

# 銀河団衝突のシミュレーション

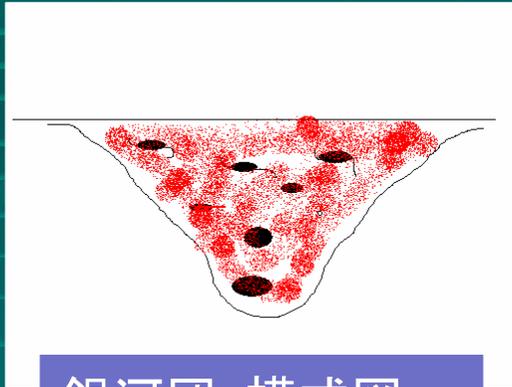
滝沢元和  
(山形大学理学部物理学科)

東北大学天文学教室談話会  
(2006.11.20)

# 目次

- Introduction
- 1E0657-56銀河団
  - シミュレーション手法
  - シミュレーション結果
  - 簡単な解析的モデルによる議論
- 銀河団磁場の進化
- まとめ

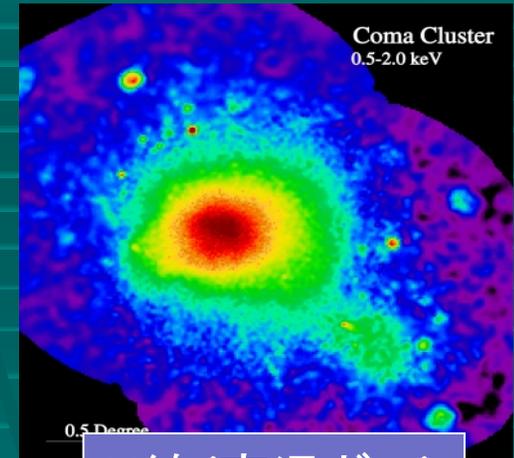
# Introduction



銀河団: 模式図



可視光(銀河)



X線(高温ガス)

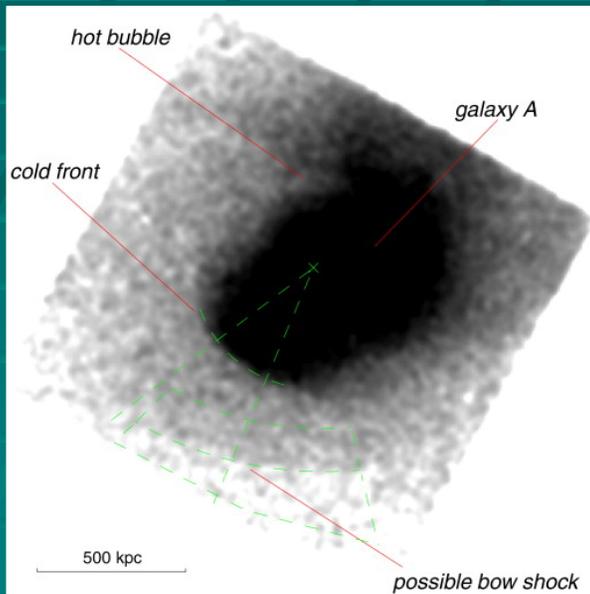
## ■ 銀河団

- 暗黒物質の重力ポテンシャル中に束縛された高温ガス ( $T \sim 10^7 - 8 \text{ K}$ ) と銀河のかたまり。
- 宇宙で最大のビリアライズした天体 ( $R \sim \text{Mpc}$ ,  $M \sim 10^{15}$  太陽質量)
- 宇宙の構造形成の(観測可能な)現場
- プラズマ物理の実験場(理想的な無衝突プラズマ)

# Introduction (2) :

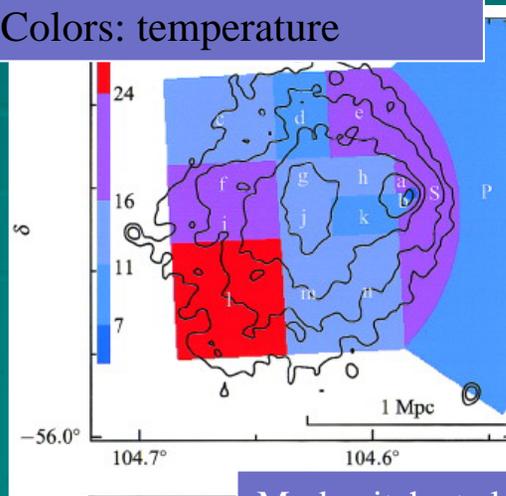
## 銀河団衝突の痕跡 (X線、weak lensingより)

銀河団の中を運動するsubstructure  
非一様性な温度分布  
ガスと暗黒物質の空間分布の食い違い



Moving substructure in A3667  
Vikhlinin et al. (2001)  
Chandra X-ray image

1E 0657-56  
Contours: X-ray brightness  
Colors: temperature

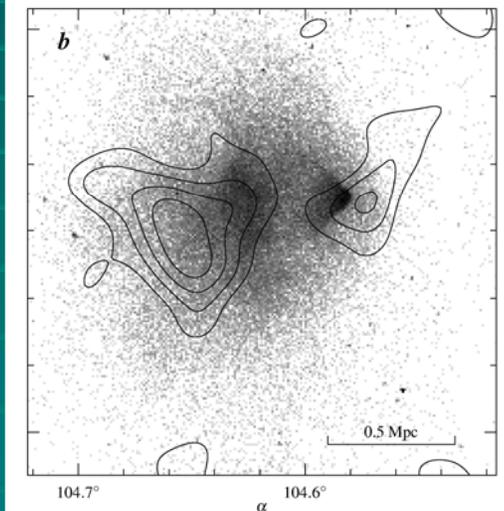


Markevitch et al. (2002)

1E 0657-56

Contours: 質量分布

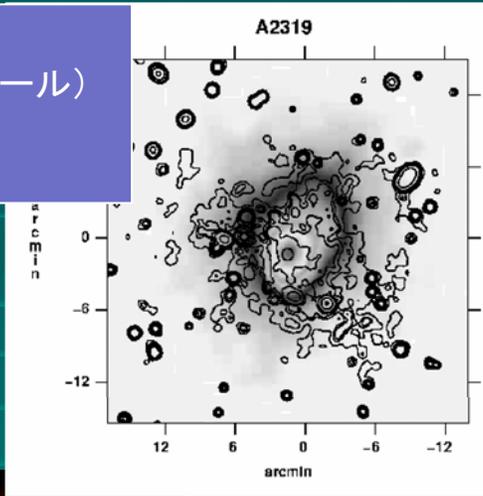
Gray scale: X-ray (ガス分布)



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

# Introduction(4): 粒子加速器としての銀河団

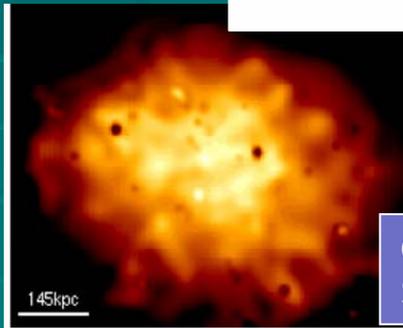
A2319:  
X線イメージ(グレースケール)  
20cm電波(等高線)  
Govoni et al. 2001



- 銀河団プラズマ中には非熱的高エネルギー電子( $E_e \geq \text{GeV}$ )がMpcスケールにわたって存在。

- 衝撃波
- 乱流

- かみのけ座銀河団でのP分布
- ダイナモによる磁場増幅
- 磁気乱流による粒子加速
- 次世代のX線分光では充分観測可能(NeXT)



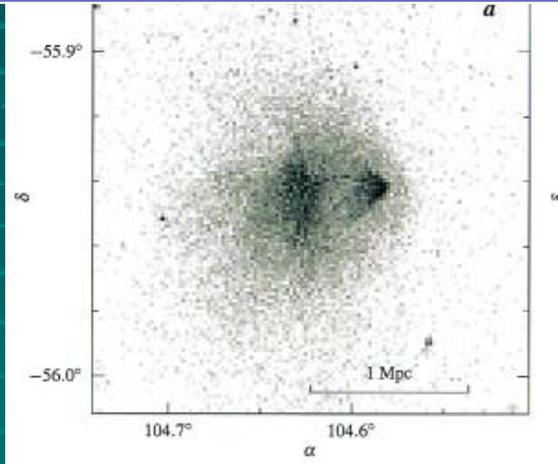
Coma cluster中心部の圧力分布。  
Schuecker et al. 2004

(電磁)流体シミュレーションの役割:

宇宙最大の加速器“銀河団”のエンジン部分  
(衝撃波、乱流構造、磁場増幅、磁気リコネクション etc)を明らかにしたい。

# 1E 0657-56 銀河団

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

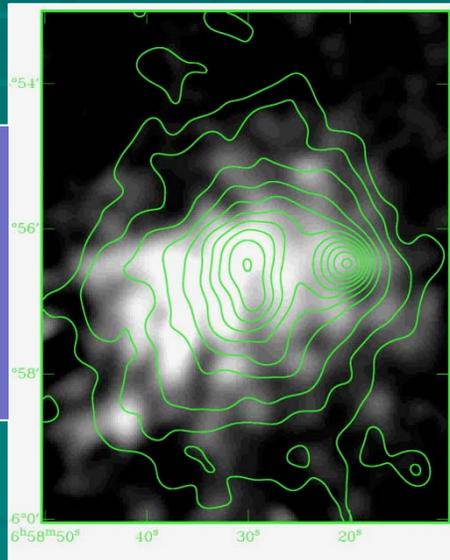


- $z=0.296$
- 全天で最高温度(～17keV)の銀河団
- 強力な電波ハロー
- ICM中の衝撃波の最初のはっきりした観測例
- weak lensing で詳細な質量分布が求まった。

Liang et al. (2000)

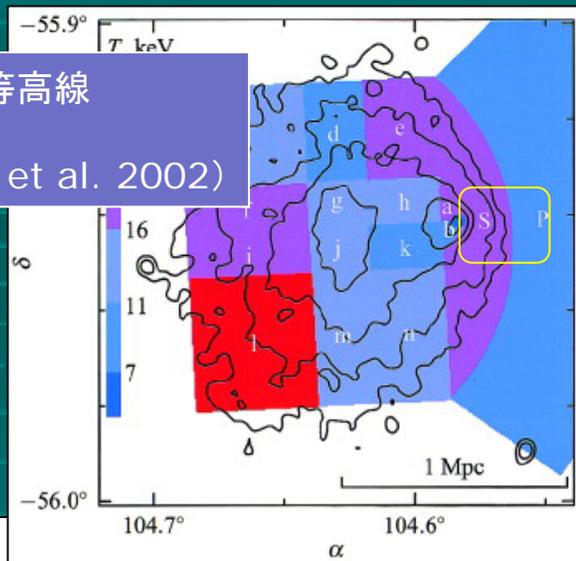
Contour: X-ray  
(ROSAT HRI)

Gray scale: radio

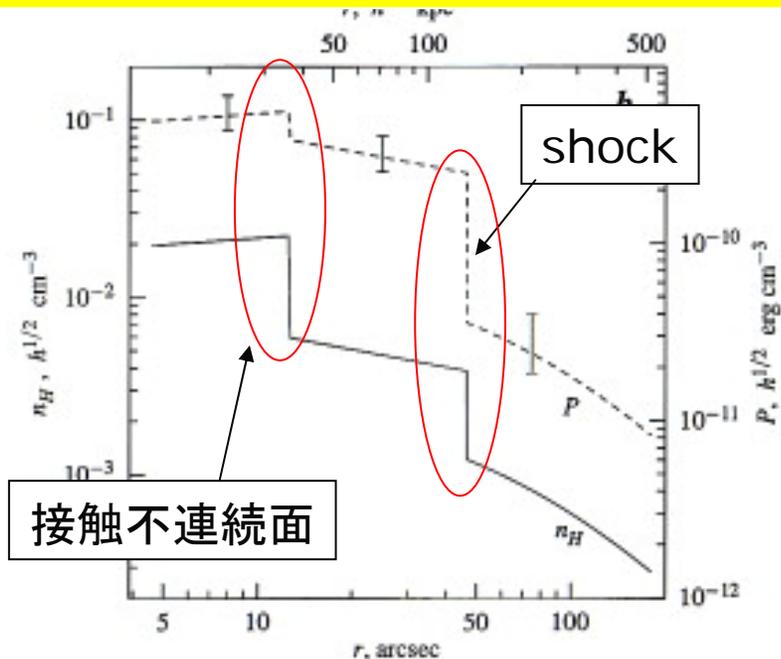
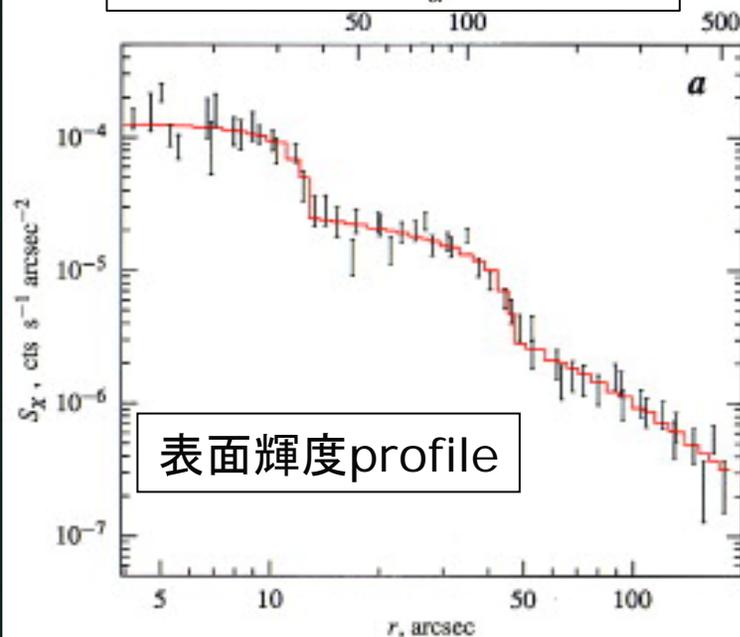


# 1E 0657-56: cold front & bow shock

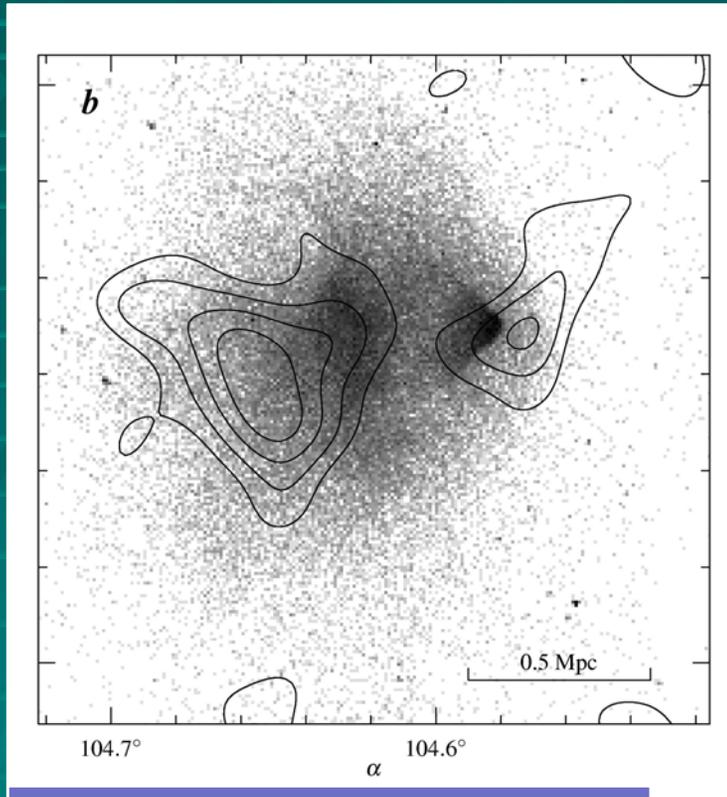
X線イメージ: 等高線  
温度: カラー  
(Markevitch et al. 2002)



Substructure 前面の密度、圧力 profile



# 1E 0657-56: 質量分布



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

- Weak lensing で質量分布が求められた。
  - 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)  
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。
- 本当かなあ、、、？

# 計算方法(N体+流体)

- N体計算: Particle Mesh(PM)法
- 自己重力: FFT with isolated boundary conditions
- 流体計算: Roe TVD法
  - 境界条件: zero gradient boundary conditions (ただしoutflowのみを許す)
- 格子数  $256 \times 128 \times 128$
- 粒子数  $256 \times 128 \times 128 (\doteq 4.2 \times 10^6)$
- VPP5000@国立天文台

# 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。

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

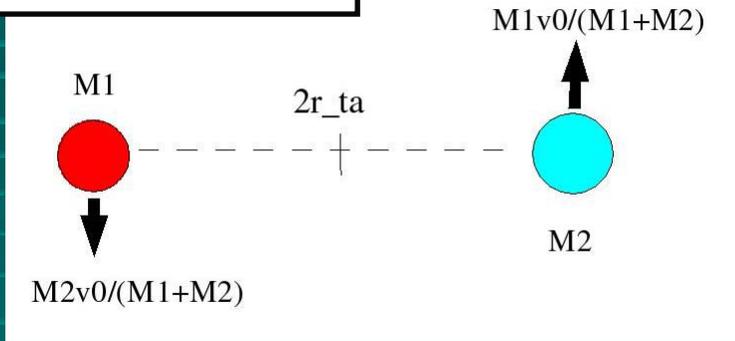
with

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

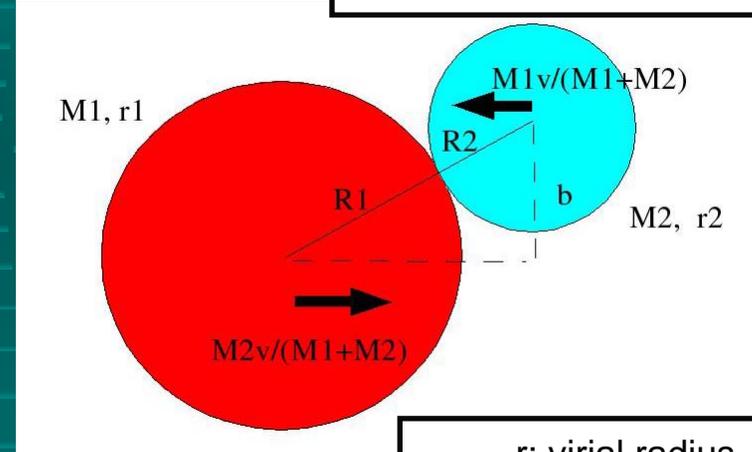
- $r \leq r_{\text{out}}$  で  $M_{\text{gas}} / (M_{\text{gas}} + M_{\text{DM}}) = 0.1$

# mergerの初期条件の作り方

Maximum expansion



Initial state for simulations



力学的エネルギー保存  
角運動量保存

$$-\frac{GM_1M_2}{2r_{ta}} + \frac{1}{2}Mv_0^2 = -\frac{GM_1M_2}{R_1 + R_2} + \frac{1}{2}Mv^2$$

$$2Mv_0r_{ta} = Mvb$$

r: virial radius  
R: outer boundary radius

$R \propto M^{(5+n)/6}$  のスケーリング則 および  
 $r_{ta} = 2 r_{vir}$  (Spherical collapse model) を使うと、

$$v^2 = \frac{2GM_1}{R_1} (1 + \alpha) \left\{ \frac{1}{1 + \alpha^{(5+n)/6}} - \frac{1}{4(1 + \alpha)^{(5+n)/6}} \frac{R_1}{r_1} \right\} \left\{ 1 - \frac{1}{16(1 + \alpha)^{(5+n)/3}} \left( \frac{b}{r_1} \right)^2 \right\}^{-1}$$

$$\alpha = \frac{M_2}{M_1}$$

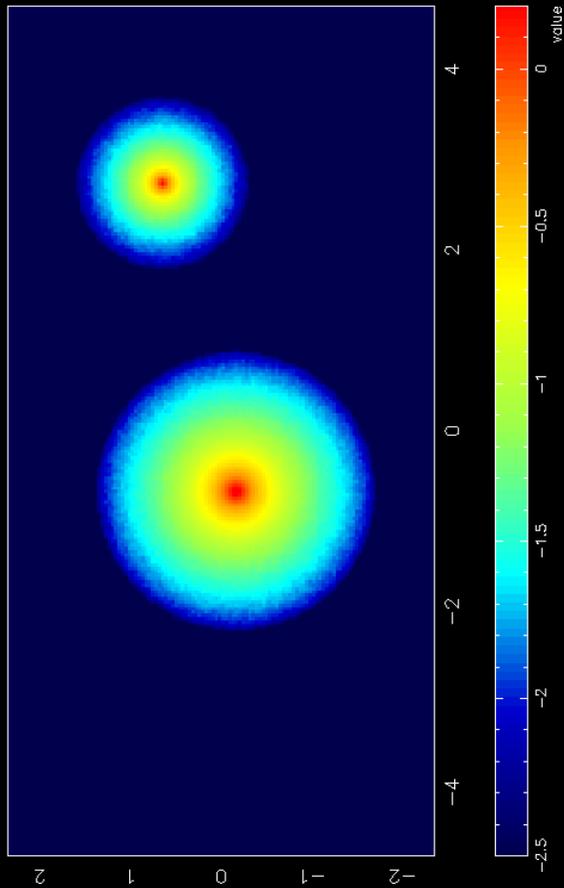
$$\lambda \equiv \frac{J|E|^{1/2}}{G(M_1 + M_2)^{5/2}} = \frac{vb}{(GM_1R_1)^{1/2}} \frac{\alpha^{3/2}}{(1 + \alpha)^{7/2}} \left\{ \frac{1}{1 + \alpha^{(5+n)/6}} - \frac{R_1v^2}{2GM_1} \frac{1}{1 + \alpha} \right\}^{1/2}$$

$(M_1, r_1, R_1, \alpha, n, \lambda)$

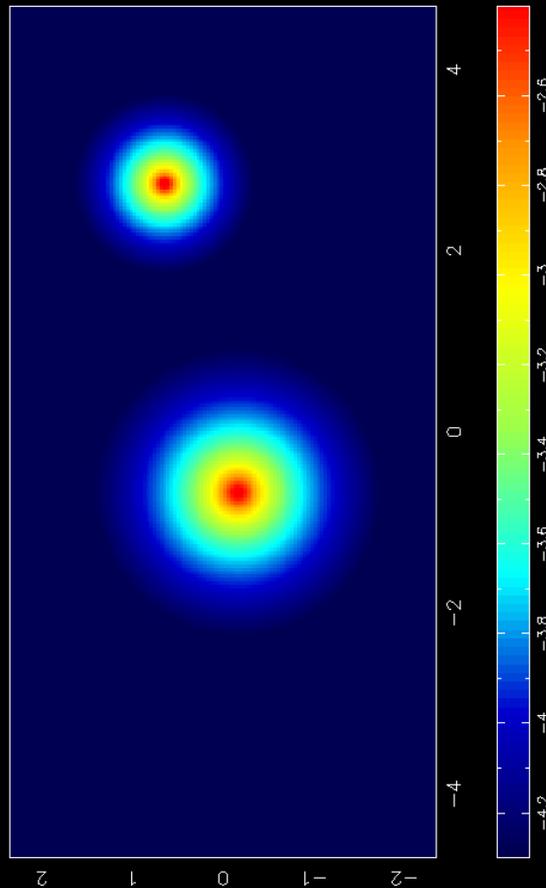
$(v, b)$

# Movies (質量比1:4, $\lambda = 0.05$ )

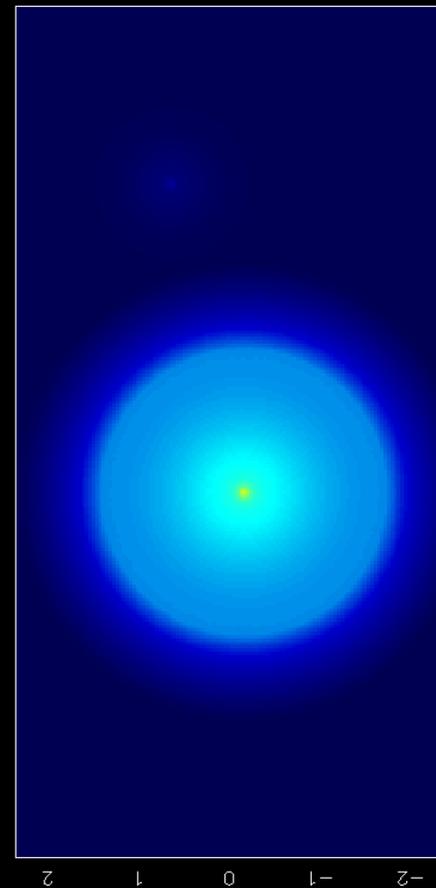
質量分布



ガス密度分布



ガス温度分布

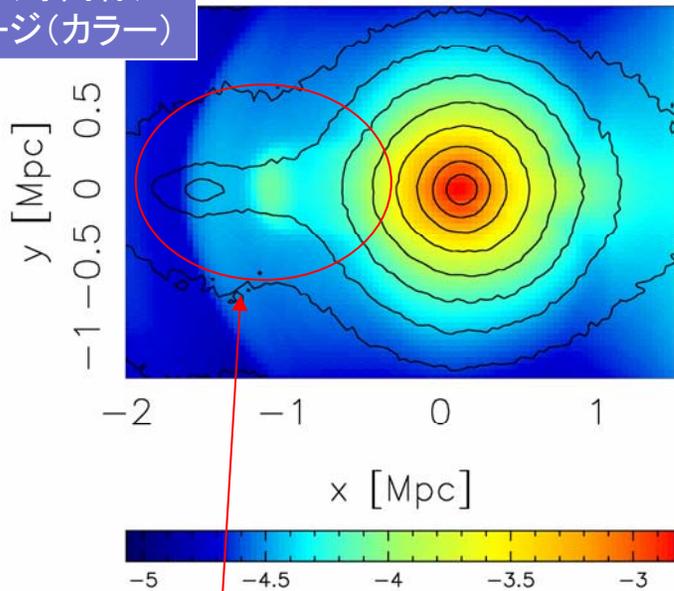


# Simulation Results(1)

質量比16:1の正面衝突、コア通過後約1Gyr

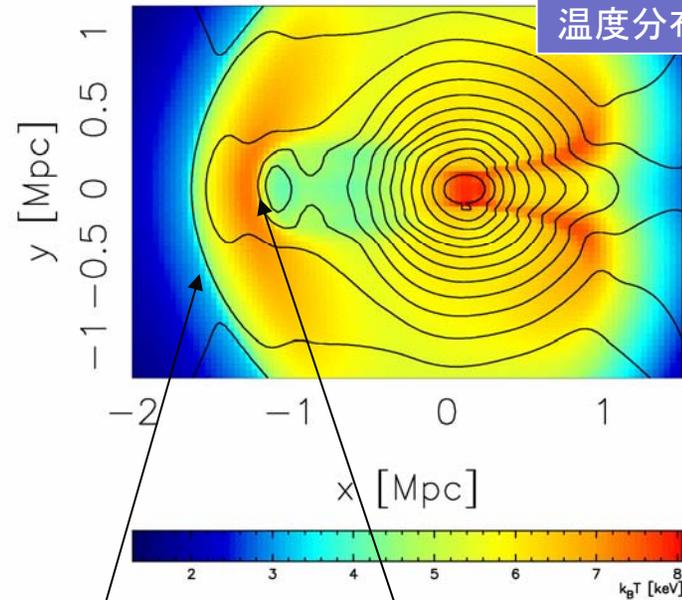
(a) mass vs X-ray

質量分布(等高線)  
X線イメージ(カラー)



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

X線イメージ(等高線)  
温度分布(カラー)



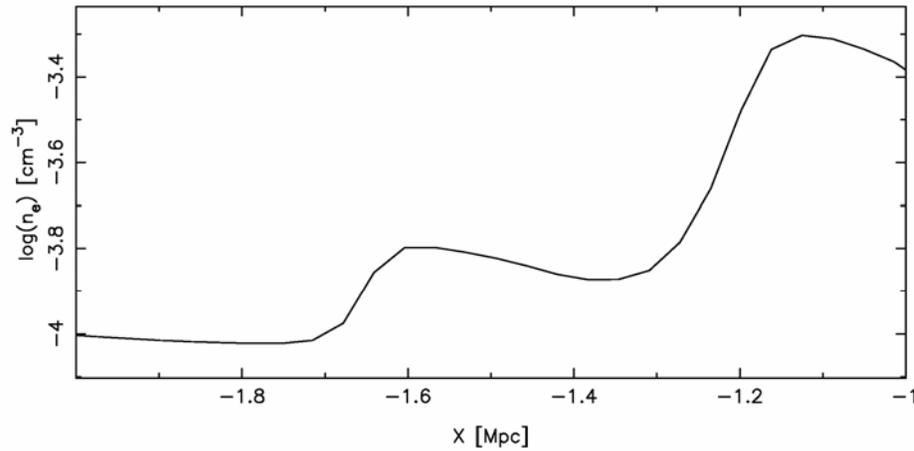
Cold front  
(接触不連続面)

Bow shock

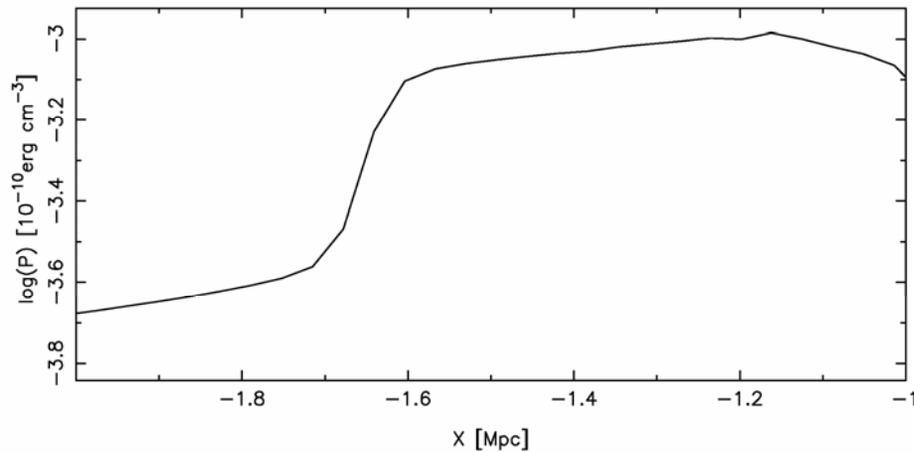
質量ピークに遅れるX線ピーク

# Simulation Results(2)

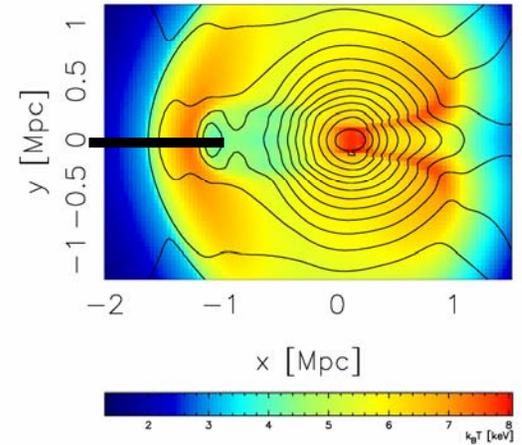
(a) Density



(b) Pressure



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



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

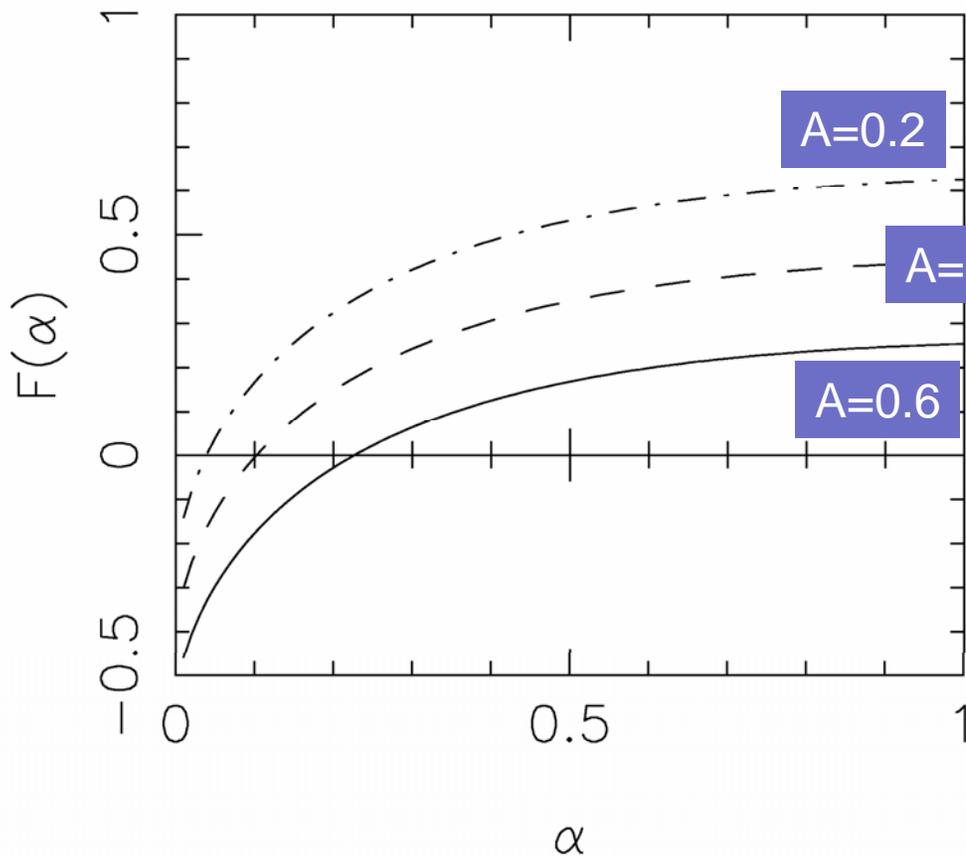
$\alpha \equiv M_2/M_1$ とすると、 $R_2/R_1 = \alpha^{1/3}$ 、 $\rho_1/\rho_2 = \alpha^{-x}$ とおけて  
( $\Lambda$ CDMでは $x \sim 0.25$ )、結局

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

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)



$F(\alpha) < 0$  でラム圧優勢  
 $\alpha = M_2/M_1$

$\alpha \sim 0.1$  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
  - ガスもDMと同じように振る舞う
  - DM peaks と X-ray peaks 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
  - DM はdouble peaks、X-rayはsingle elongated 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。

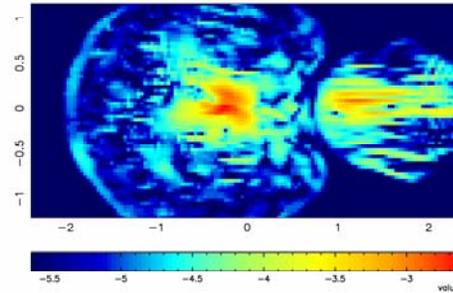
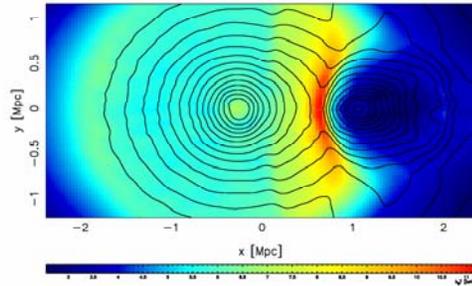
# N体 + MHD simulations

- N体計算: Particle Mesh(PM)法
- 自己重力: FFT with isolated boundary conditions
- MHD: Roe-like TVD法
  - 境界条件: zero gradient boundary conditions
- 格子数  $256 \times 128 \times 128$
- 粒子数  $256 \times 128 \times 128 (\doteq 4.2 \times 10^6)$
- 初期磁場  $A(k) \propto k^{-5/3}$ 、 $B \propto \rho^{2/3}$ 、 $P_{\text{mag}} = 0.01 P_{\text{gas}}$
- VPP5000 @ 国立天文台

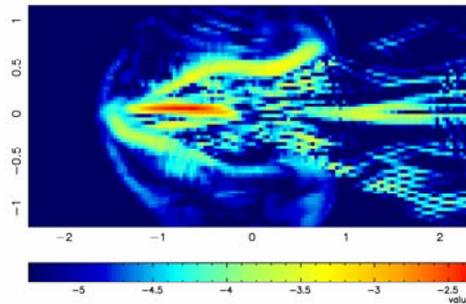
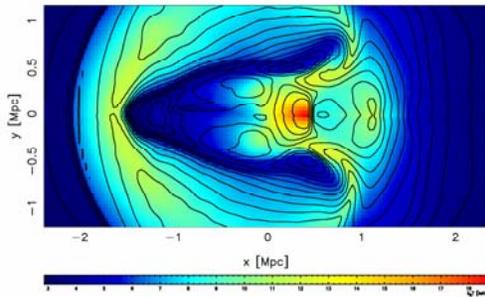
# MHD simulation results (質量比1:4, 正面衝突)

ガス密度(等高線)  
温度(カラー)

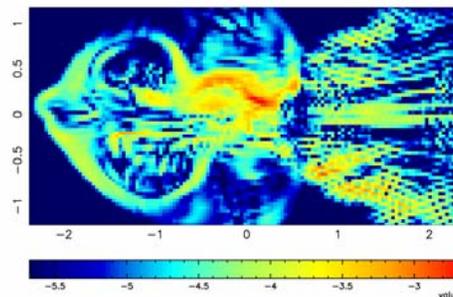
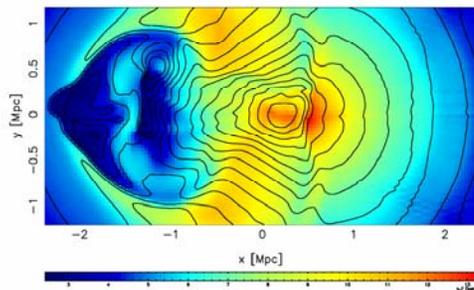
磁場エネルギー密度(カラー)



$t = 2.22 \text{ Gyr}$



$t = 3.89 \text{ Gyr}$



$t = 5.56 \text{ Gyr}$

# 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研究した。
  - 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ほどガスのはぎ取られやすい。
    - 質量比が $\sim 1:10$ 程度のとき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。
- N体＋MHDシミュレーションで銀河団磁場の進化を研究。
  - 衝突前期: “二つ目玉”の間の衝撃波ではさほど磁場は強くない。
  - 衝突中期: 小銀河団中心部起源の低温、高磁場領域
  - 衝突後期: 磁場に囲まれた低温領域