

銀河団ガスの放射冷却によるコア構造の進化



2006/12/26@立教大学

東京都立大学 宇宙物理理論研究室

博士課程3年 赤堀 卓也

共同研究者: 政井 邦昭(首都大)

銀河団とは

free-fall/crossing time

$$t_{ff} \cong t_{cr} = R / \sigma_{*r} \\ \sim 1 \left(\frac{R}{1 \text{Mpc}} \right) \left(\frac{\sigma_{*r}}{10^3 \text{km/s}} \right)^{-1} (\text{Gyr})$$

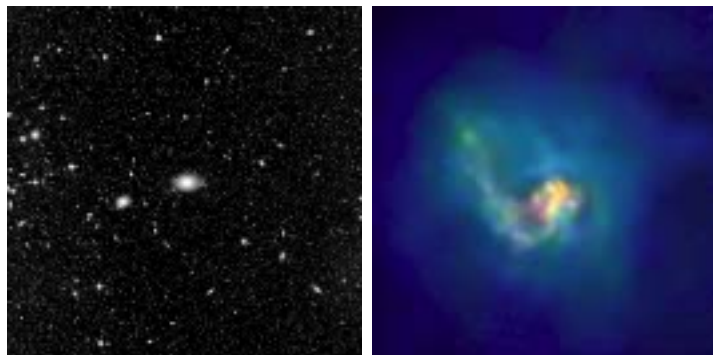
relaxation time

$$t_{rel} > t_H \longleftrightarrow t_{vi} \sim t_{ff} < t_H$$

メンバー

- 数百 数千の銀河
 - X線を放射する銀河団ガス
 - ダークマター
- 重力的に緩和しつつある天体として宇宙で最大

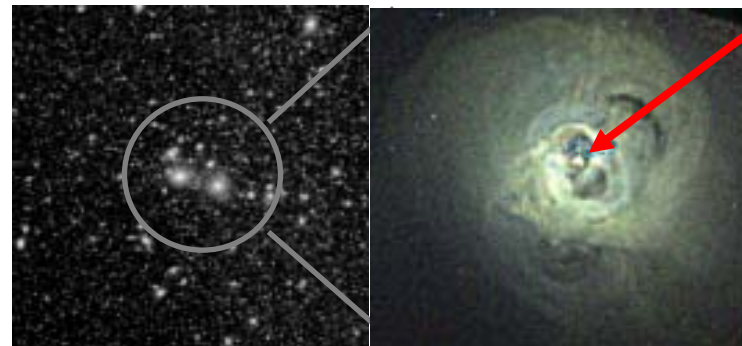
セントウルス銀河団



可視光線

X線

ペルセウス銀河団



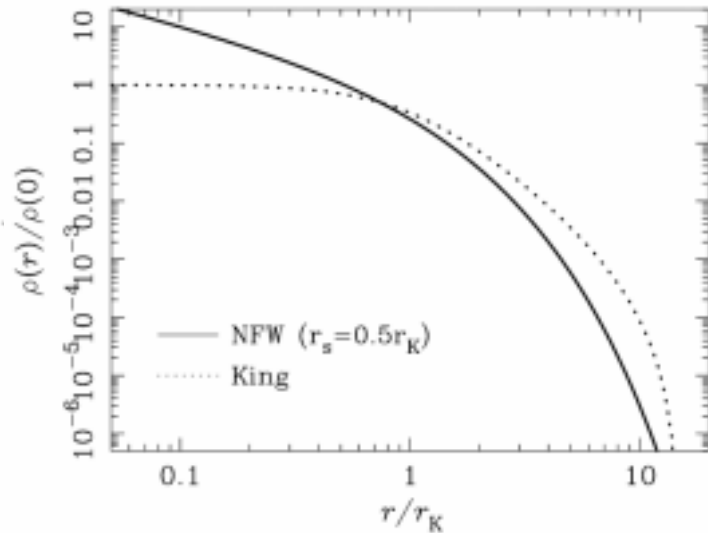
可視光線

X線

NGC1275
3C85



等温力学平衡モデル



- 銀河・ダークマター
 - 無衝突系粒子の分布解 **Kingモデル** (King 1966)
- 銀河団ガス
 - 等温静水圧平衡 **モデル** (Cavaliere, Fusco-Femiano 1976)

球対称: Jeansの式+静水圧平衡の式

$$\frac{kT}{\mu m} \left(\frac{d \ln \rho_g}{d \ln r} + \frac{d \ln T}{d \ln r} \right) = \sigma_r^2 \left(\frac{d \ln \rho_*}{d \ln r} + \frac{d \ln \sigma_r^2}{d \ln r} \right)$$

等温ならば

$$\beta_{prof} \equiv \frac{d \ln \rho_g / d \ln r}{d \ln \rho_* / d \ln r} \cong \frac{\sigma_{*r}^2}{kT / \mu m} \equiv \beta_{spec}$$

密度分布の近似関数

$$\rho_* = \rho_{*0} \left[1 + (r/r_k)^2 \right]^{3/2}$$

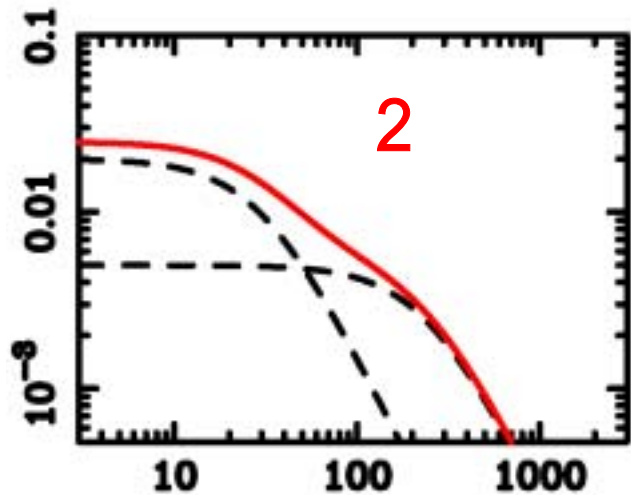
$$\rho_g = \rho_0 \left[1 + (r/r_c)^2 \right]^{-3\beta/2}$$

密度一定の領域の目安:
コア半径

$$r_k = r_c = \sqrt{\frac{9\sigma_r^2}{4\pi G\rho_0}}$$

銀河団の二重構造

- 銀河団ガスのX線観測 モデル
に比べて銀河団中心領域に有意な
輝度(密度)超過
- 2つの モデル分布の重ね合わせ

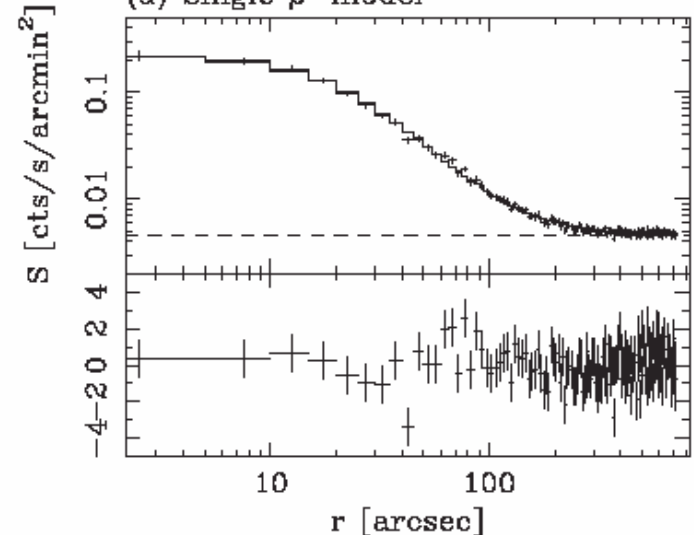


$$\rho_g = \rho_1 [1 + (r/r_1)^2]^{-3\beta_1/2} + \rho_2 [1 + (r/r_2)^2]^{-3\beta_2/2}$$

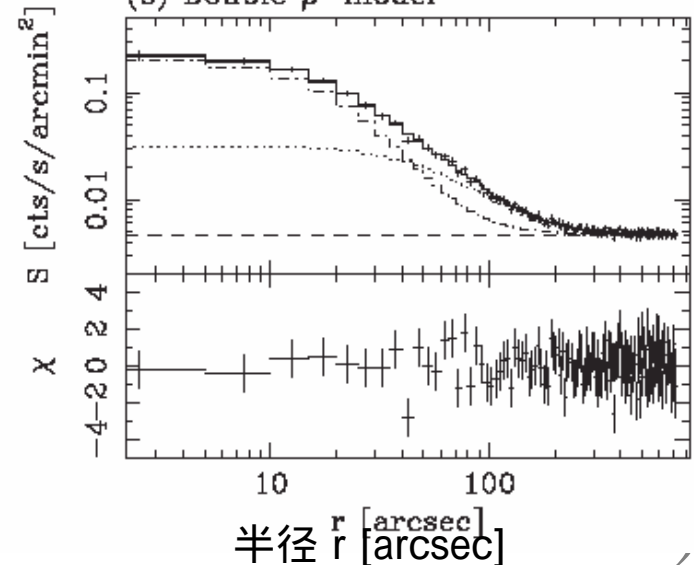
Abell1689:
Ota, Mitsuda (2004)

表面輝度S [cts/s/arcmin²]

(a) Single β -model

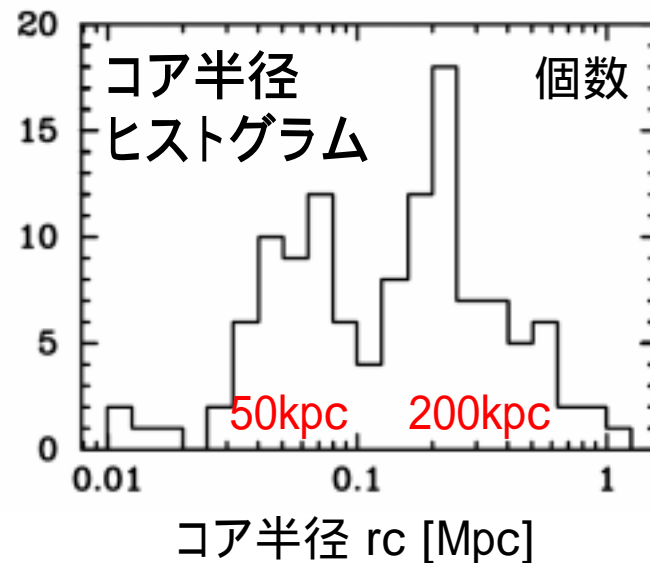
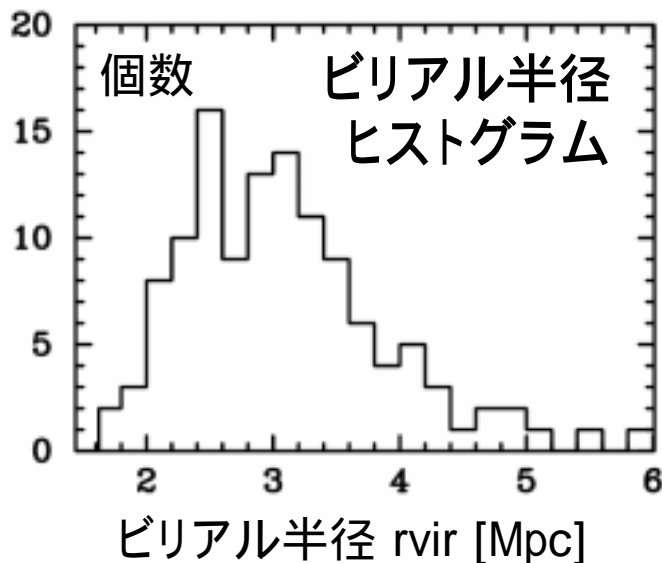


(b) Double β -model



断熱相似的描像からの脱却

- 121銀河団の統計
 - 42個の近傍銀河団 ($z < 0.1$): Mohr et al. (1999)
 - 79個の遠方銀河団 ($z > 0.1$): Ota, Mitsuda (2002;2004)
- 典型的な2つのピーク分布



考えられる起源

rc=120 kpcを境に2つの組に分ける
Akahori, Masai (2005)

大きなコア 相関あり

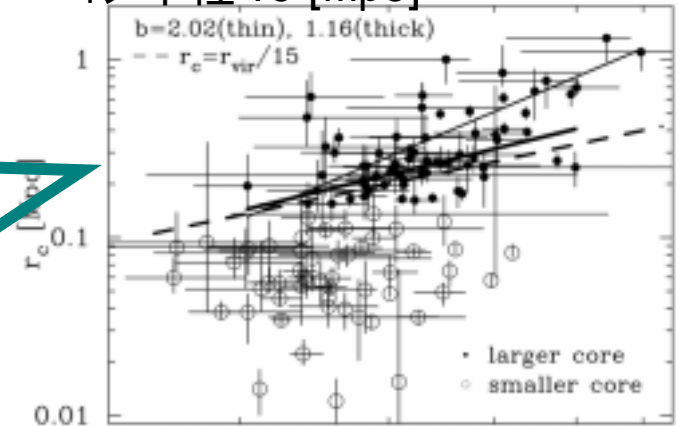
傾き $b=1.16$ (140--300 kpc)

誤差の範囲で自己相似性($b=1$)と矛盾なし

小さなコア 相関なし

相関係数 $r_{xy}=0.094-0.097$

コア半径 r_c [Mpc]



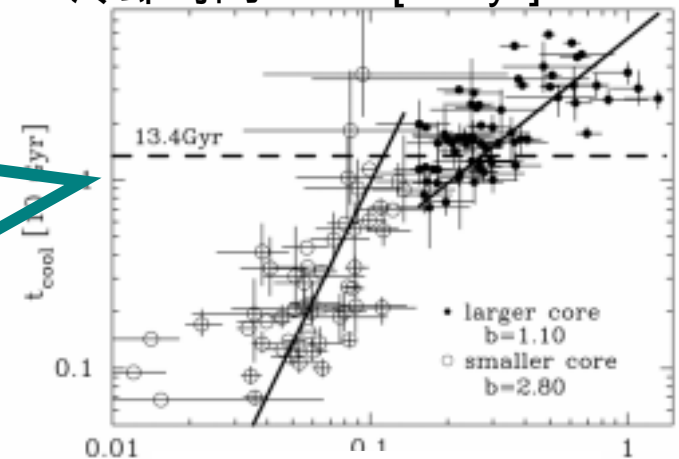
ビリアル半径 r_{vir} [Mpc]

小さなコア 相関あり

ほとんどが宇宙年齢よりも短い

小さなコアは放射冷却の影響が関係しているかもしれない

冷却時間 t_{cool} [10Gyr]



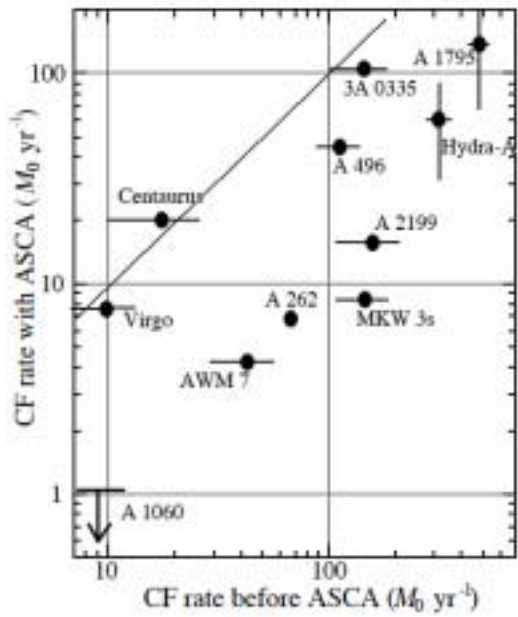
コア半径 r_c [Mpc]

cooling time

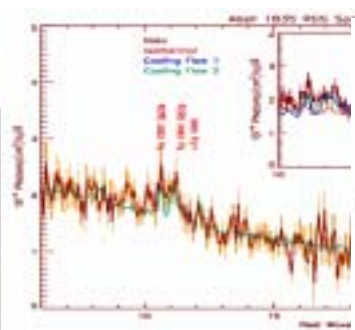
$$t_{cool} = 3nkT / n^2 \Lambda$$

Cooling Flow 問題

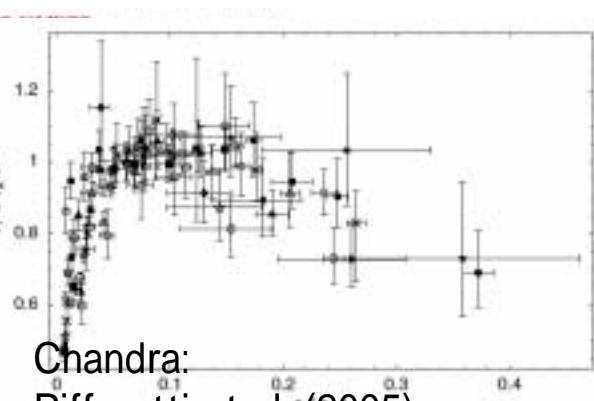
- Cooling Flowモデル: ガスは内側の圧力減少を補うために中心に向かい激しくフローする?



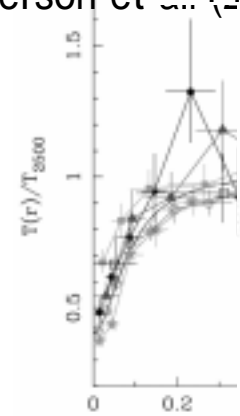
ASCA: Makishima et al. (2001)



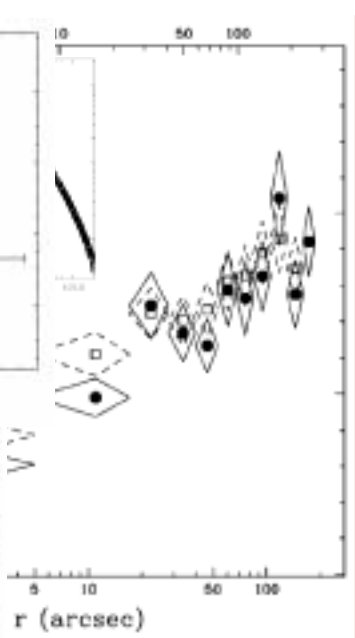
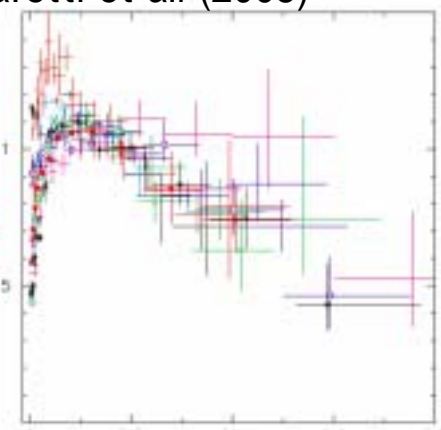
XMM-Newton
Peterson et al. (2005)



Chandra:
Piffaretti et al. (2005)

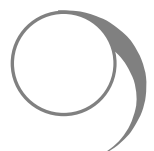


Vikhlinin et al. (2005)



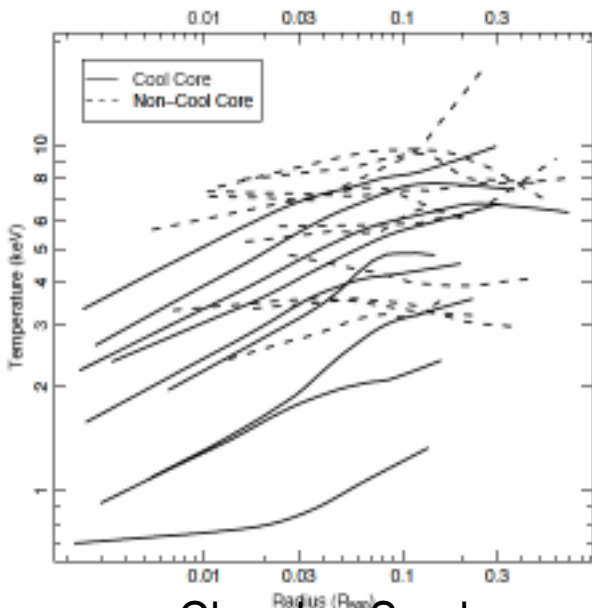
Ira A2029:
et al. (2002)

(2001)

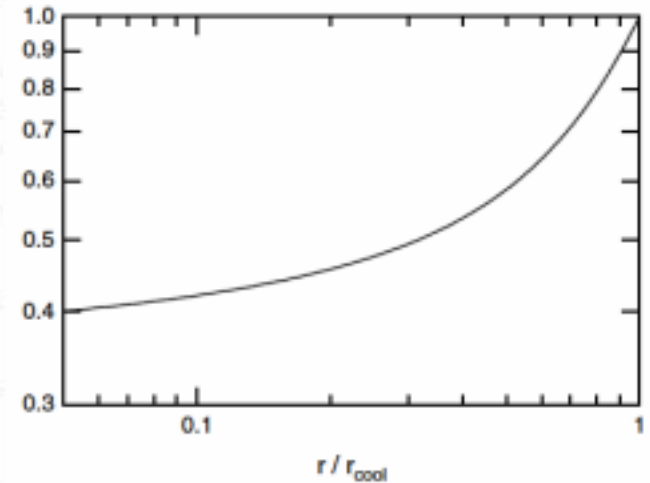
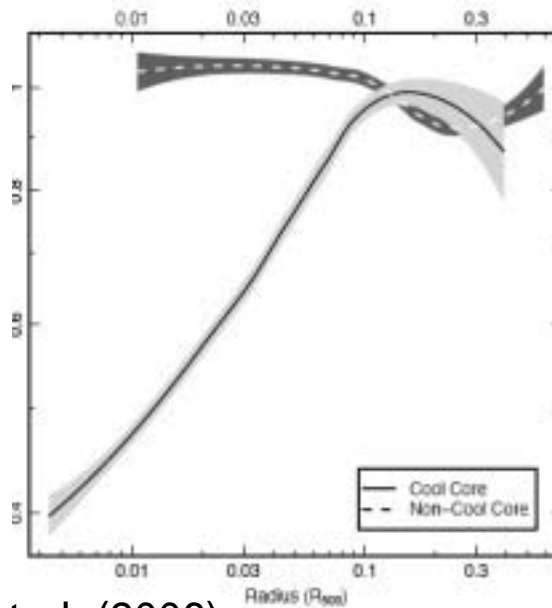


緩やかに冷える局面

- 初期の冷却時間程度まではむしろ緩やかに冷える
- 準静水圧平衡を保って冷える場合、温度プロファイルは中心で一定に向かっていくように見える



Chandra: Sanderson et al. (2006)



Masai, Kitayama (2004)



モデルと計算方法

◦ 動機

- 従来の銀河団像からの脱却した2つのコアスケールの新展開
- 放射冷却の影響 特に緩やかに冷えていくステージに重要な示唆があるのでは

◦ 目的

- 放射冷却する銀河団の力学的・熱的状态への理解
- 冷える過程での銀河団のコア半径の変化を探る

◦ 方法

- 初期に平衡にある銀河団の放射冷却の数値実験
- 大きなコアグループの典型的な銀河団の進化
- 進化するガスの密度分布を -モデルで解析



モデルと計算方法

モデル

- 銀河, 銀河団ガス, ダークマター 1:5:30 の標準的な銀河団
- DM と galaxies は King/NFW 分布の固定された重力ポテンシャル
- ガスの初期値は等温 モデル
 - $\beta = 2/3$ $T_{iso} = 1.5 T_{vir}$

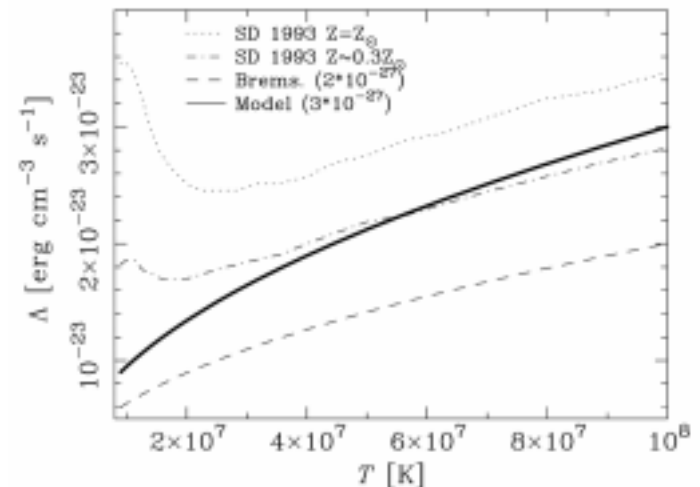
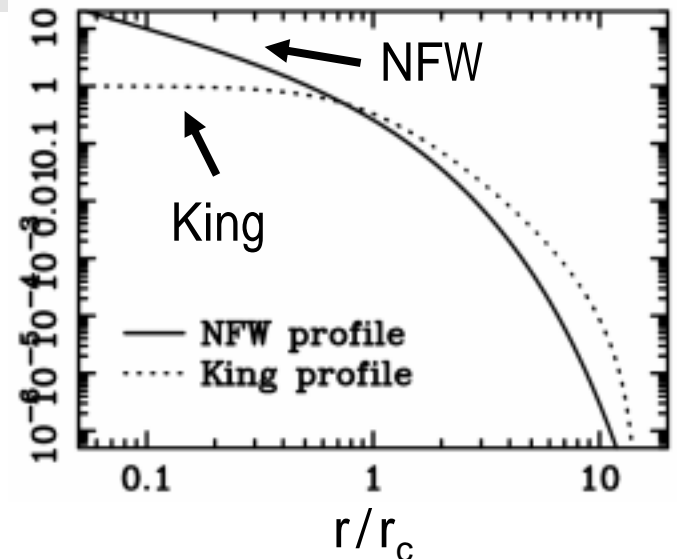
放射冷却

- 熱制動+輝線放射の近似関数
 - 40% 過小評価 @ 1.5 keV (t_{cool} 頃)
- 注目する t_{cool} まで計算

cooling function [erg/s/cm³]

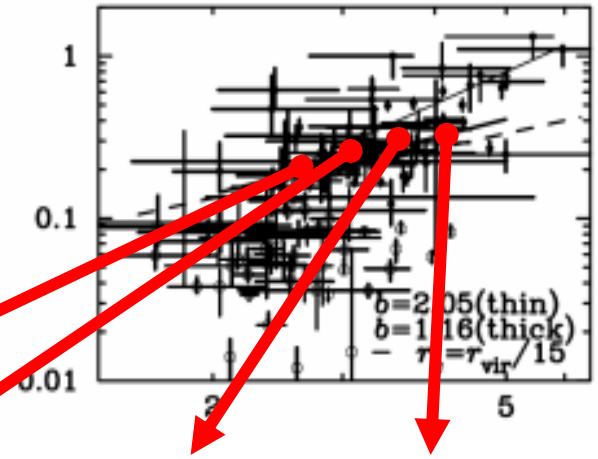
$$\Lambda = 3.0 \times 10^{-27} T^{1/2}$$

Dust成分の分布モデル



密度・温度変化

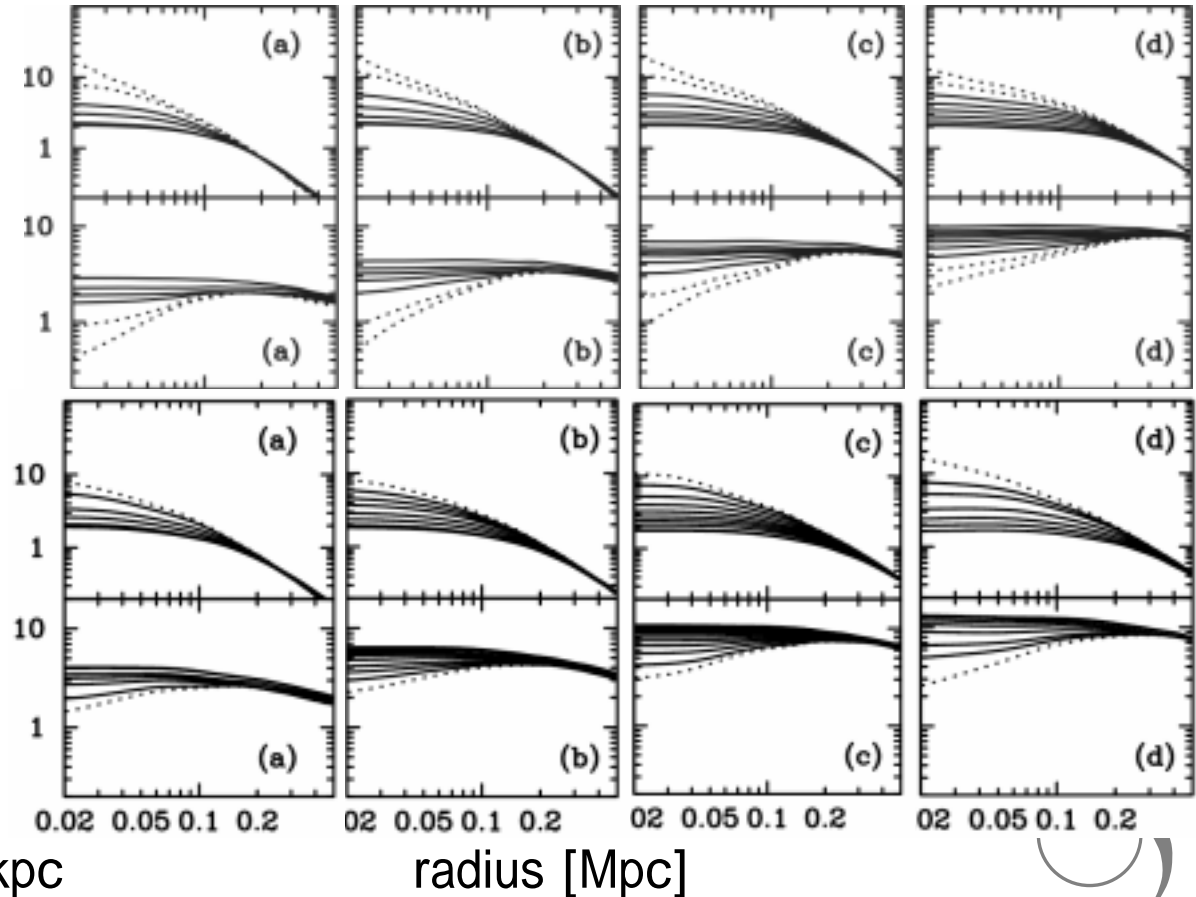
Akahori & Masai (2006)



密度 n [0.01cm^{-3}]
温度 T [keV]

上段: Kingの場合
下段: NFWの場合

- ガスは冷え、中心に向かい緩やかに降着
- King/NFWで見た目の差はわずか



計算の分解能は $\sim 10^{-17} \text{kpc}$

radius [Mpc]

モデル変数の進化

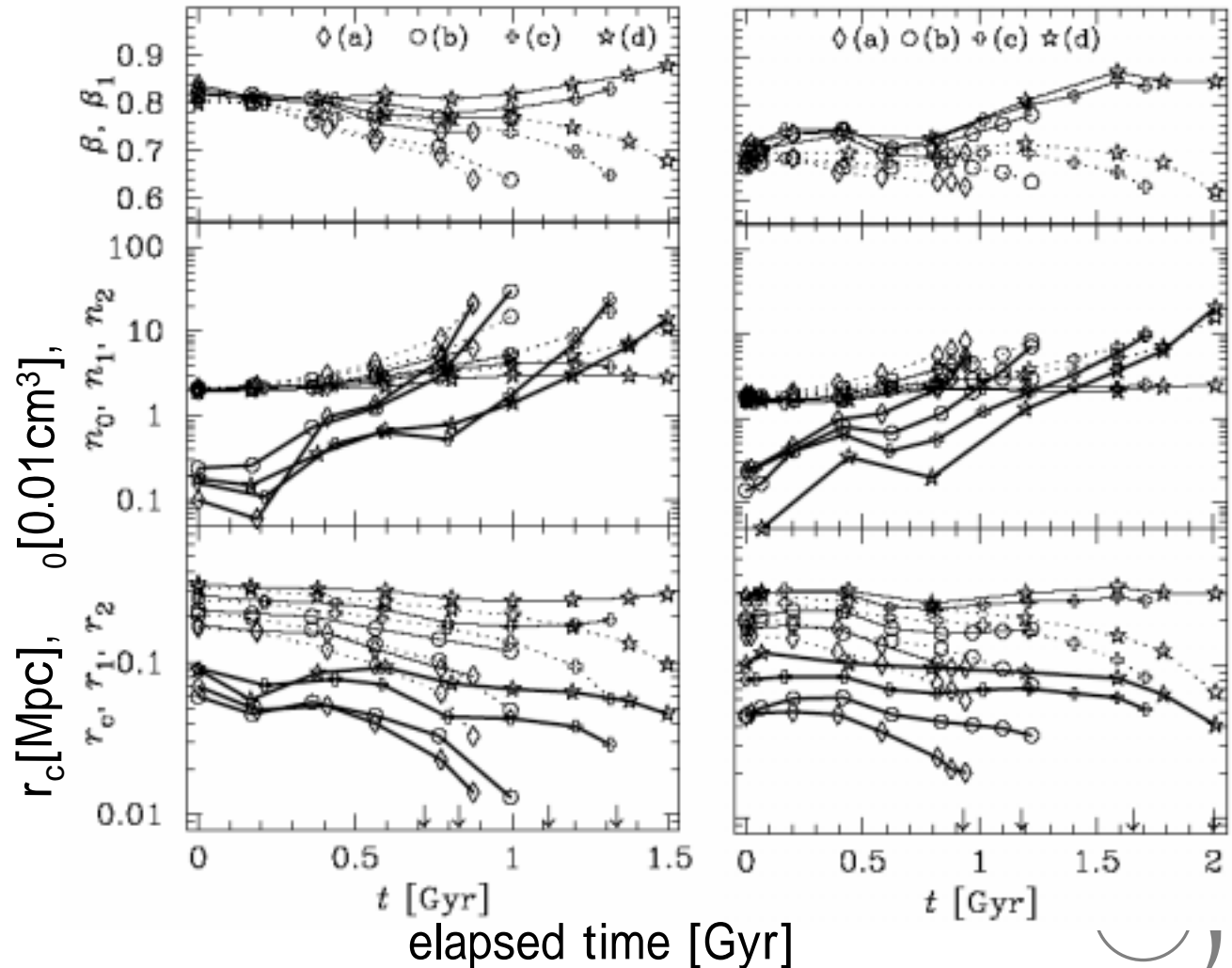
ダブル モデル

$$\rho_{gas} = \rho_1 [1 + (r/r_1)^2]^{-3\beta_1/2} + \rho_2 [1 + (r/r_2)^2]^{-3\beta_2/2}$$

左: Kingの場合 右: NFWの場合

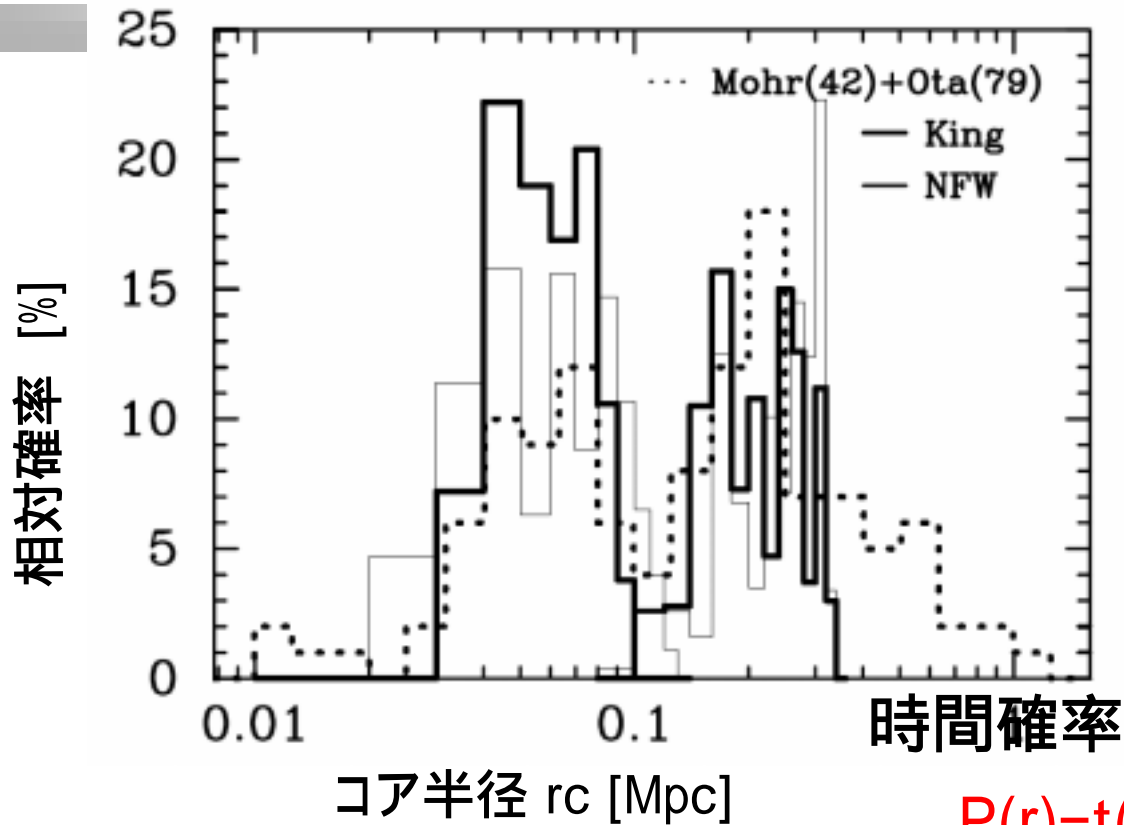
AM (2006)

- 外側成分
 - 密度で数倍
 - 半径で1/2
- 内側成分
 - 密度は指数関数増
 - 半径で1/3
- 熱的進化は内側成分がトレース



コア半径の相対確率

AM (2006)



$$P(r) = t(r, r + \Delta r) / t_{\text{cool}}$$

- 2つのピーク分布を確かに作る

- t_{cool} までの進化だけで小さいコア分布の広がりが説明できる
- 確率分布においては t_{cool} 頃の過渡的な進化の影響は小さい

準静水圧平衡の放射冷却

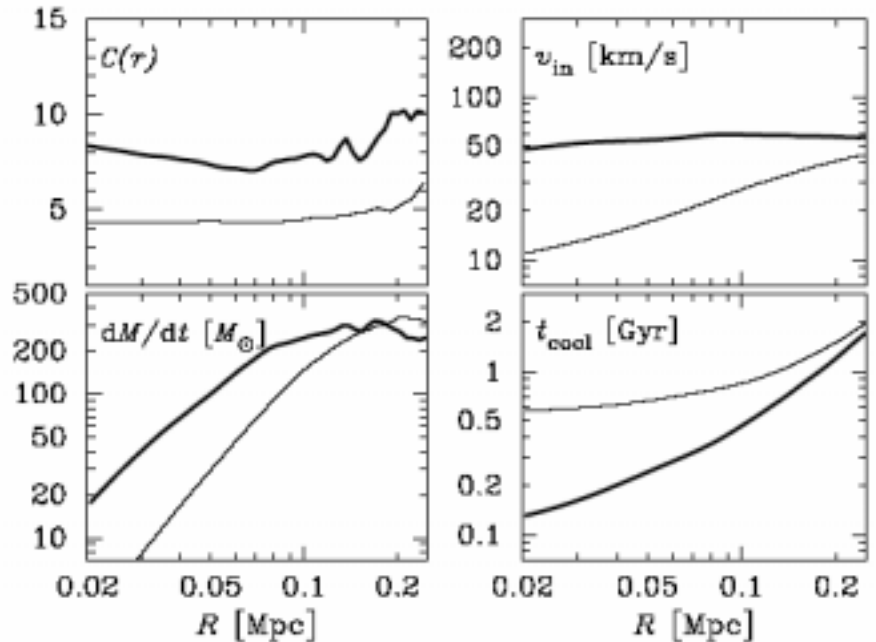
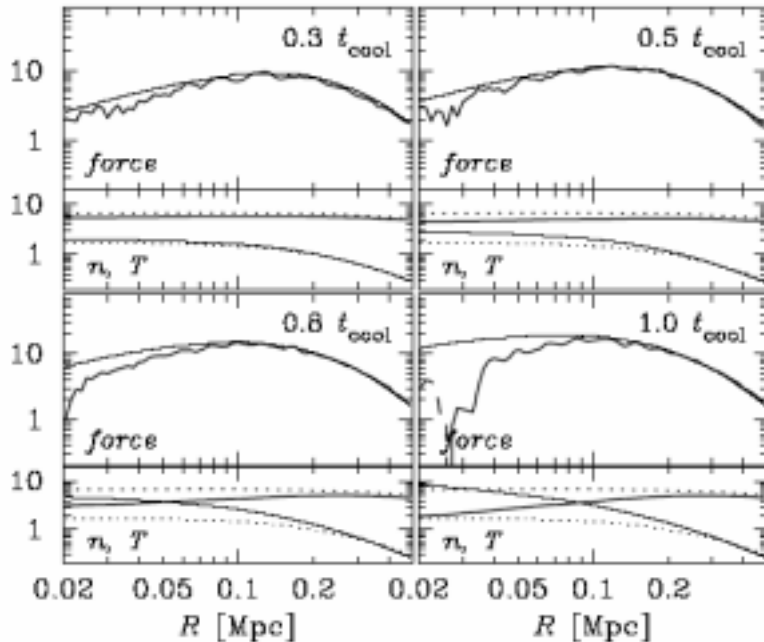
AM (2006)

- ガスは t_{cool} 頃まで 準静水圧平衡 を保って緩やかに冷えていく

parameter C

$$C(r) \equiv \frac{\tilde{M}_r / \tilde{t}_{\text{cool}}}{\dot{M}_r} \quad \tilde{M}_r = \frac{4\pi}{3} r^3 \rho \quad \tilde{t}_{\text{cool}} = \frac{3k\sqrt{T}}{\epsilon_{\text{ff}} n} \quad \dot{M}_r = 4\pi r^2 \rho \frac{dr}{dt}$$

Force, $n[0.01\text{cm}^3]$, $T[\text{keV}]$



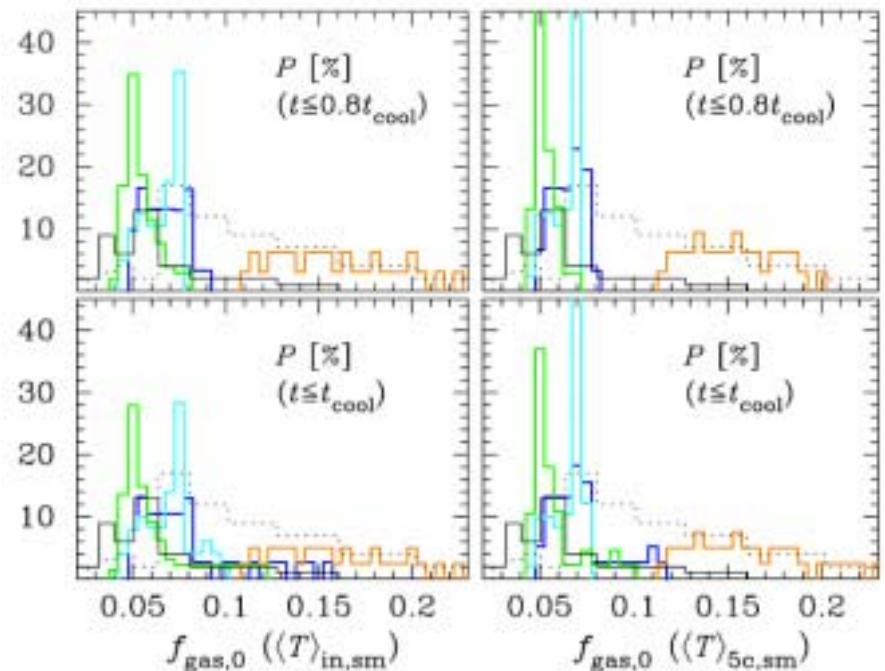
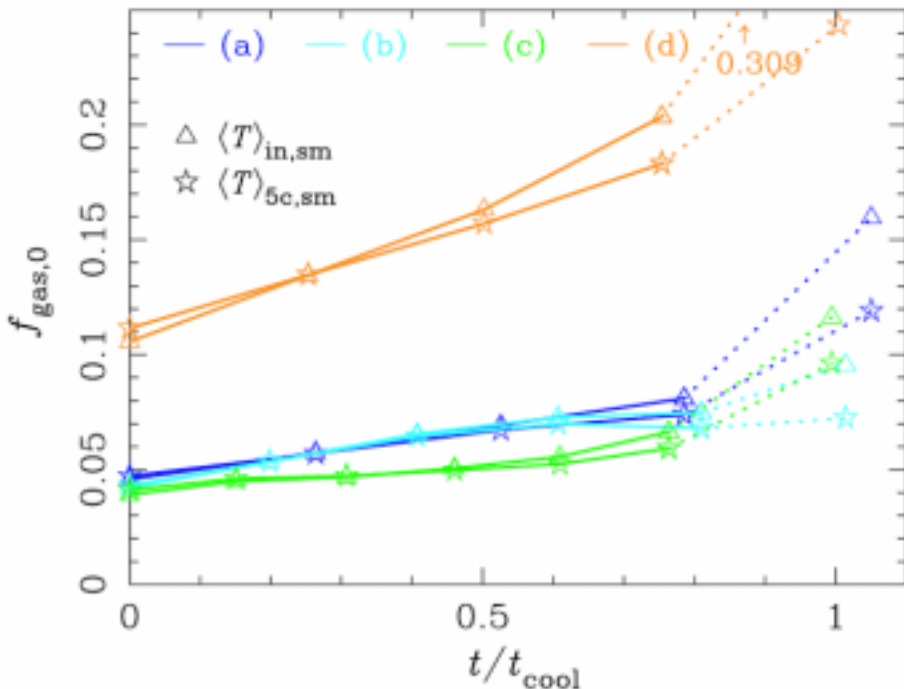
ガス-質量比の変化

Akahori, Ota, & Masai in prep.

- 冷却によってガス集中が起こる
- 初期の冷却時間まで緩やか

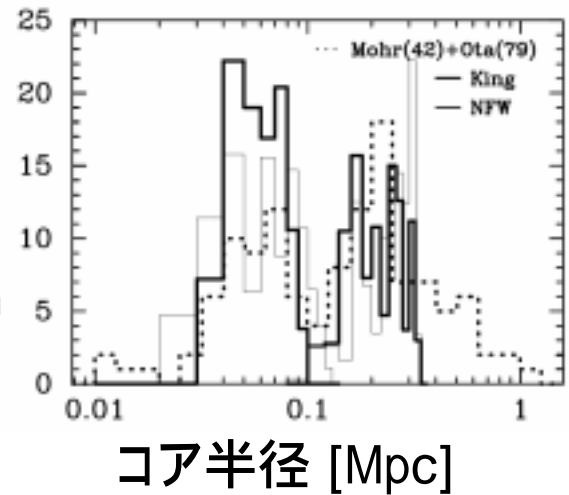
$$f_{gas,0} \equiv \frac{M_{gas}(r)}{M_{total}(r)} \Big|_{r \rightarrow 0} = \frac{4\pi\mu m G \rho_0 r_c^2}{9kT\beta}$$

	Model1	Model2	Model3	Model4
DM	Potential	N-body	N-body	N-body
rc, c	0.2, 15	0.2, 15	0.3, 10	0.3, 10
f _{gas,0}	0.038	0.038	0.038	0.100



まとめ

確率 [%]



○ 近年の観測的研究

○ 等温静水圧平衡の描像からの脱却

○ 緩やかに冷えるガスの数値実験

- コア半径分布に見られた2つのピーク
できそうである

放射冷却で説明

- 多くの銀河団は緩やかな冷却期にある?

- 今のところこれ以外の有効な解釈は見つかっていない

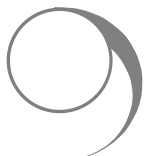
○ 今後の課題

○ 冷えきった銀河団が見つからない理由

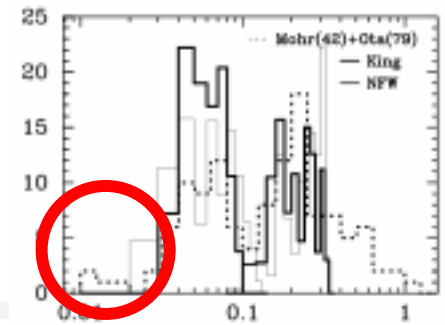
- AGN? 電子熱伝導? 乱流? 確率的にみえないだけ?

○ どでかいコア and 大きな中心ガス-質量比の起源

- 銀河群衝突? N体+SPHの計算準備中

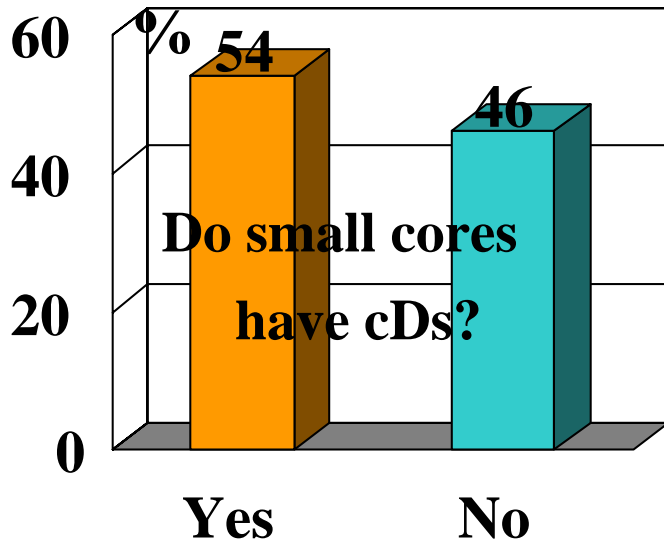


議論1

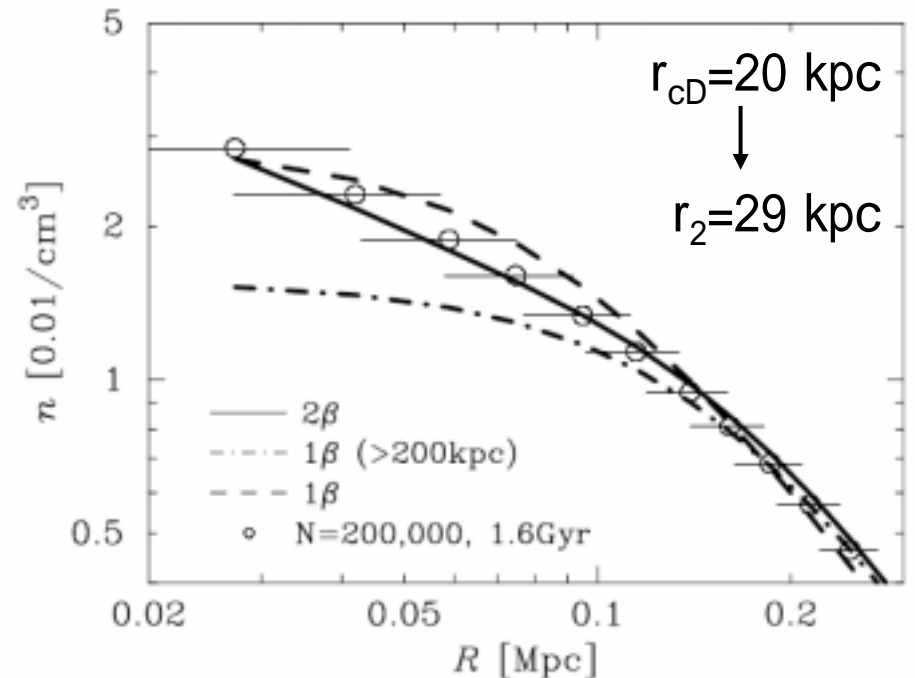


- 小さいコアはcD銀河(中心巨大楕円銀河)だけでは説明がつかない

AM (2005)



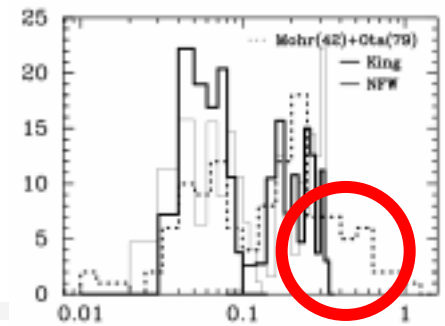
density [0.01cm^{-3}]



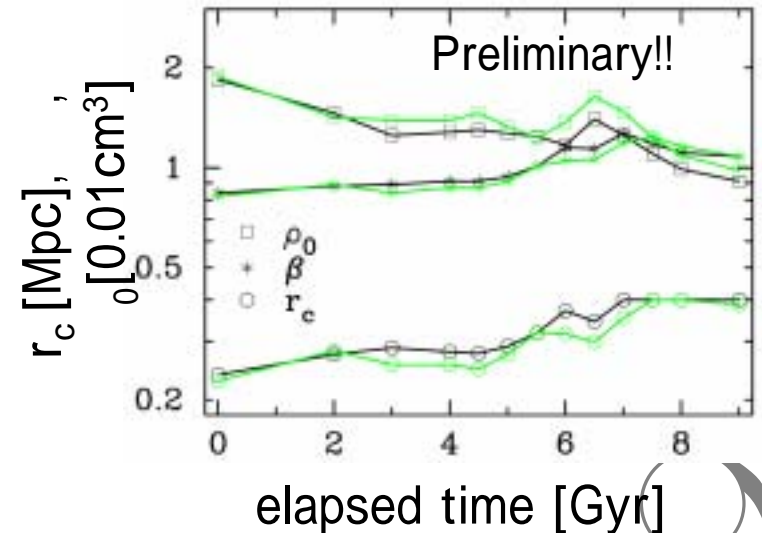
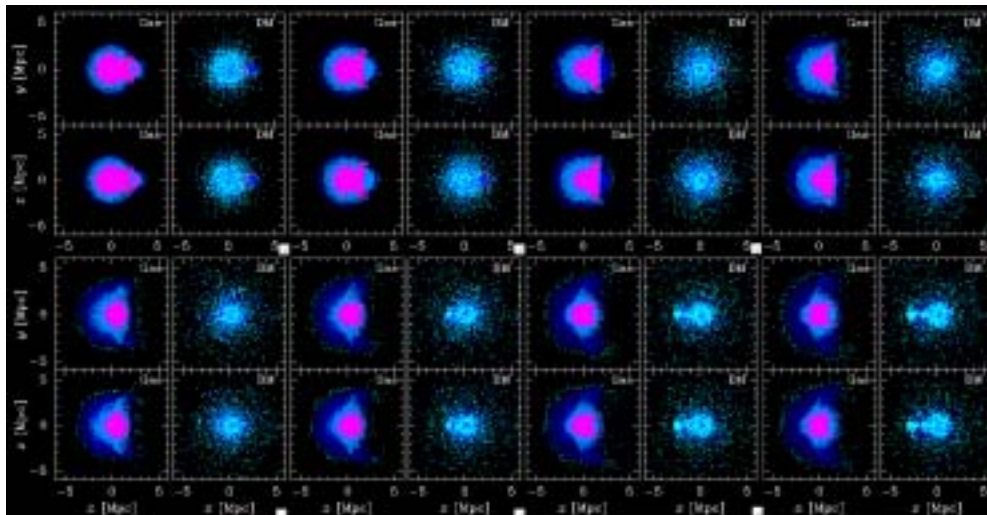
小さいコアを持つ銀河団中にcD銀河があるかないか(BM-typeが既知の24銀河団について)

radius [Mpc]

議論2

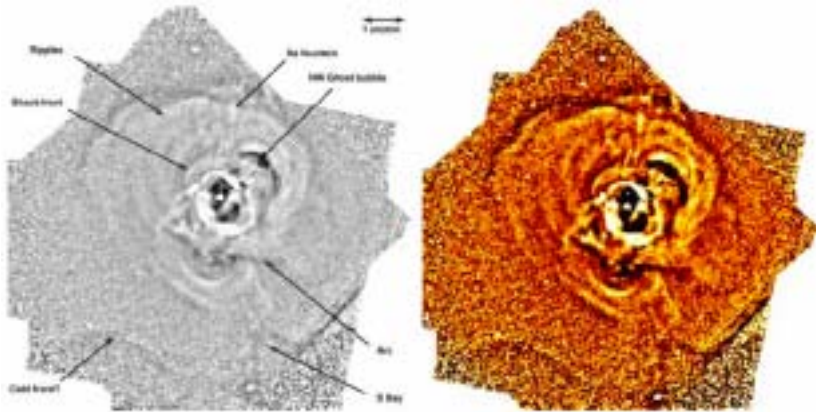


- どでかいコア ($r_c > 0.4$ Mpc) の銀河団は中心ガス-質量比が大きい (>0.1)、しかも極端に相似関係から逸脱
 - どでかいコアをもつ17の銀河団での平均 $\beta_0 = 0.98$ は、全体の平均 $=0.65$ より急。17のうち14が irregular...
- 銀河群衝突** ならガスは大きなコアと急な霧を取りうる
 - シミュレーション: コアは数10%大きくなりそう...

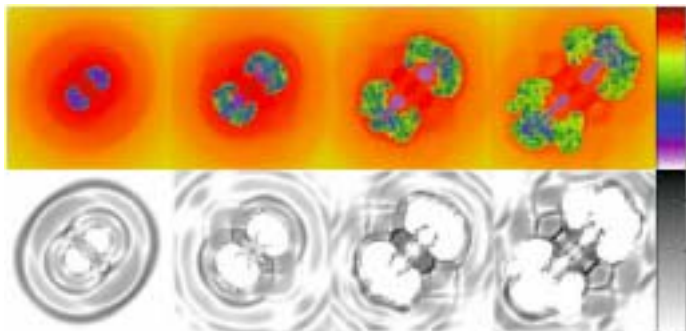


Cooling Flow問題2

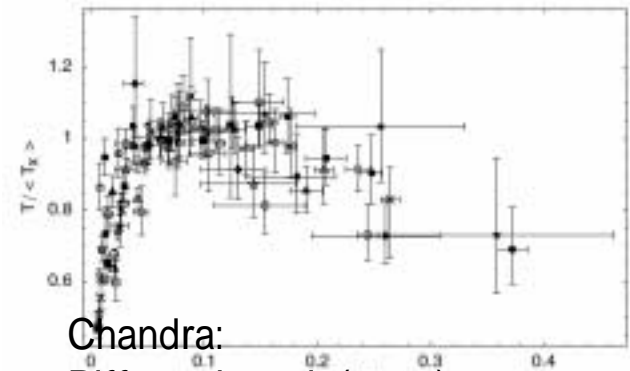
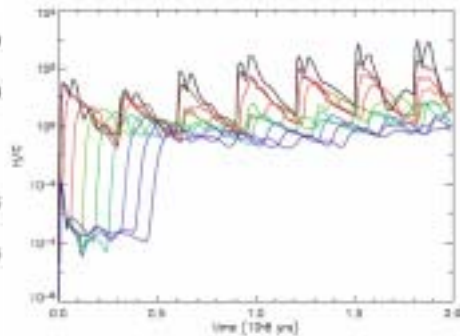
- 中心巨大楕円銀河の活動中心核(AGN)からの outflow(+bubble)



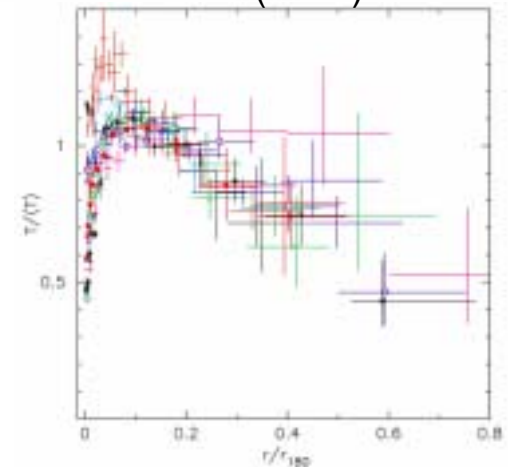
Chandra: Fabian et al. (2006)



Simulations: Ruszkowski et al. (2004a;b)



Chandra:
Piffaretti et al. (2005)

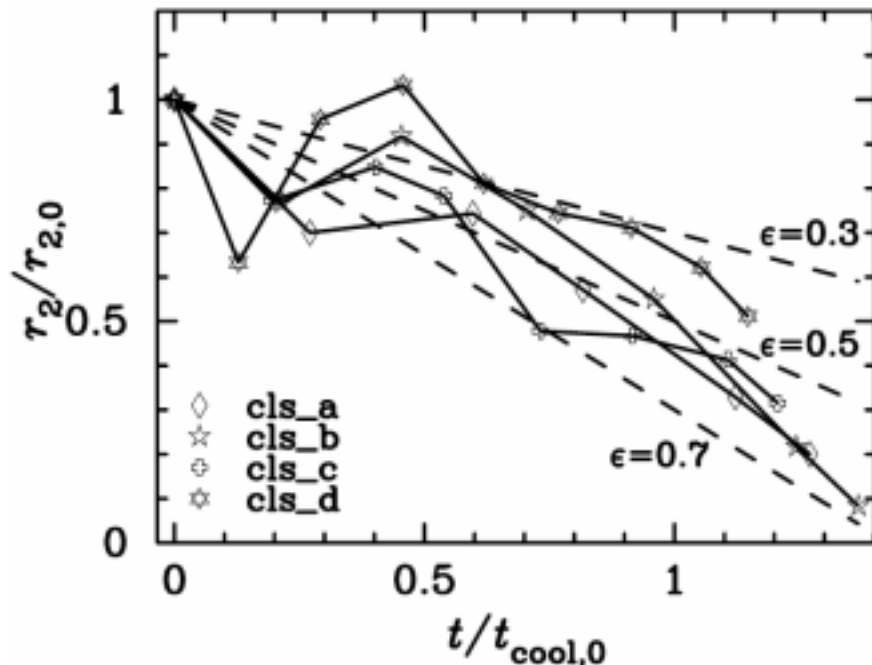


Vikhlinin et al. (2005)

相似的進化

AM (2006)

- Cooling Coreは相似的進化をしている
 - もし小さいコアが冷却で作られているのなら、進化は冷却の経過時間や冪に依存するため、相関は失われると考えられる



小さいコアの初期値からの変化量 r_2

$$\delta r_2 \propto \beta^{-1/2} t$$

