

# 銀河団サブストラクチャーの X線ピークと質量ピークの ずれについて

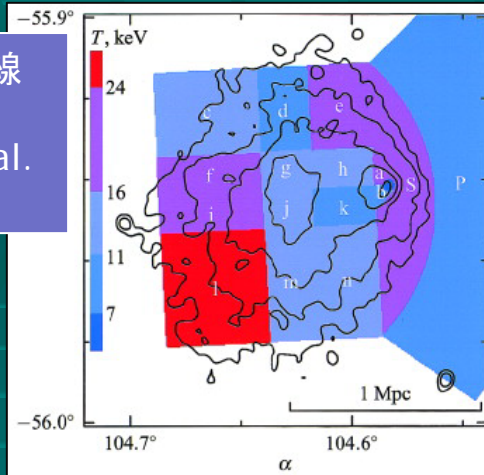
Accepted for publication in PASJ  
(astro-ph/0608693)

滝沢元和

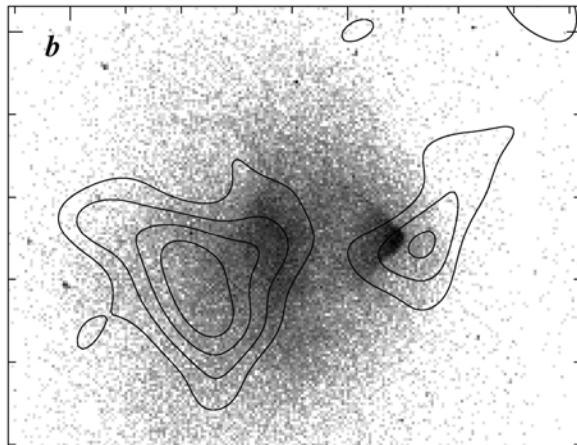
(山形大学理学部物理学科)

# Introduction: 1E 0657-56

X線イメージ: 等高線  
温度: カラー  
(Markevitch et al. 2002)



- 全天で最高温度 (~17keV) の銀河団
- ICM中の衝撃波の最初のはっきりした観測例
- ICMと質量分布のピークにずれ。(質量分布と銀河分布はほぼ一致)



X線イメージ(グレースケール)  
質量分布(等高線)  
Markevitch et al.(2004)

衝突合体の際にガスがram pressureによってDMのポテンシャルからはぎとられたため？

でも過去のシミュレーションにはこんな見あたらない。本当かなあ、、、？

# 計算方法(N体+流体)&モデル

## ■ 計算方法

- N体計算: Particle Mesh(PM)法
- 自己重力: FFT with isolated boundary conditions
- 流体計算: Roe TVD法
- 格子数  $256 \times 128 \times 128$
- 粒子数  $256 \times 128 \times 128 (\doteq 4.2 \times 10^6)$
- VPP5000@NAOJ

## ■ モデル

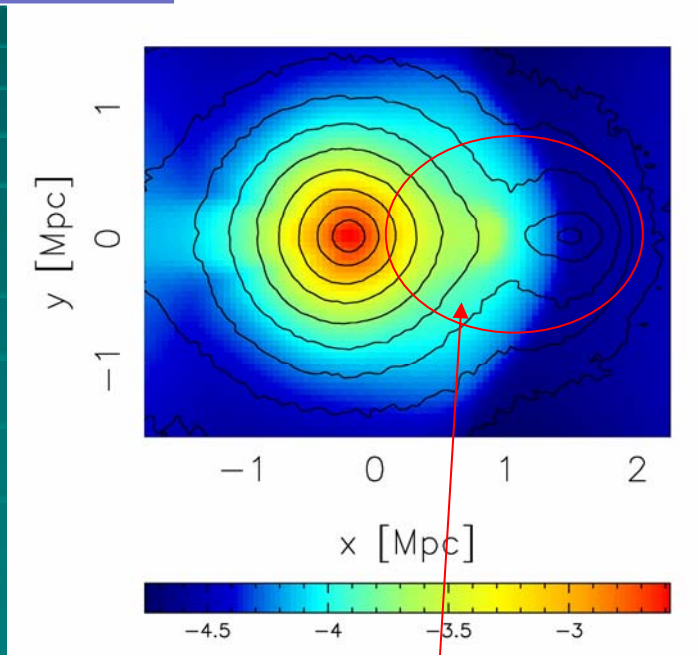
- $M_1=10^{15}$  solar mass,  $M_2=M_1/16$  の二つの銀河団の正面衝突
- DM profile --- NFW profile ( $\Omega_0=0.25$   $\lambda_0=0.75$ )
- Gas profile --- ベータモデル、ただし、 $r_c=r_s/2$
- 衝突速度---無限遠で静止していた場合の約2/3

# Simulation Results

質量比16:1の正面衝突、コア通過後0.67Gyr

質量分布(等高線)  
X線イメージ(カラー)

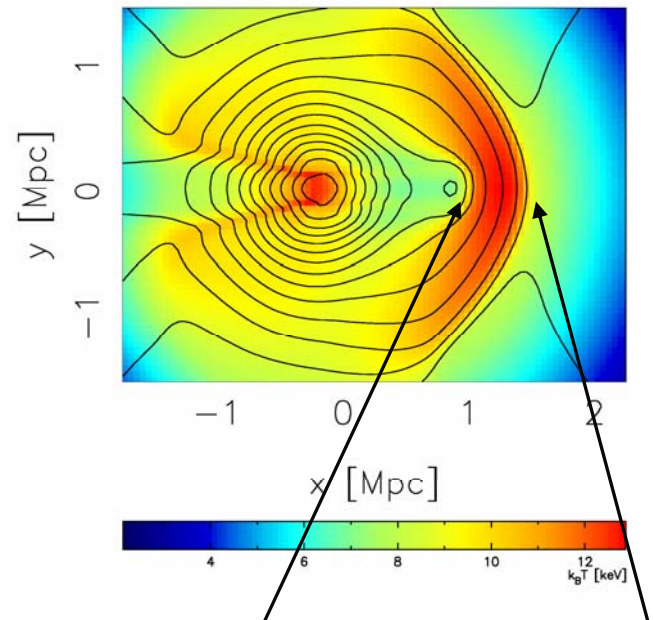
(a) mass vs X-ray



質量ピークに遅れるX線ピーク

X線イメージ(等高線)  
温度分布(カラー)

(b) X-ray vs  $kT_{ew}$



Cold front  
(接触不連続面)

Bow shock

# 簡単な解析的モデルによる議論(1)

質量が $M_{1,2}$  ( $M_1 > M_2$ )、ヴィリアル半径が $R_{1,2}$ の銀河団の正面衝突を考える  
ガスがはぎ取られるための条件は、  
サブストラクチャーでの重力とram pressure forceとの比較から

$$\frac{Gm_2\rho_2}{r_2^2} < A(\pi r_2^2 \rho_1 v^2) \left(\frac{4}{3}\pi r_2^3\right)^{-1},$$

$\rho_{1,2}$ は中心部のガス密度、 $r_2$ はscale radius。 $m_2$ は $r_2$ 内の質量  
 $A$ は $O(1)$ のfactor。ただしram pressure force はガスのはぎ取り以外にも使われるので、おそらく $A < 1$

衝突速度 $v$ は

$$v^2 \simeq \frac{2G(M_1 + M_2)}{R_1 + R_2},$$

$\alpha \equiv M_2/M_1$ とすると、 $R_2/R_1 = \alpha^{1/3}$ 、 $\rho_1/\rho_2 = \alpha^{-x}$ とおけて  
( $\Lambda$ CDMでは $x \sim 0.25$ )、結局

$$F(\alpha : M_1) \equiv \alpha^{2/3-x} \frac{1 + \alpha^{1/3}}{1 + \alpha} - \frac{3A}{2g(\alpha M_1)c(\alpha M_1)} < 0.$$

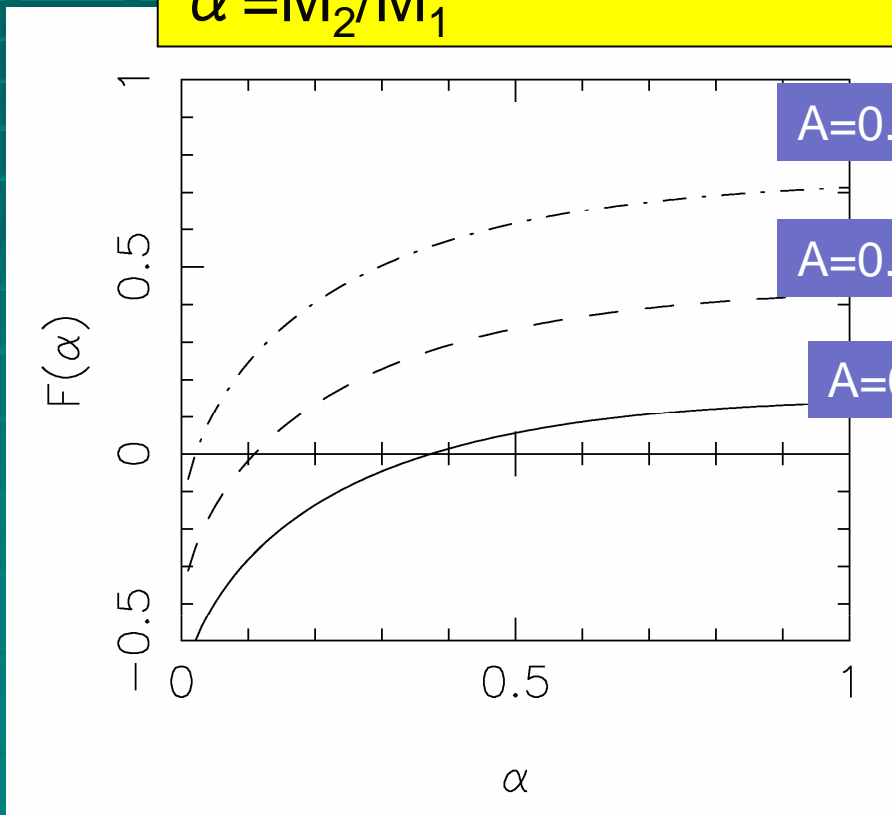
ただし、 $c=r_2/R_2$ はNFWモデルのconcentration parameter で $M$ に弱く依存する関数  
さらにNFWモデルでは

$$g(M_2) \equiv \frac{m_2}{M_2} = \frac{\ln 2 - 1/2}{\ln(1+c) - c/(1+c)},$$

# 簡単な解析的モデルによる議論(2)

$$F(\alpha) \propto (\text{重力}) - (\text{ラム圧})$$
$$\alpha = M_2/M_1$$

$F(\alpha) < 0$  でラム圧優勢



$\alpha \sim 0.1$  より小さいところではram pressureによるガスのはぎ取りが有効  
→ 小さなsubstructureほどガスがはぎ取られやすい。

境目の値がsimulationでうまくoff-setがでた場合に近いのは偶然か？

# 簡単な解析的モデルによる議論(3)

- Ram pressure  $\ll$  重力
  - ガスはDMに束縛されて、同じように振る舞う
    - DM peak と X-ray peak は一致
- Ram pressure  $\gg$  重力
  - そもそもガスはコアを突き抜けられない
  - Substructure のポテンシャルでは衝撃波加熱されたガスを束縛できない
    - X-ray peak をともなわないDM peak
- Ram pressure  $\simeq$  重力
  - Off-setしたDMとX-ray peaks がうまくあらわれる。
  - 1E0657-56のような構造はおそらくそう多くはないだろう。

# まとめ

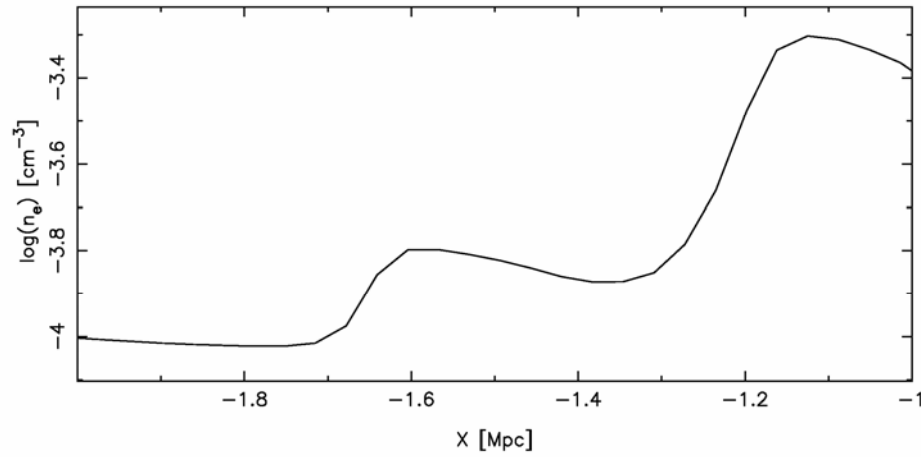
- 衝突銀河団1E0657-56のX線および質量の分布について調べた。
- N体+流体シミュレーションを用いて、substructure周囲の特徴的な構造を再現することに成功した。
  - X線ピークと質量ピークのずれ
  - Bow shock + cold front (接触不連続面)
- 簡単な解析的モデルを用いて、NFWモデル同士のmergerでのガスのはぎ取りの条件を議論した。
  - 小さなsubstructureほどガスは剥ぎ取られやすい。
  - 質量比が $\sim 1:10$ 程度の際に重力とラム圧が拮抗する。そのようなときに特徴的なピークのずれが生じると推測される。
- Accepted for publication in PASJ  
(astro-ph/0608693)



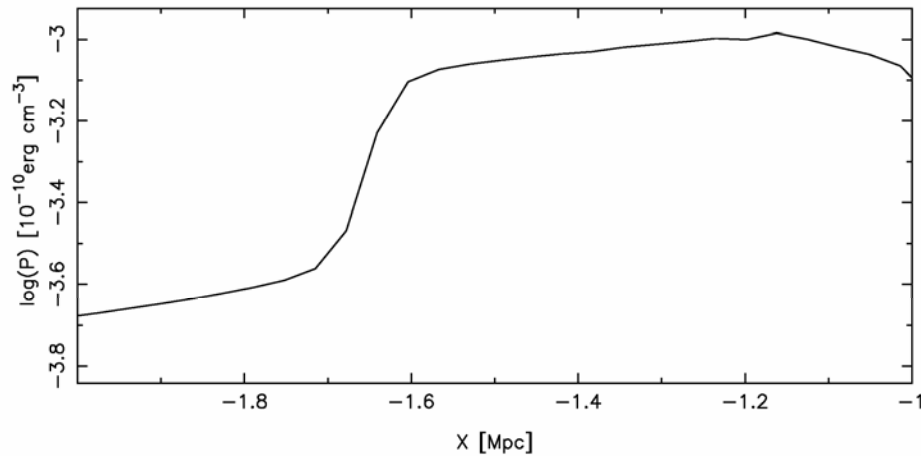
以下は予備スライド

# Simulation Results(2)

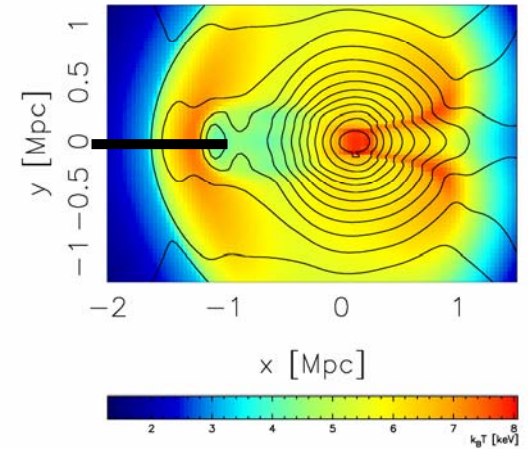
(a) Density



(b) Pressure

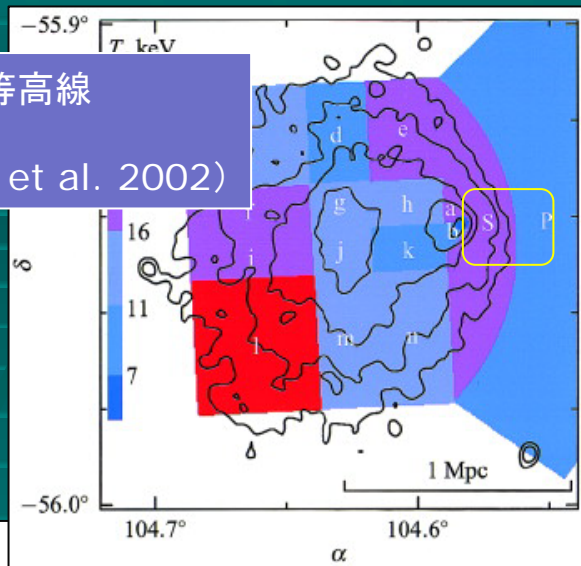


(b) X-ray vs  $kT_{\text{ew}}$

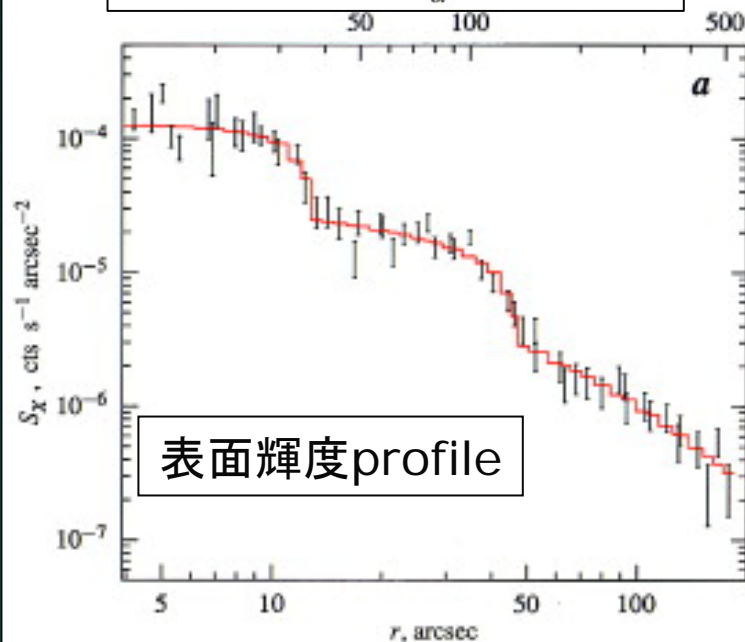


# 1E 0657-56: cold front & bow shock

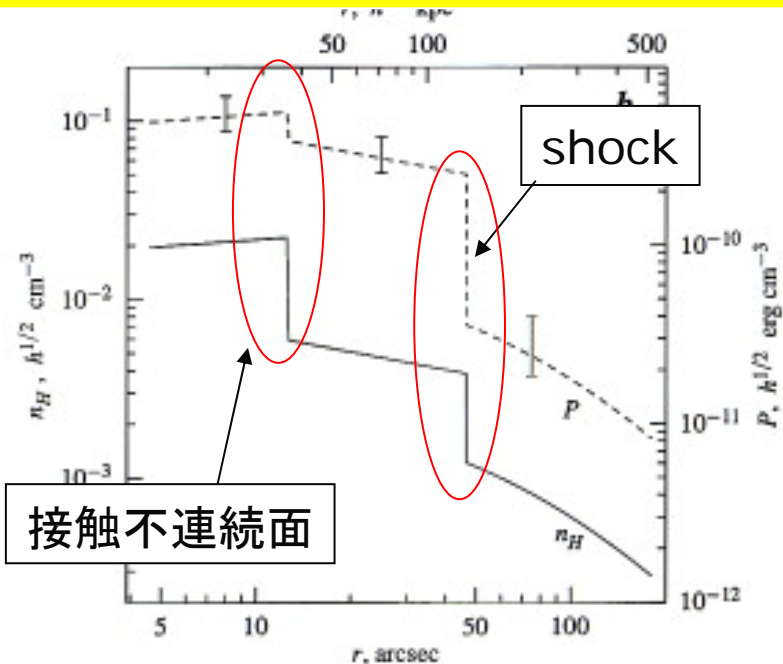
X線イメージ: 等高線  
 温度: カラー  
 (Markevitch et al. 2002)



Substructure 前面の密度、圧力 profile



表面輝度profile



# Virialized Cluster Model

- DMの密度分布はNFWモデル、ICMの密度分布は $\beta$ モデルを仮定( $r_c=r_s/2$ )

DM密度分布

$$\rho_{\text{DM}}(r) = \frac{\delta_c \rho_{c0}}{(r/r_s)(1+r/r_s)^2}$$

ICM密度分布

$$\rho_g(r) = \rho_{g,0} \left\{ 1 + \left( \frac{r}{r_c} \right)^2 \right\}^{-\frac{3}{2}\beta}$$

- $r \geq r_{\text{vir}}$  では  $\rho_{\text{DM}} = 0$ 、 $\rho_{\text{gas}}$  は一定
- DMの速度分布は等方的なガウス分布。半径ごとの速度分散はJeans eq.より、静水圧平衡になるように定める。

$$\frac{d}{dr} (\rho_{\text{DM}} \sigma^2) = -\frac{GM_r}{r^2} \rho_{\text{DM}}$$

with

$$\sigma^2(r_{\text{out}}) = \frac{GM_r}{3r} \Big|_{r=r_{\text{out}}}$$

- ICMの温度分布は静水圧平衡の式より定める。

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{GM_r}{r^2} \rho_g$$

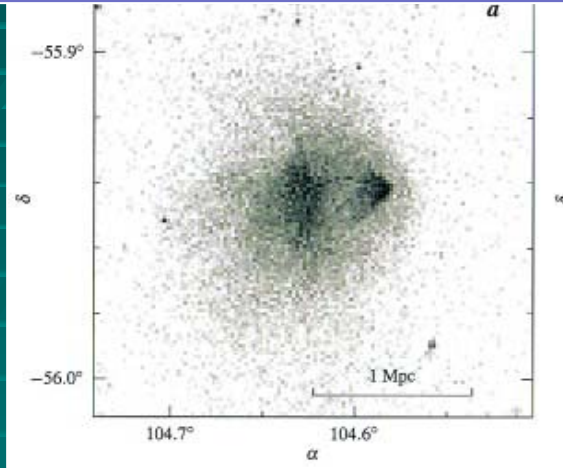
with

$$P(r_{\text{out}}) = \frac{1}{\beta} \frac{GM_r \rho_g}{3r} \Big|_{r=r_{\text{out}}}$$

- $r \leq r_{\text{out}}$  で  $M_{\text{gas}} / (M_{\text{gas}} + M_{\text{DM}}) = 0.1$

# 1E 0657-56 銀河団

Chandra衛星によるX線イメージ  
(Markevitch et al. 2002)



- $z=0.296$
- 全天で最高温度(～17keV)の銀河団
- 強力な電波ハロー
- ICM中の衝撃波の最初のはっきりした観測例
- weak lensing で詳細な質量分布が求まった。

Liang et al. (2000)

Contour: X-ray  
(ROSAT HRI)

Gray scale: radio

