
 - ✓ cold interstellar gas striped by intracluster plasma (Gunn & Gott 1972).
- Strangulation/Starvation
 - ✓ hot coronae galactic gas striped by intracluster plasma (Bekki+ 2002).
- Tidal truncation
 - ✓ Galactic mass loss around virial radius stripped by cluster tidal forces (Fujita 1998).
- Harassment (not exactly cluster—galaxy, but occurs in clusters)
 - ✓ Galactic morphological perturbation/stripping of hot galactic atmosphere due to many close encounters (Moore+ 1998).
- Mergers (not exactly cluster—galaxy, but may occur in clusters)
 - ✓ Minor mergers X major mergers (Toomre & Toomre 1972)

Search of high- z ($z > 1$) clusters

- Probe cosmological parameters, dark energy equation of state (w).
- Evolution of galaxies in high density environment.
- Structure formation: observe forming clusters.
- Need of a large sample. Need to **find** them!

Some difficulties:

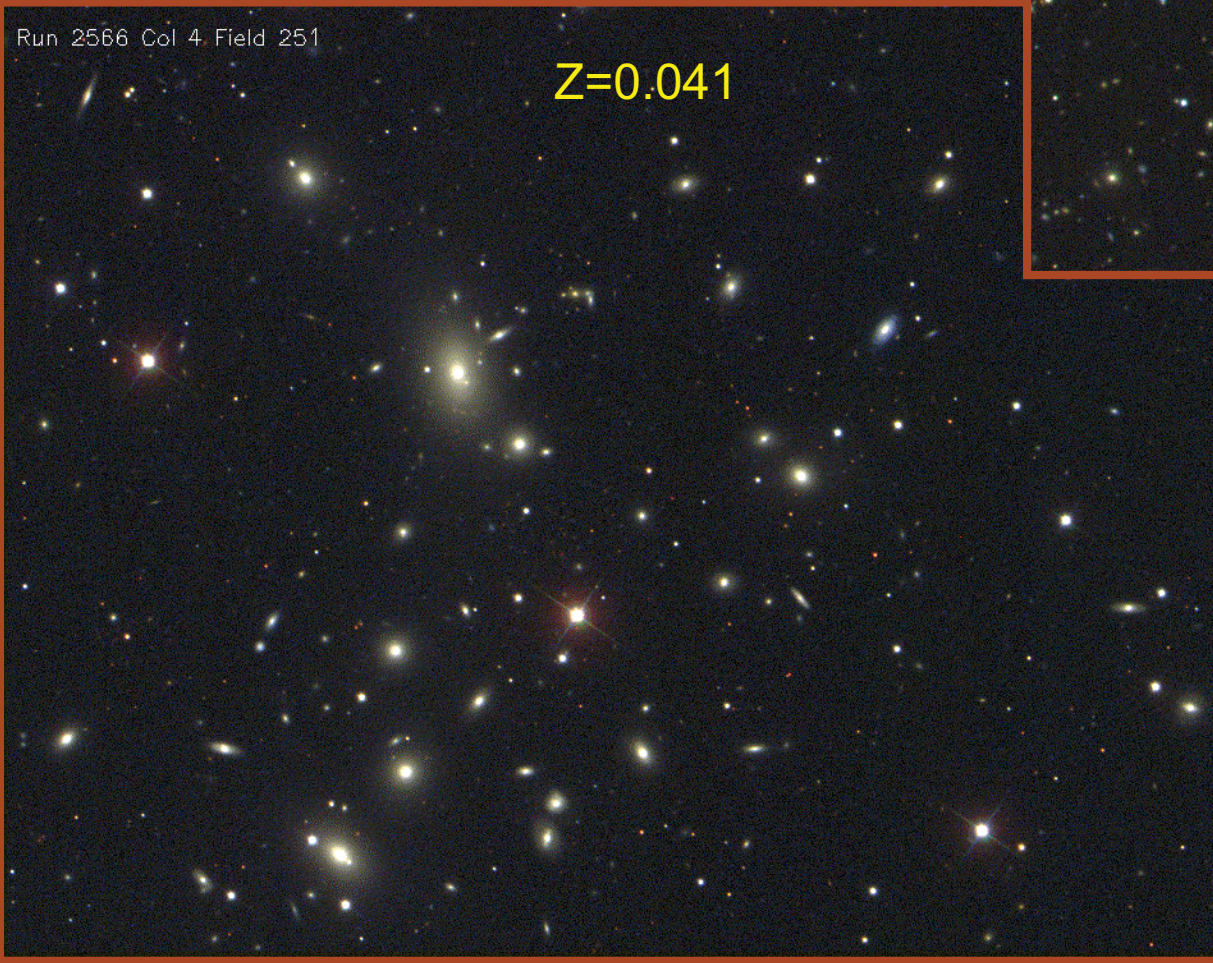
- At $z = 1$:
 - ✓ Core (~ 100 kpc) $\approx 15''$ (only Chandra can resolve it);
 - ✓ 1 photon [0.5-8.0 keV] band each 20 secs.
(assuming $L_X \sim 2 \times 10^{45}$ erg/s and $kT = 6$ keV);
 - ✓ Huge “foreground” contamination in galaxy distribution;
 - ✓ L_* galaxy has magnitude $r \sim 22$.

Above all, few rich clusters are expected at $z > 1$
(at least with the current LCDM scenario)

Some SDSS clusters
at different z .

Run 2566 Col 4 Field 251

$Z=0.041$



$Z=0.138$



$Z=0.277$

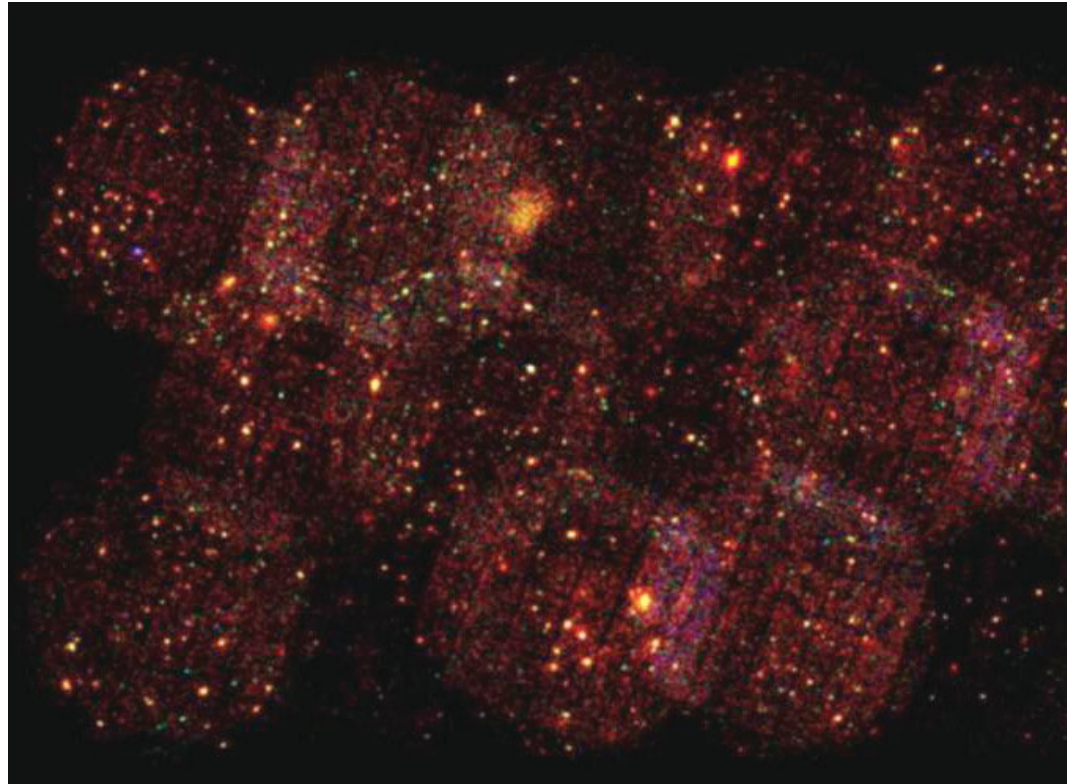


$Z=0.377$



How to find high-z cluster

- **X-ray emission**
 - ✓ non-resolved sources ROSAT, XMM (@ $z \sim 1$)
 - ✓ Low count rate (10s to 100s of ks exposures)
 - ✓ Search in archive pointed observations (ROSAT, Chandra, XMM)
 - ✓ XMM-LSS survey



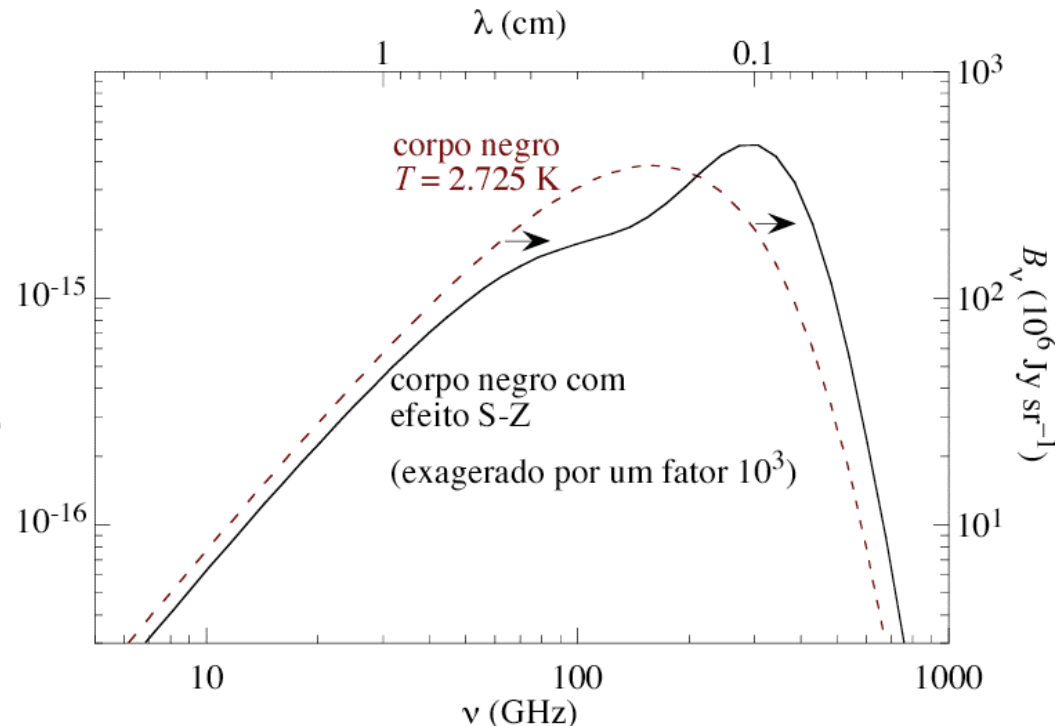
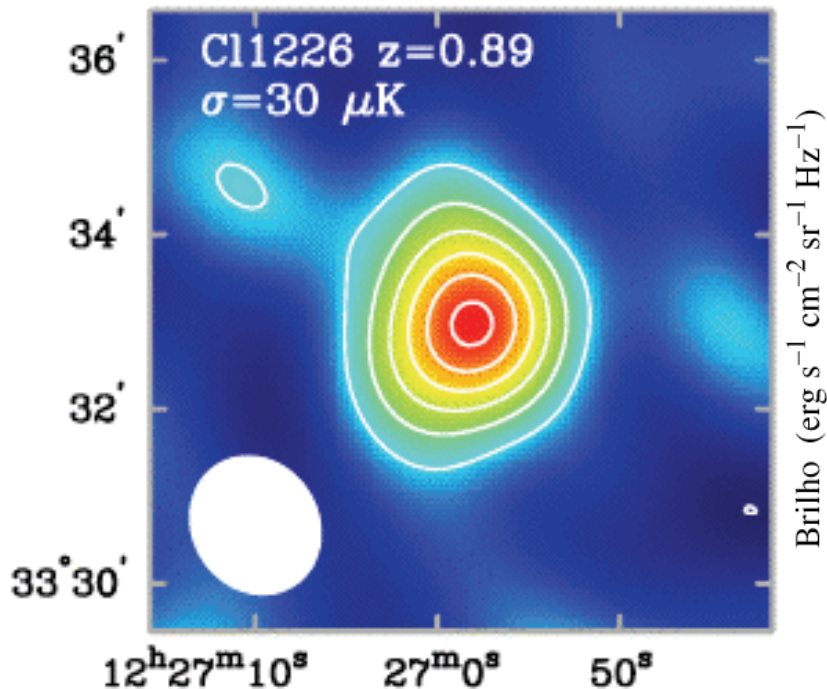
How to find high-z cluster

- Sunyaev-Zel'dovich Effect

- ✓ Clusters appear as cold spots over the microwave Cosmic Background at $\nu < 200$ GHz;
- ✓ Signal independent of distance (no cosmological dimming).

(Reese 2003)

- South Pole Telescope, Planck satellite already discovering lots of new clusters (Aghanim+ 2011)



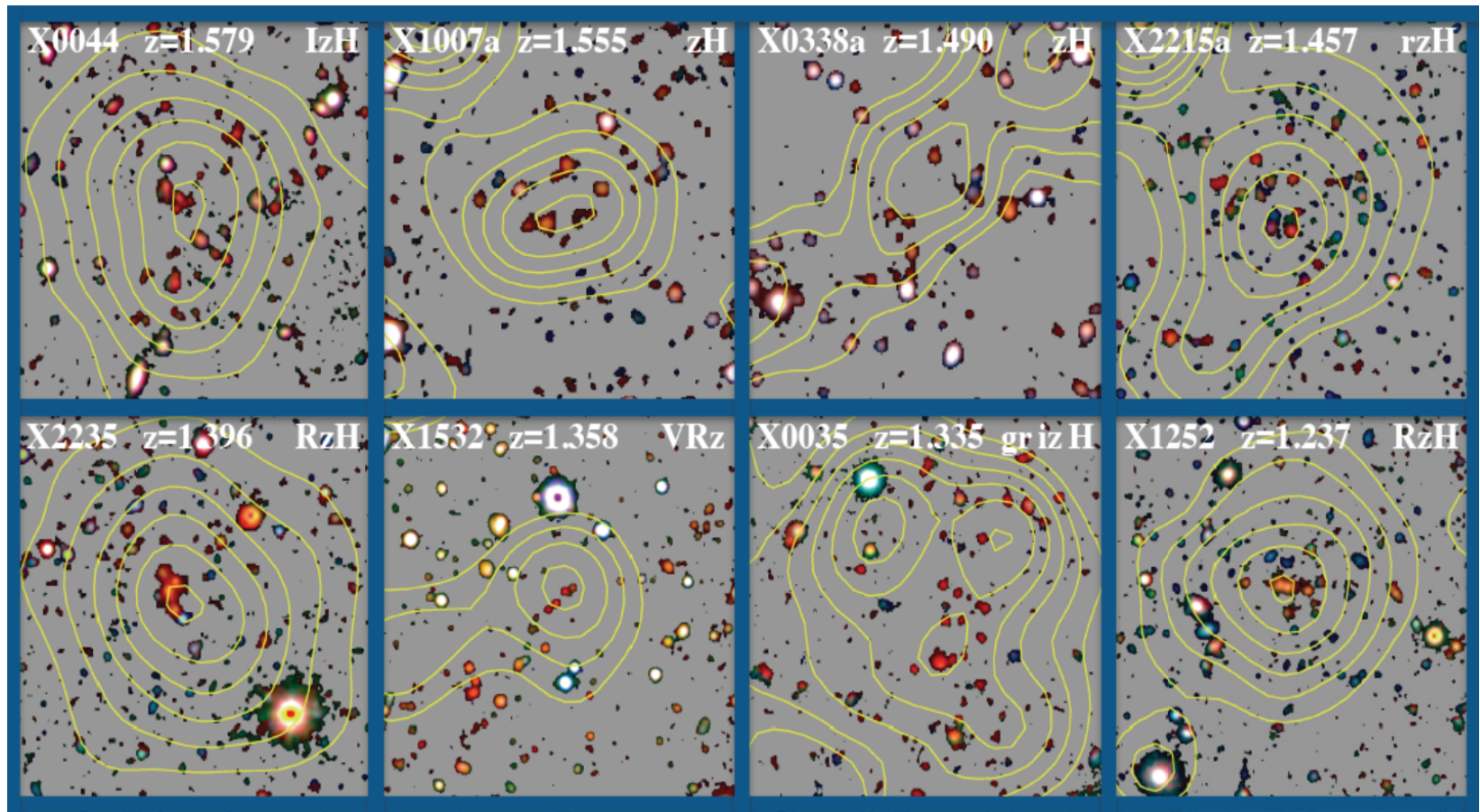
The Top-10 Most Distant Clusters known spectroscopically confirmed + X-ray signature

#	z	Name	Sel.	$L_{X,500,bol}$ 10^{44} erg/s	M_{200} $10^{14} M_{\text{sun}}$	References
1	2.07	CL J1449+0856	MIR	0.9	0.7	Gobat+11
2	1.75	XMMU J1053+5723	Xray	0.5	0.6	Henry+10
3	1.75	IDCS J1426-3508	MIR	16	4.1	Stanford+12, Brodwin+12
4	1.62	XCL J0218-0510	Xray	0.4	0.7	Tanaka+10, Pierre+11, Papovich+10
5	1.58	XDCP J0044.0-2033	Xray	6.1	3.0	Santos+11
6	1.56	XDCP J1007.3+1237	Xray	2.1	1.7	Fassbender+11
7	1.49	XDCP J0338.8+0021	Xray	1.1	1.2	Nastasi+11
8	1.49	ISCS J1432.4+3250	SZ	3.5	2.5	Brodwin+10
9	1.46	XCS J2215.9-1738	Xray	2.2	2.0	Hilton+10, Stanford+06, Bielby+10
10	1.41	ISCS J1438.1+3414	SZ	2.2	2.2	Brodwin+10, Stanford+05

Rene Fassbender & Piero Rosati 2012

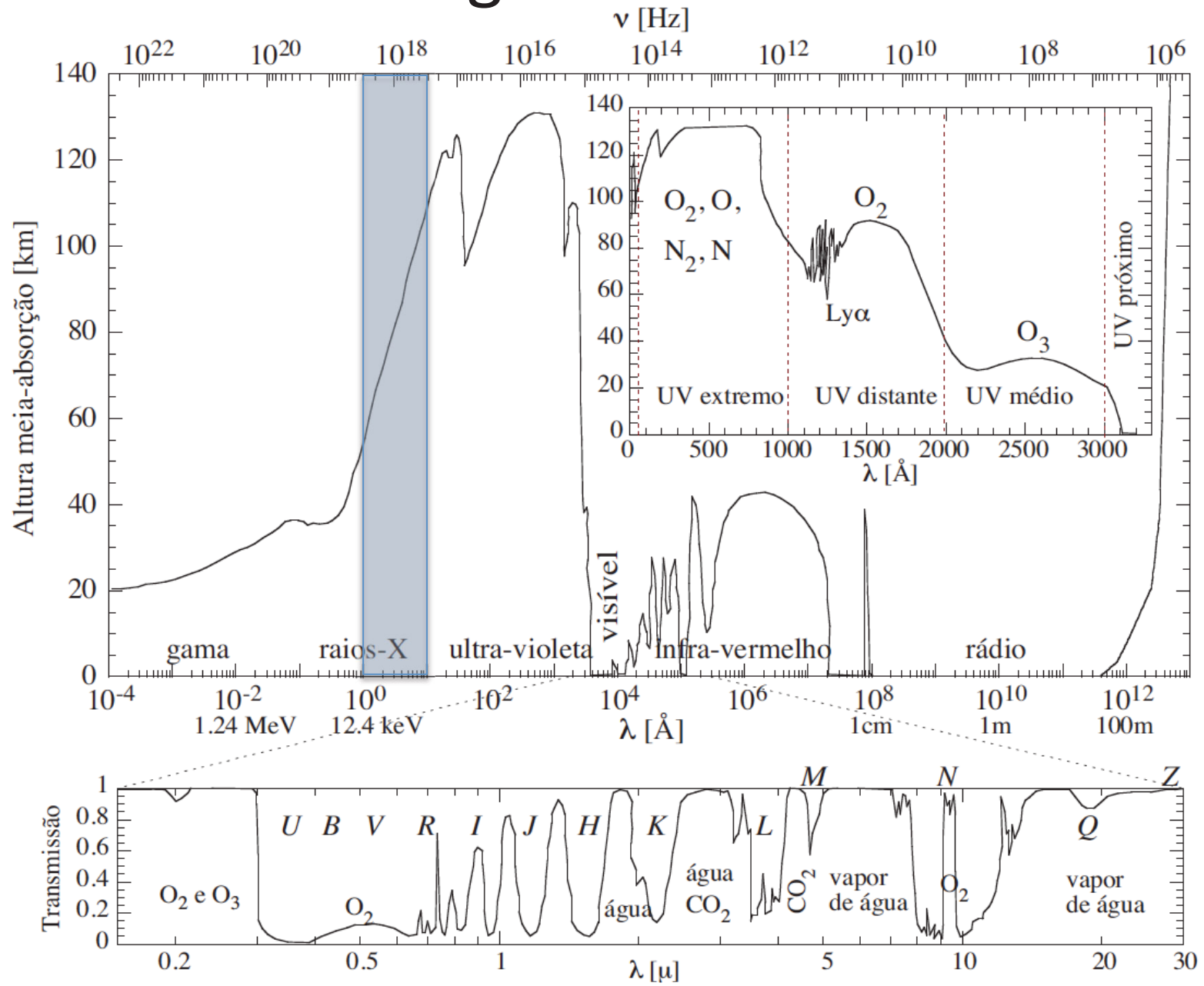
High- z clusters: much more to come

- DES, Planck, LOFAR, JPAS, eROSITA, and others
 - ✓ different techniques, different bias.
 - ✓ Substructure analysis, galaxy population and evolution.
 - ✓ Ground base follow-up. Challenging at high z .



1.5' $\times$ 1.5' color image composite; Fassbinder+ 2011

Observações e dados em raios-X de aglomerados

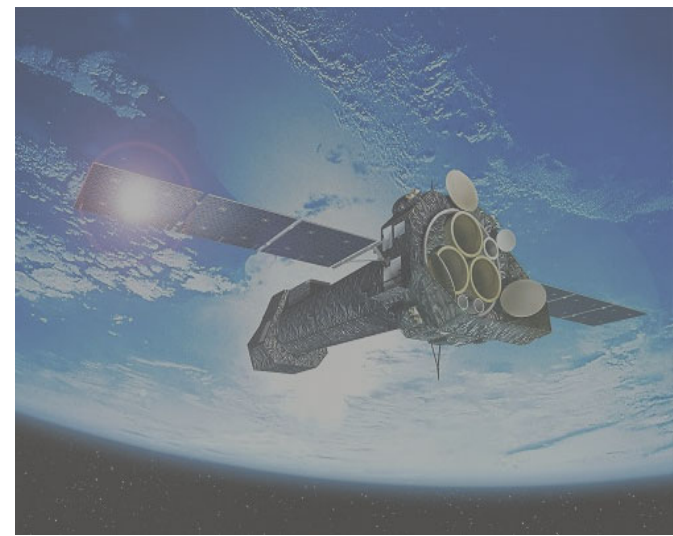


Observatórios espaciais de raios-X

<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/>.

Satélite	Detetor	Banda de energia [keV]	FoV (raio)	FWHM (no eixo)	R90% (no eixo)	Área efetiva [cm ²]	Vida
<i>Einstein</i>	IPC	0,4–4,0	38'	60''		100	11/1978–04/1981
ROSAT	PSPC	0,1–2,5	60'	25''	54''	240	06/1990–02/1999
ASCA	SIS	0,4–12,0	11'	30''	600''	105	02/1993–03/2001
	GIS	0,8–12,0	25'	30''	600''	50	
<i>Beppo-SAX</i>	LECS	0,1–10,0	19'	126''	245''	22	04/1996–04/2002
	MECS	1,3–10,0	28'	75''	158''	150	
<i>Chandra</i>	ACIS-S3	0,20–10,0	4'	0,5''	2''	340	07/1999–
	ACIS-I		8'	0,5''	2''	340	
XMM- <i>Newton</i>	MOS	0,15–15,0	16'	6,0''	52''	922	12/1999–
	pn		14'	6,0''	47''	1227	
<i>Suzaku</i>	XIS	0,2–12,0	18' × 18'	120''		390	07/2005–

- Alta resolução espacial do Chandra (comparável ao imageamento óptico tradicional na Terra).
- Alta sensibilidade do XMM-Newton.
- Suzaku: Micro-calorímetro, alta resolução espectral.
 - (XRS, X-ray Spectrometer; 0.3-12 keV).
 - perdeu o hélio líquido 3 meses após início das operações.



Dados de raios-X

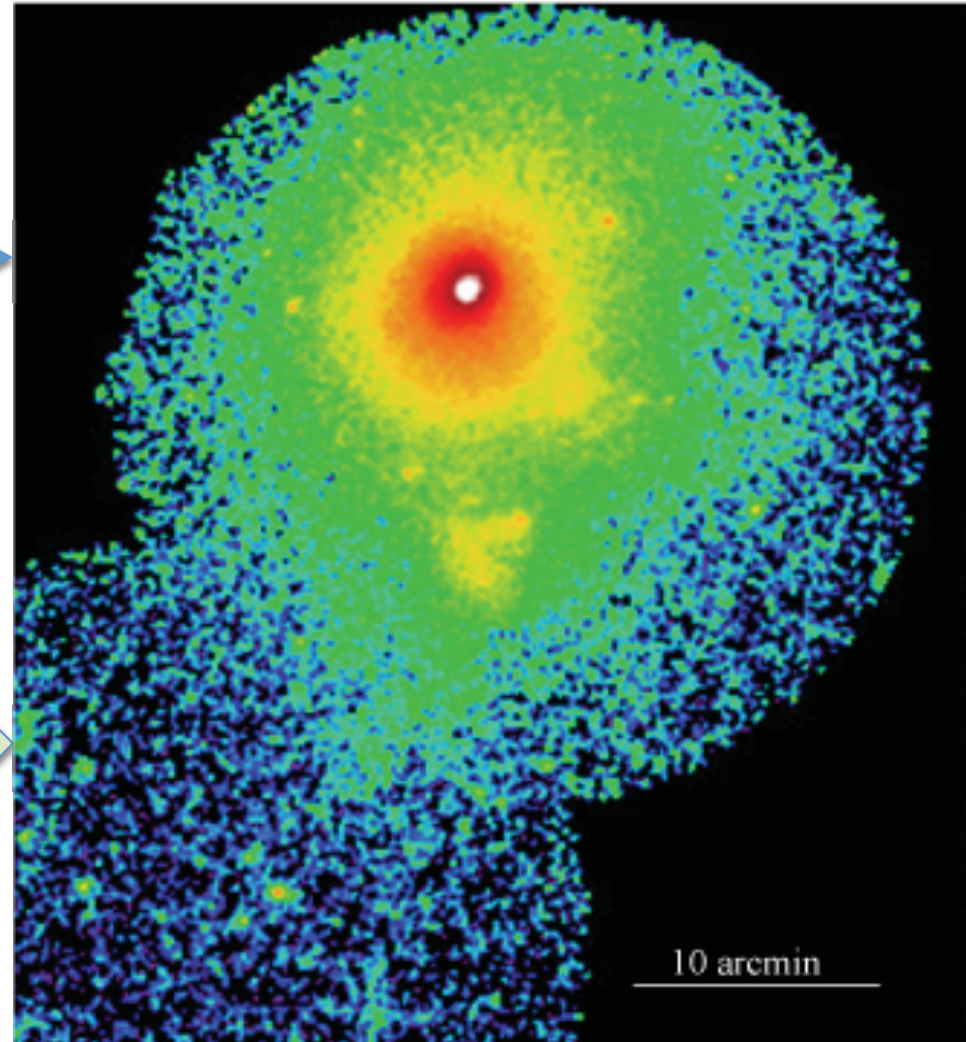
Uma matriz (lista) de 4 dimensões: X, Y, energia, tempo para cada fóton detectado.
(na verdade mais: qualidade, padrão da detecção, etc...)

Algumas projeções de interesse:

- 2-D X, Y (imagem) →
- 1-D Energia (espectro)
- 1-D Tempo (curva de luz)

Densidade
do gás →

Exemplo de uma imagem em raios-X
de Abell 85 observado pelo XMM



$$\epsilon = 1.4 \times 10^{-27} T^{1/2} n_e n_i Z^2 g(T) \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-3}$$

Dados de raios-X

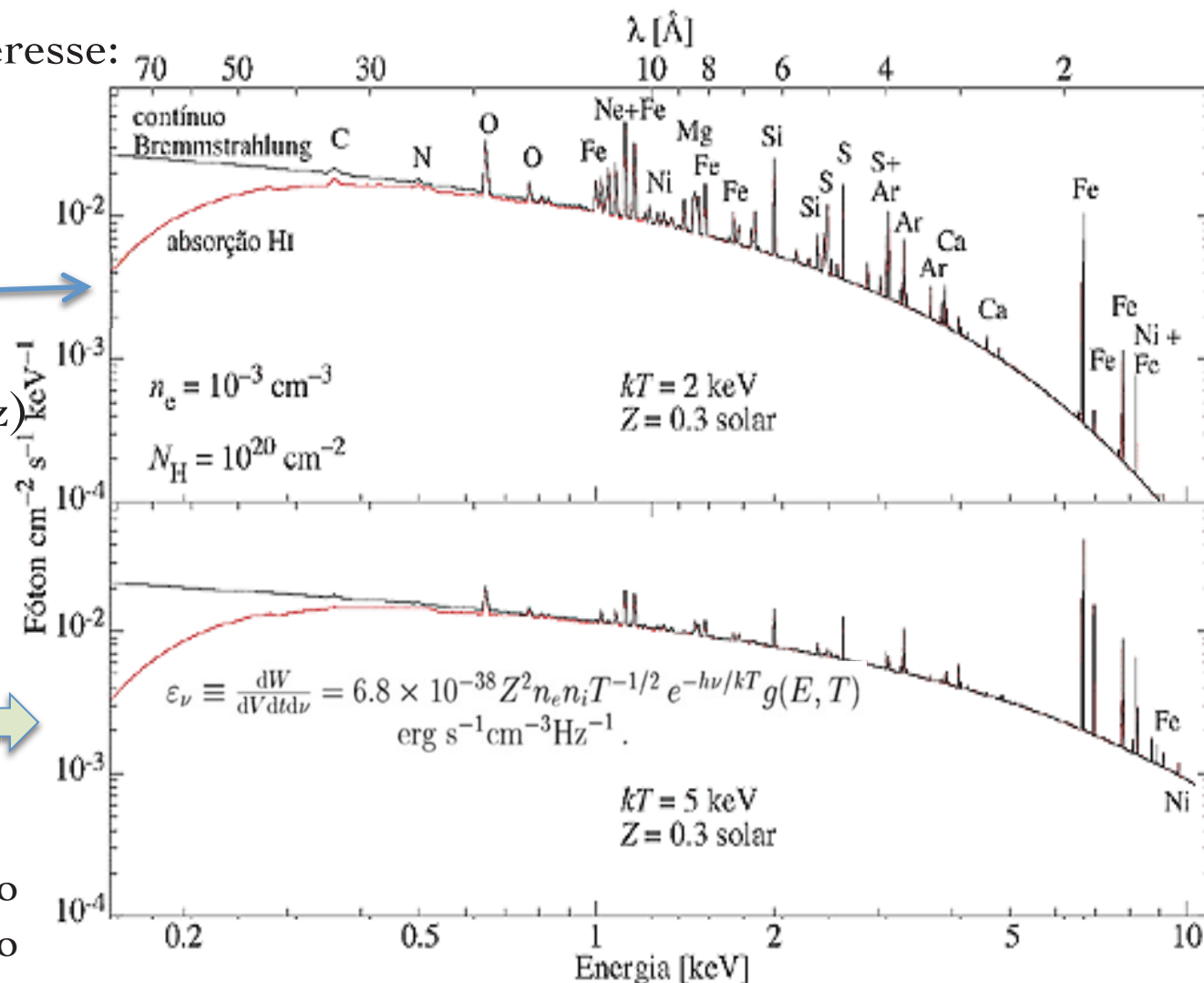
Uma matriz (lista) de 4 dimensões: X, Y, energia, e tempo para cada fóton detectado.
(na verdade mais: qualidade, padrão da detecção, etc...)

Algumas projeções de interesse:

- 2-D X, Y (imagem)
- 1-D Energia (espectro) →
- 1-D Tempo (curva de luz)

Temperatura e
metallicidade →

Exemplo de um espectro
teórico do gás intra-aglomerado

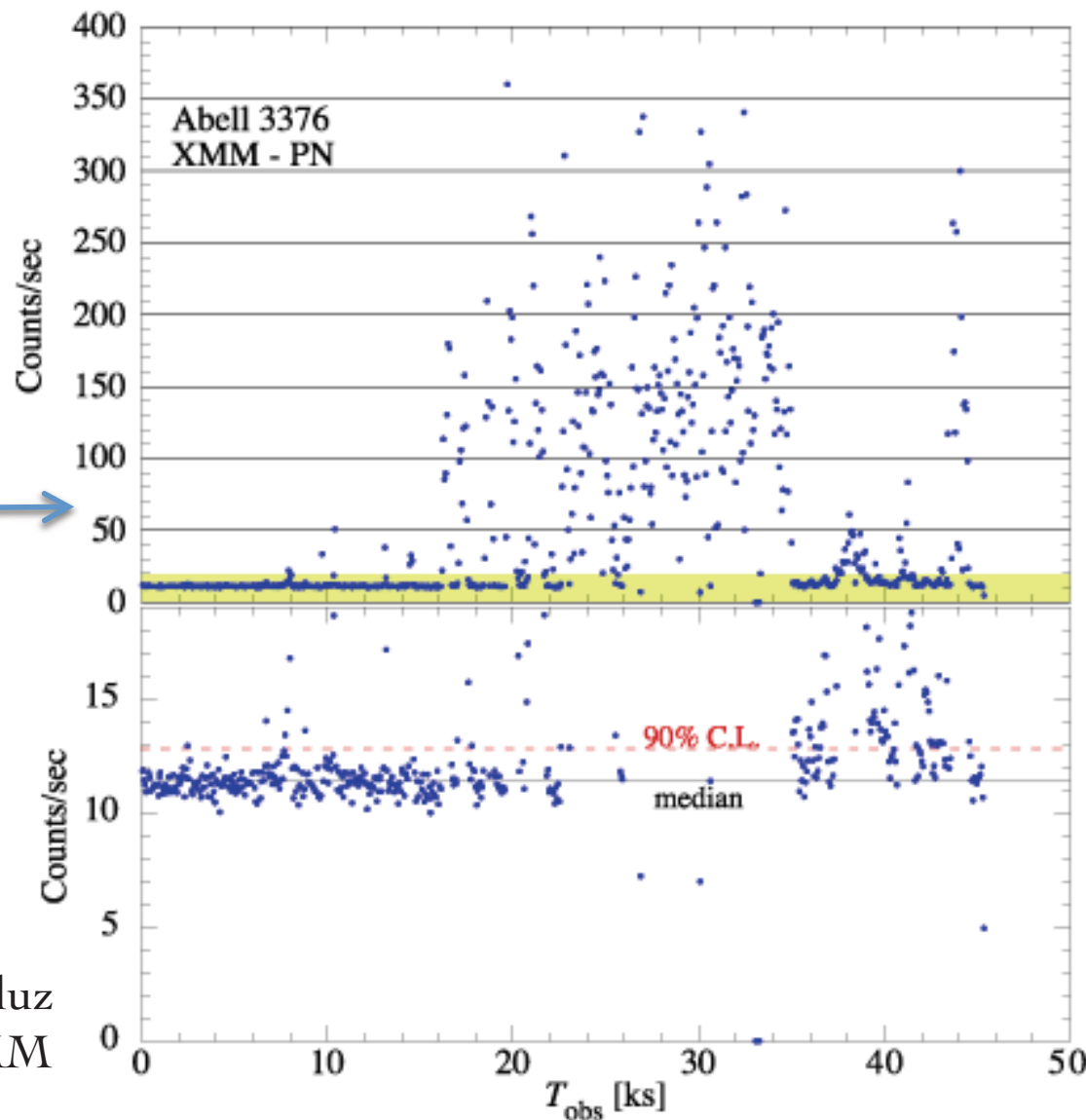


Dados de raios-X

Uma matriz (lista) de 4 dimensões: X, Y, energia, e tempo para cada fóton detectado.
(na verdade mais: qualidade, padrão da detecção, etc...)

Algumas projeções de interesse:

- 2-D X, Y (imagem)
- 1-D Energia (espectro)
- 1-D Tempo (curva de luz)



Exemplo de uma curva de luz
da observação de Abell 3376 pelo XMM

Dados de raios-X

Uma matriz (lista) de 4 dimensões: X, Y, energia, e tempo para cada fóton detectado.
(na verdade mais: qualidade, padrão da detecção, etc...)

```
dmlist Arquivo_Eventos.fits cols
```

Event file : arquivo de eventos

Columns for Table Block EVENTS

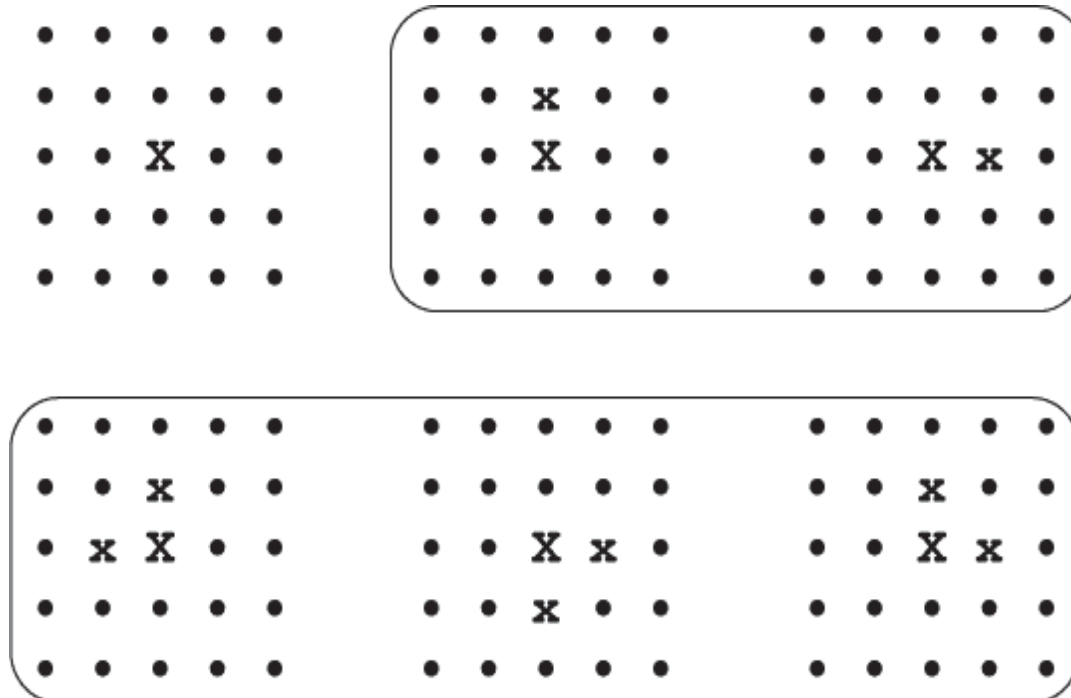
ColNo	Name	Unit	Type	Range	Null	
1	TIME	s	Real8	109327735.7619310021:109347734.9926590025	-	
Event Time						
2	RAWX	pixel	Int2	1:64	-	Event X Position
3	RAWY	pixel	Int2	2:200	-	Event Y Position
4	DETX	0.05 arcsec	Int2	-18283:13880	-	Linearised Camera X-
Coordinate o						
5	DETY	0.05 arcsec	Int2	-17527:15325	-	Linearised Camera Y-
Coordinate o						
6	POS(X,Y)	0.05 arcsec	Int4	1:51840	-99999999	The name of this column
7	PHA	channel	Int2	0:4095	-	Uncorrected Event Energy
8	PI	eV	Int2	0:32767	-32768	Corrected Event Energy
9	FLAG		Int4	-	-	Event Quality Flag
10	PATTERN		Byte			Combined pattern info 2
11	PAT_ID		Int2	-	32767	Combined pattern info 1
12	PAT_SEQ		Byte			Pattern Sequence
13	CCDNR		Byte			CCD number (1/12)

World Coord Transforms for Columns in Table Block EVENTS

```
ColNo      Name
4:  DETX_COORD      = +0 +1.38889E-05 * (DETX -0)
5:  DETY_COORD      = +0 +1.38889E-05 * (DETY -0)
6:  EQPOS(RA ) = (+328.3778)[deg] +TAN[(-1.38889E-05)* (POS(X)-( +25921.0))]
      (DEC)      (+17.7089 )      (+1.38889E-05) ( (Y) (+25921.0))
```

Redução dos dados

- Procedimentos específicos de cada satélite/detector
 - ✓ SAS (XMM), CIAO (Chandra), Suzaku ftools, ROSAT es
- Criação de um “arquivo de eventos”.
 - ✓ cada evento deveria corresponder a uma detecção de um fóton.
- Filtragem de acordo com o padrão da detecção:
 - ✓ melhor calibração, maior chance de ser um fóton.



Background

- Filtragem de “flares”, períodos de alto background:

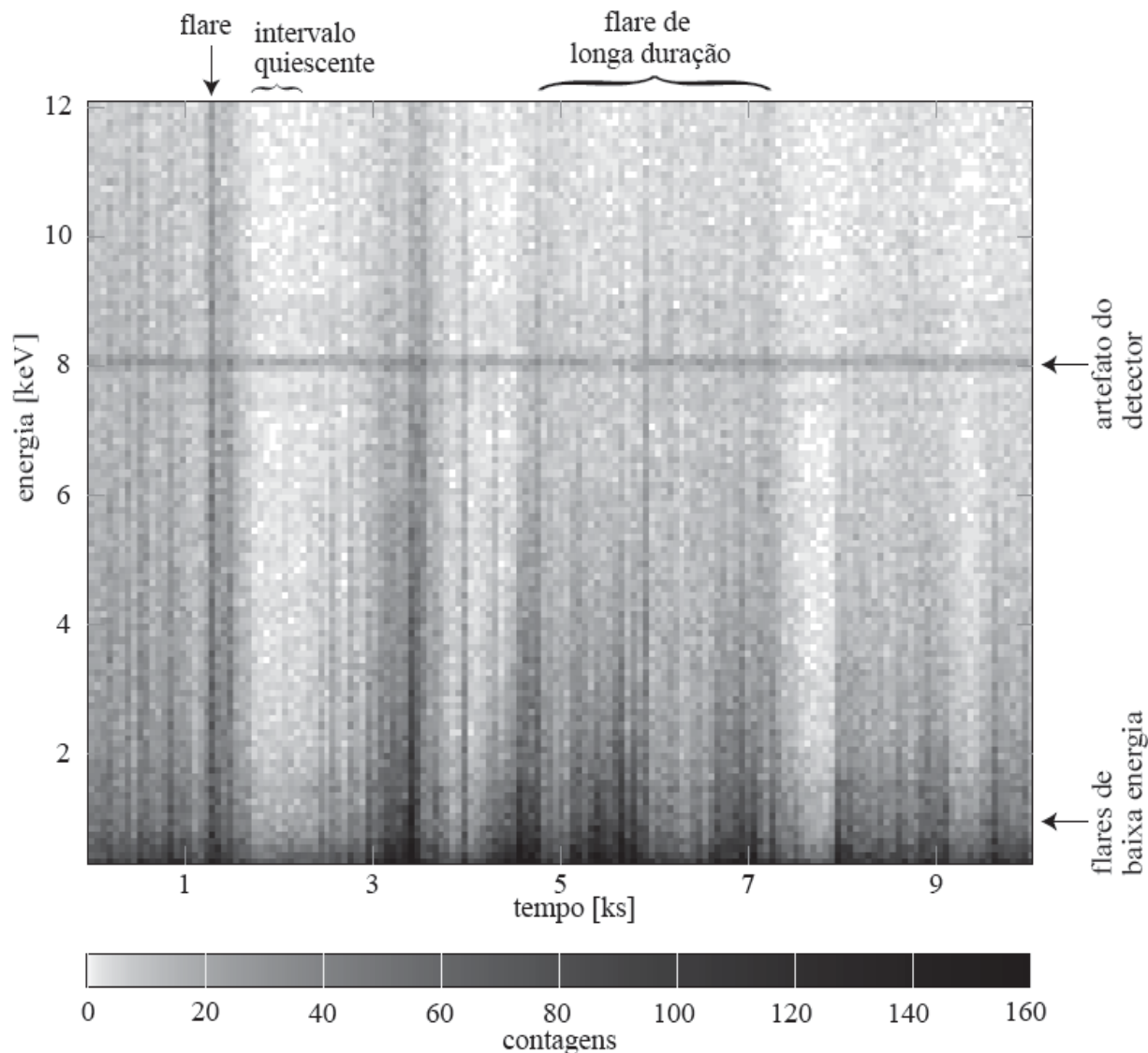
- ✓ partículas carregadas do vento solar
- ✓ Para o XMM, pode ser uma fração considerável do tempo total de observação.

- Dois tipos de background:

- ✓ “cósmico”: raios-X de fontes não resolvidas.

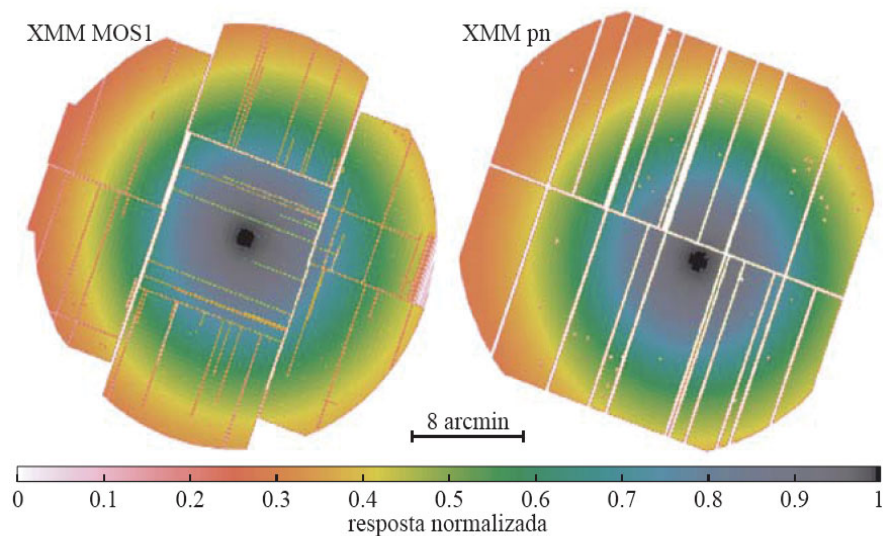
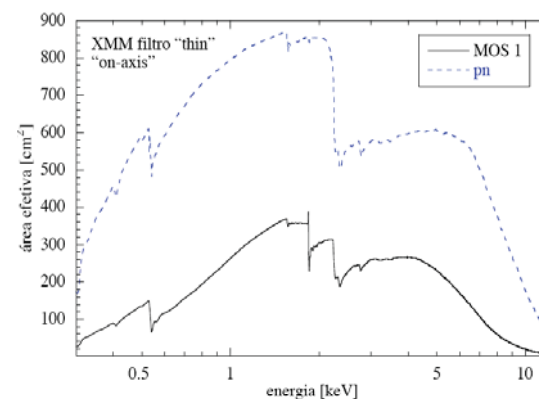
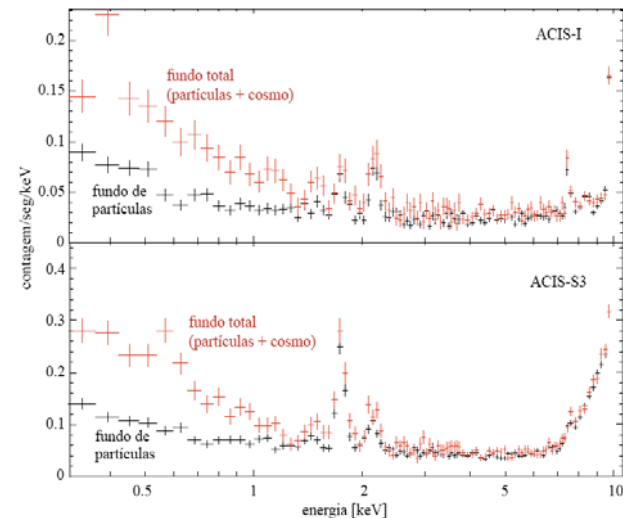
- ✓ partículas.

- Tratamento diferente, pois interagem diferentemente com o telescópio.



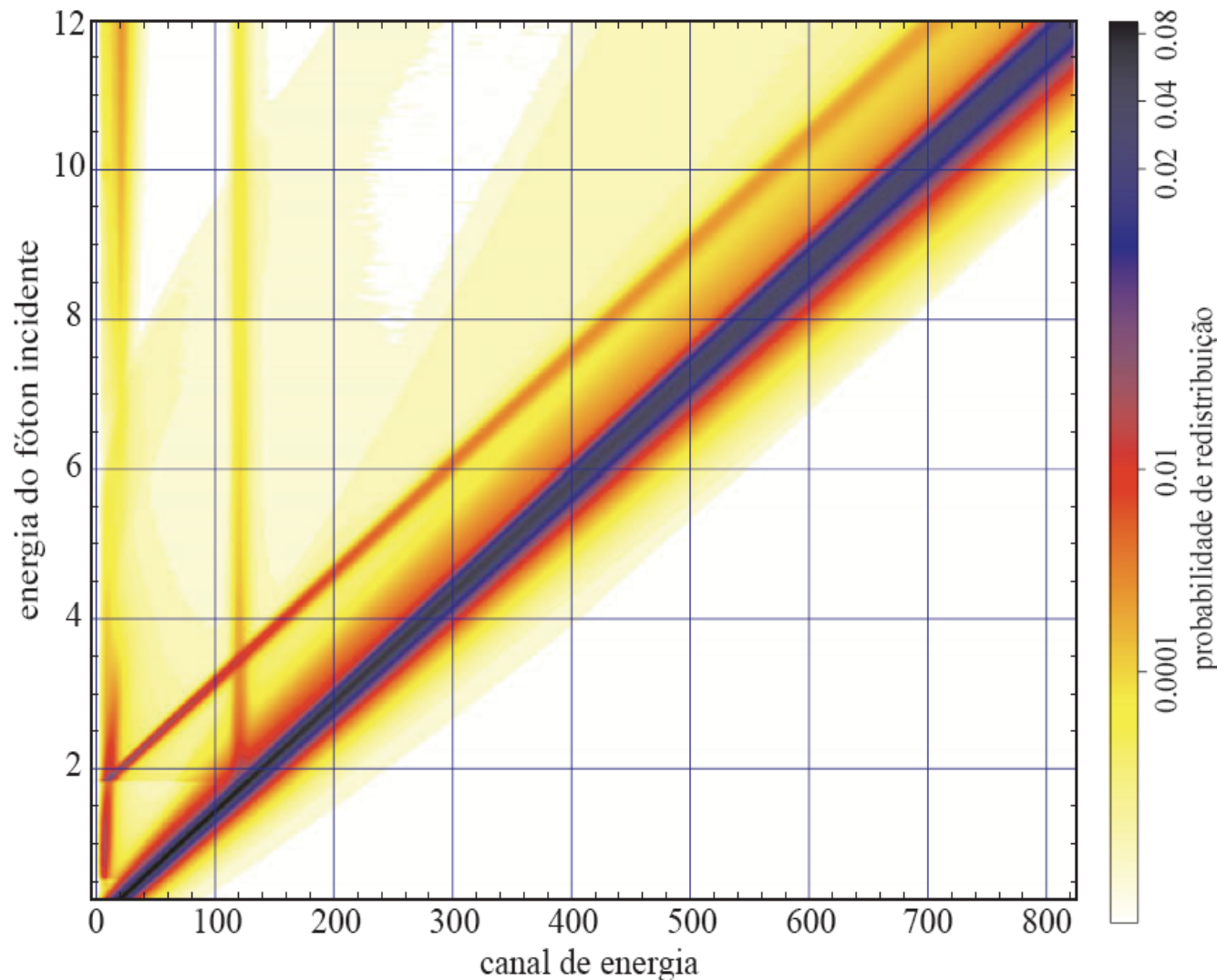
Redução dos dados

- Para análise espectroscópica, é preciso preparar um espectro de fundo.
 - ✓ para fontes extensas é comum e mais prático utilizar observações sobrepostas (*stacks*) de regiões sem fontes (em raios-X) resolvidas.
 - ✓ Deve ser levado em conta a variação do **espectro de fundo** com a latitude galáctica, variação do fundo não cosmológico (i.e., partículas), variação do fundo devido a alteração das características (i.e., estrago) dos detectores.
- Correção do **vignetting** (variação da eficiência em função da posição no detector).
 - ✓ Variação da “área equivalente” em função da posição e energia do fóton.
 - ✓ Arquivo ARF (*Ancillary Response File*).



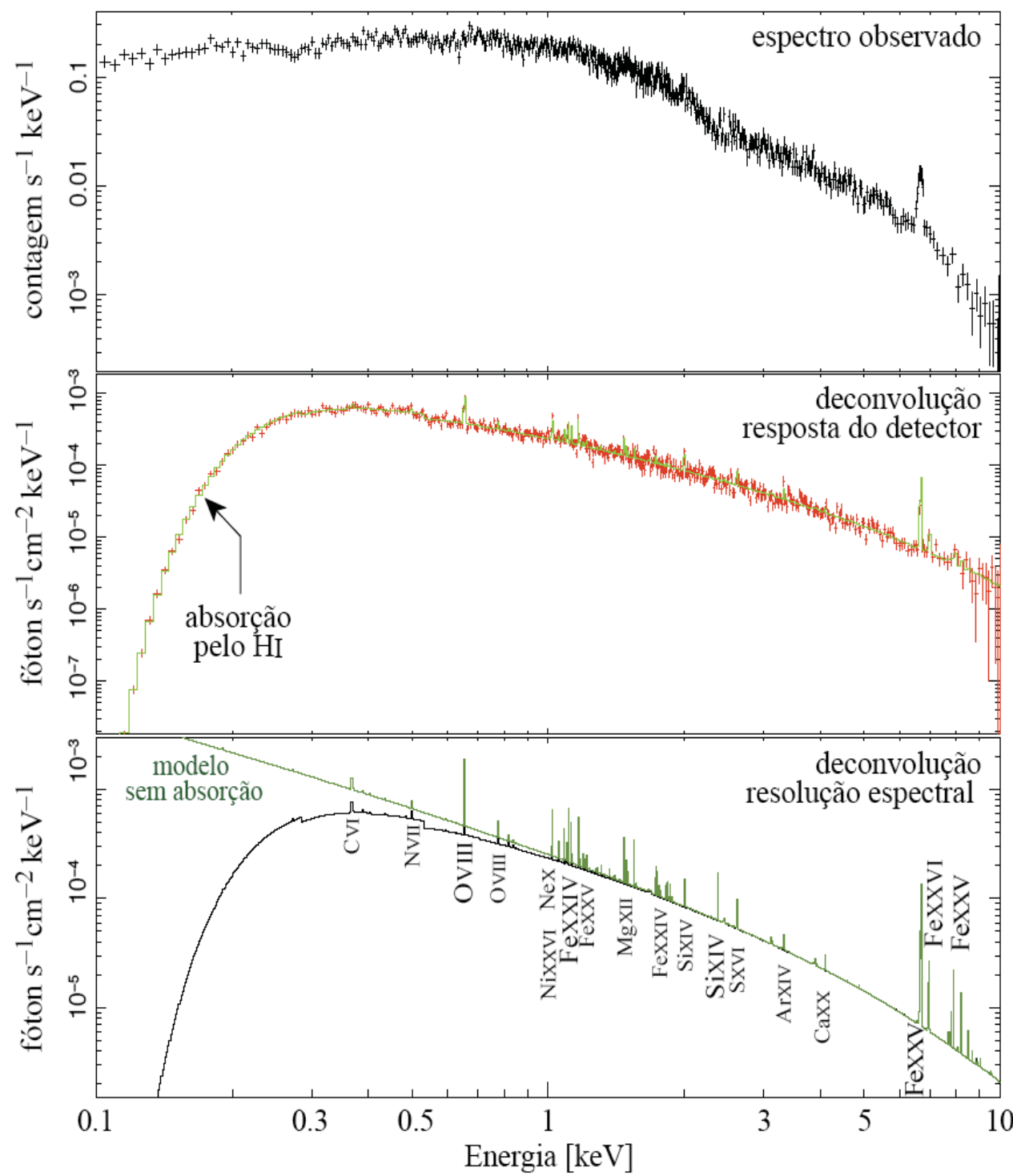
Redução dos dados

- Matriz de redistribuição dos fótons (RMF):
 - ✓ A energia com que o fóton é medido não corresponde necessariamente à energia do fóton.
 - ✓ RMF: probabilidade do fóton de energia E_i ser detectado com energia E_j .
 - ✓ Convolução com o espectro.



exemplo da RMF p/ o
detector ACIS-I, Chandra

- Análise espectroscópica
- Exemplo de uma observação de 100 ks com pn-XMM
- Correção com as matrizes RMF e ARF; subtração do fundo.
- Ajuste de um modelo de emissão de um plasma opticamente fino:
 - ✓ MEKAL, APEC, R-S



Espectroscopia resolvida espacialmente

$$C(i,r) = \Delta t \times \left(PSF(r) \otimes \int R(i,E) A(E,r) S(E,r) dE \right)$$

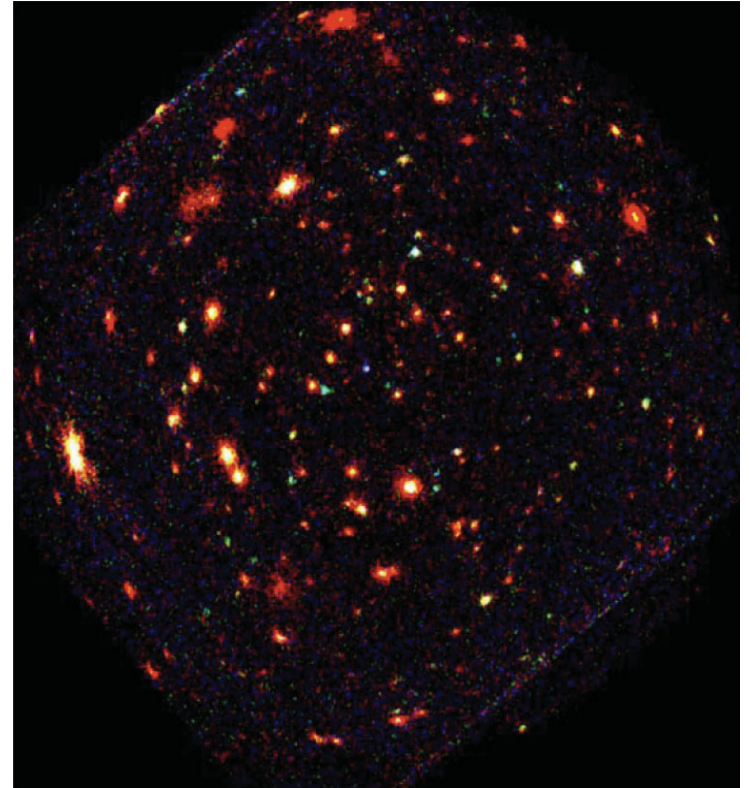
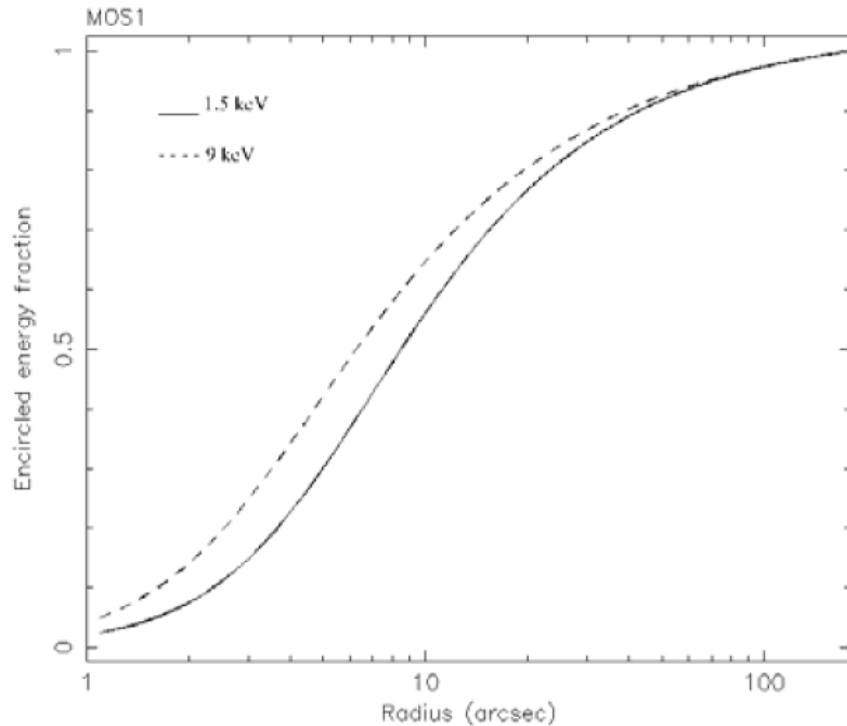
- $C \Rightarrow$ contagens observadas na posição r e canal de energia i .
- $S \Rightarrow$ fluxo emitido pela fonte (p.ex., em fótons/s/cm²/keV).
- $A \Rightarrow$ área equivalente (arquivo ARF).
- $R \Rightarrow$ probabilidade do fóton de energia E ser detectado no canal i (RMF).
- $PSF \Rightarrow$ point-spread-function.
- $\Delta t \Rightarrow$ tempo de integração.

Problema: determinar S



Ajuste espectral (tentativa e erro)

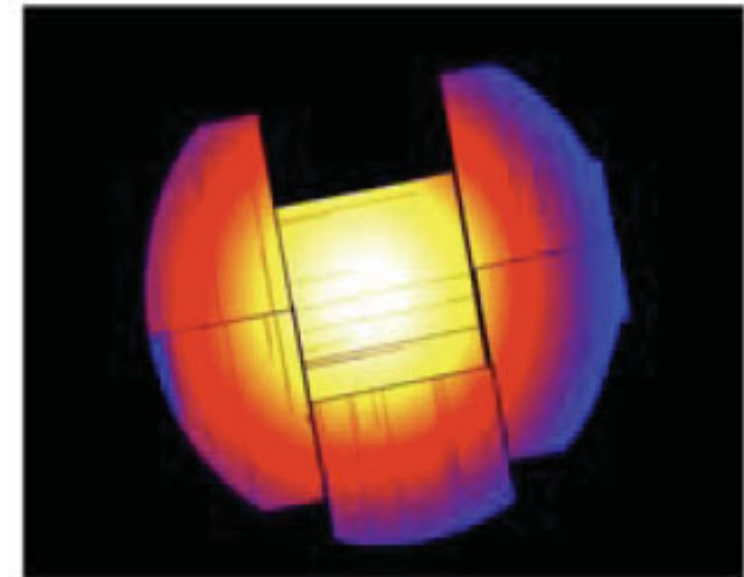
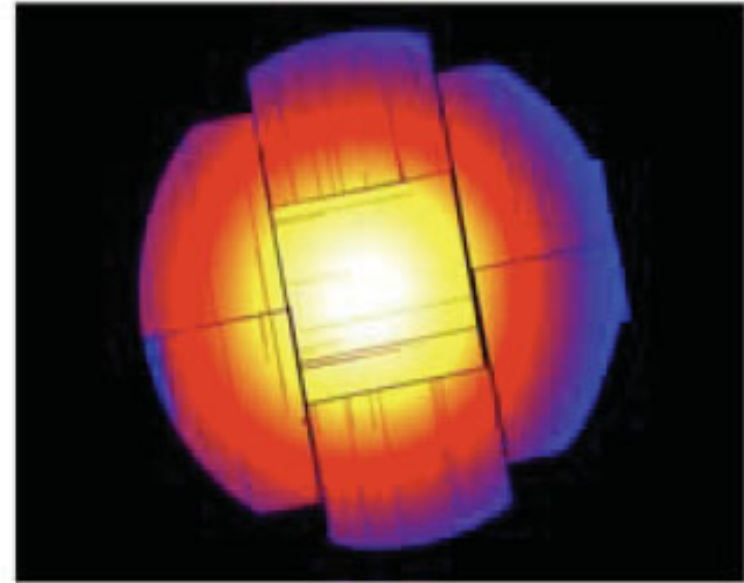
PSF: point spread function



- Fração da energia de uma fonte pontual em função do raio do círculo ao redor da fonte.
- Depende da energia do fóton incidente e da posição no detector.
- PSFs não são circulares => introduz um “shear” na imagem.
- Chandra => PSF semelhante ao seeing de telescópios ópticos na Terra
- XMM => PSF “com asas”.

Acidentes de percurso

- MOS1, antes e depois de perder um dos CCDs, devido provavelmente à colisão de um micro-meteorito ($< 1 \mu$) em março / 2005.
- Colunas de “bad pixels” vão aparecendo com o tempo.
- Segunda colisão com micro-meteorito na revolução 2382 (dezembro/2012).

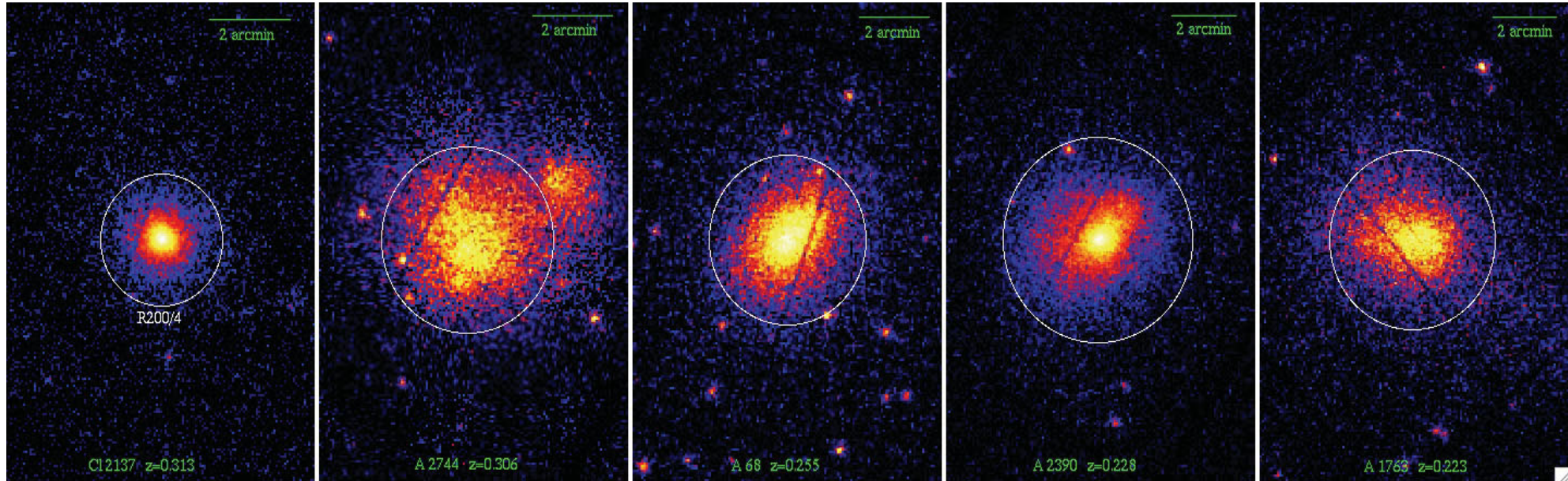


Análise de fonte extensa: exemplo XMM

- Obter os dados do arquivo via HEASARC ou XSA (XMM-Newton Science Archive)
 - ✓ Estes dados, pré-processados pela equipe do XMM, são uma coleção de arquivos ODF (Observation Data Files).
- Obter os arquivos de calibração adequados à observação, CCF (Current Calibration Files).
- Processar os arquivos ODF e criar arquivos de eventos para os detectores MOS1, MOS2 e pn.
 - ✓ Estes arquivos de eventos também podem ser obtidos do XSA diretamente, mas recomenda-se recriá-los.
- Filtrar os eventos com padrões que correspondem a raios cósmicos;
- Excluir os intervalos de tempo com alto background de partículas (usar curva de luz)
- Gerar um arquivo de fundo (background) a partir de arquivos de eventos de “blank fields” (disponíveis no site do XMM).

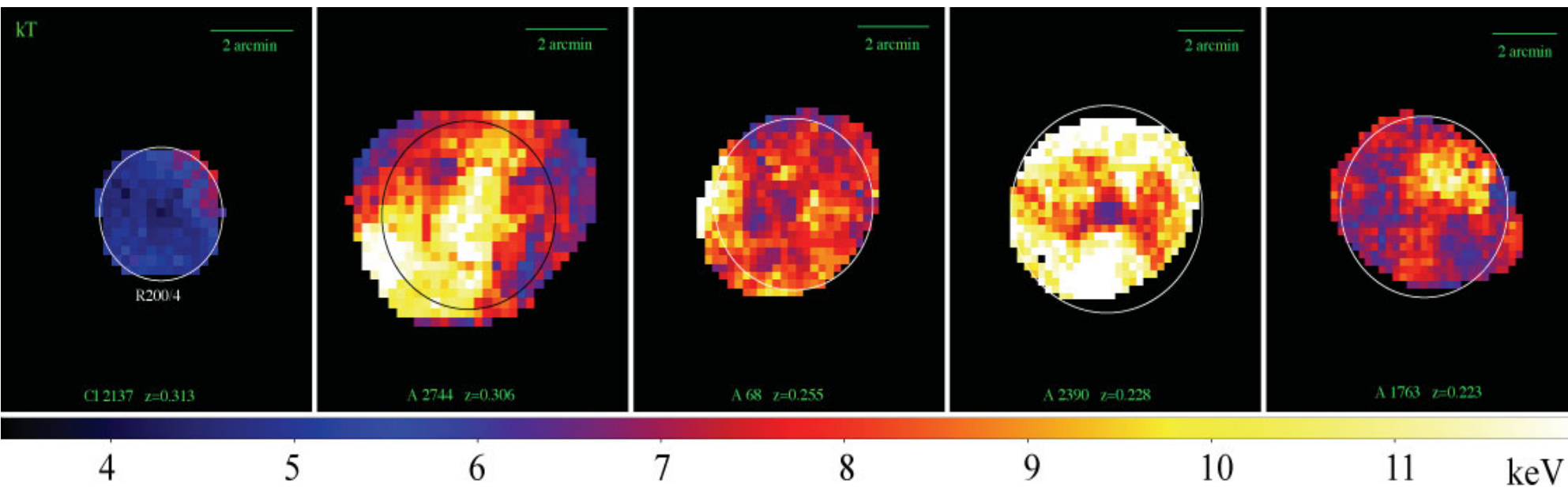
Análise de fonte extensa: exemplo XMM

- Com o ds9, é possível ver a imagem a partir de um arquivo de eventos. É possível rebinar a imagem (necessário no caso do XMM) e aplicar filtros (por exemplo, selecionar apenas os eventos entre um intervalo de "energia").
- Para uma análise quantitativa da imagem, gerar um **exposure map**, um "mapa" que leva em conta o vignetting do detector e as colunas de bad pixel. (semelhante com a correção de flat field no óptico).
- Para espectroscopia, deve-se gerar os arquivos RMF e ARF. Todo satélite tem suas próprias ferramentas para isto.
- Extrair o espectro do arquivo de eventos e extrair o espectro de fundo na mesma região (em coordenadas do detector) do arquivo de fundo do blank field.
- Estes 4 arquivos, espectro da fonte, do fundo, RMF e ARF podem ser lidos pelo XSPEC e analisados (ajuste de modelos de emissão, por exemplo).
- Os procedimentos aqui são basicamente os mesmos para qualquer todos os observatórios de raios-X desde o *Einstein*.

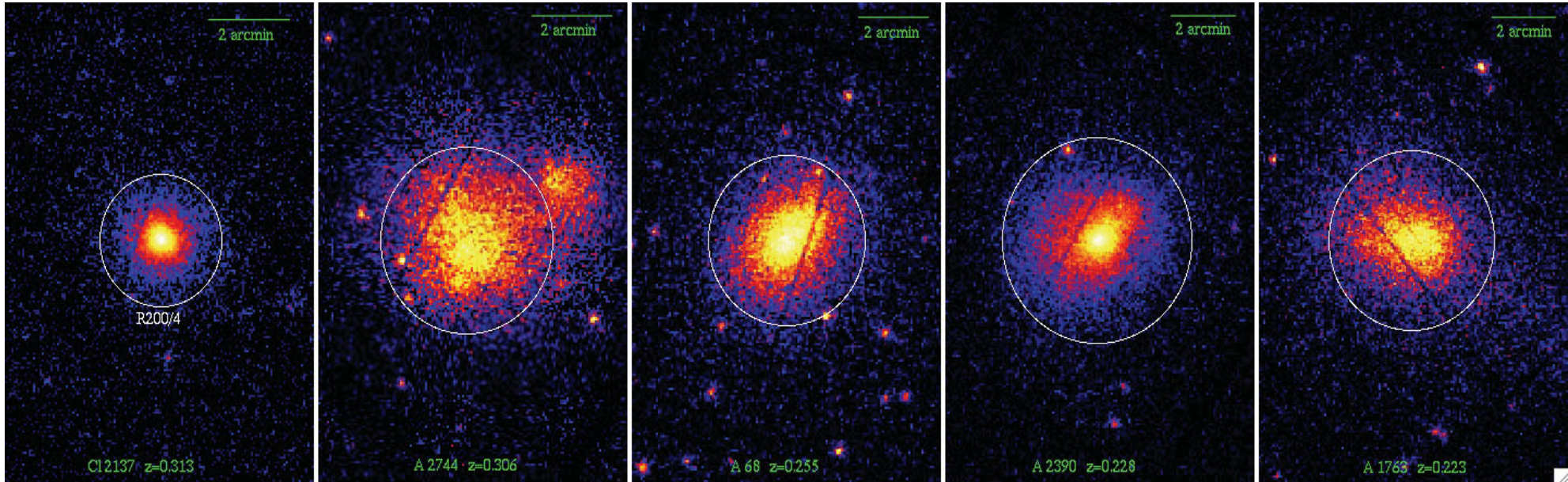


Dados XMM

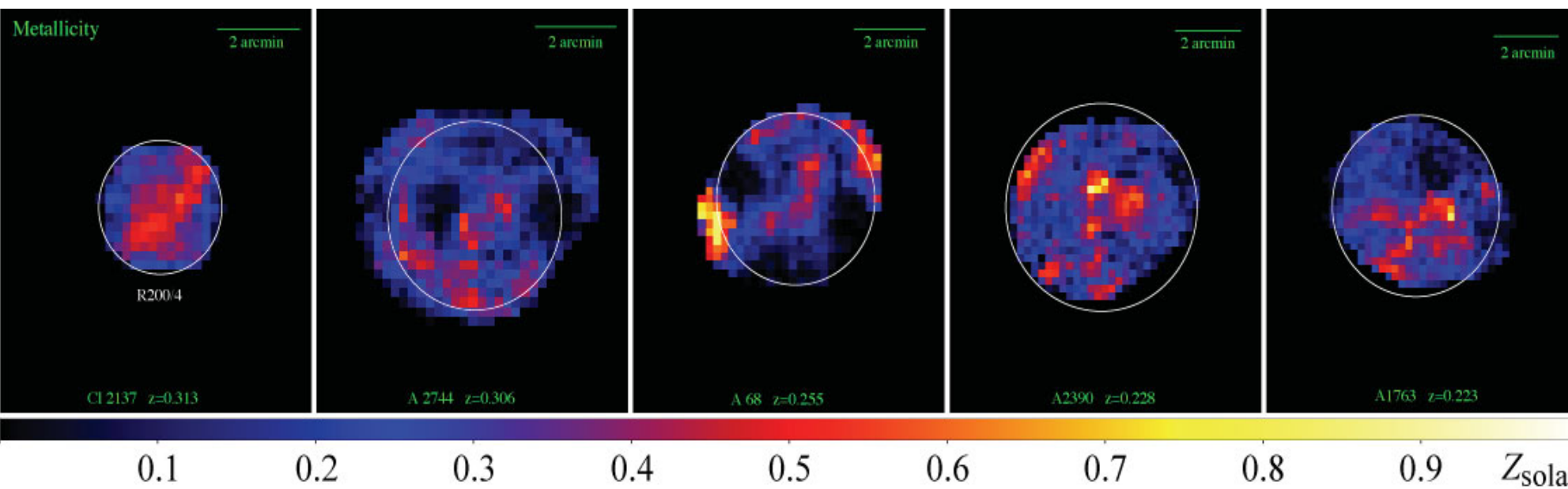
Temperatura



Aglomerados observados em $z \sim 0.3$



Metallicidade



Aglomerados observados em $z \sim 0.3$

Sites para análise de dados

- HEASARC: heasarc.gsfc.nasa.gov
 - ✓ além de softwares incontornáveis (ftools, xspec,...) serve como uma base de dados ou meta-catálogo de todas as observações em raios-X.
- CXC, Chandra X-ray Center: cxc.harvard.edu
 - ✓ CIAO+SHERPA = software para redução e análise das observações Chandra (algumas funções podem ser usadas com dados XMM).
- XMM-Newton Science Operations Centre: xmm.esac.esa.int
 - ✓ SAS = software para redução e análise dos dados XMM.
- DS9: ds9.si.edu
 - ✓ software para visualização e análise rápida de imagens e cubos de dados.

Referências

- McNamara B.R. & Nulsen P.E.J., 2007, ARA&A 45, 117
- Voit G.M., 2005, Rev. Mod. Phys. 77, 207
- Böhringer H. & Werner N., 2010, Astron. Astrophys. Rev. 18, 127
- Markevitch M. & Vikhlinin A., 2007, Phys. Rep. 443, 1
- Texto em português:
 - ✓ Notas de aula de Astrofísica Extragaláctica e Estrutura do Universo em Grande Escala
<www.astro.iag.usp.br/~gastao/Extragal.html>