

衝突銀河団に関する話題： 質量分布、質量評価、磁場進化

滝沢元和

(山形大学理学部物理学科)

「研究会：マクロでミクロな銀河団」

(2007.10.24—26@山形蔵王、たかみや瑠璃倶楽リゾート)

目次

- Introduction
- ダークマター分布vsガス分布
- 質量評価の不定性について
- 銀河団磁場の進化
- まとめ

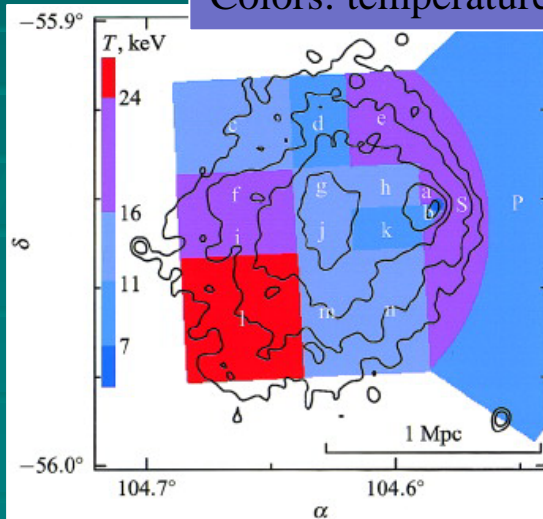
Introduction (1) :

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
非一様な温度分布
ガスと暗黒物質の空間分布の食い違い

1E 0657-56

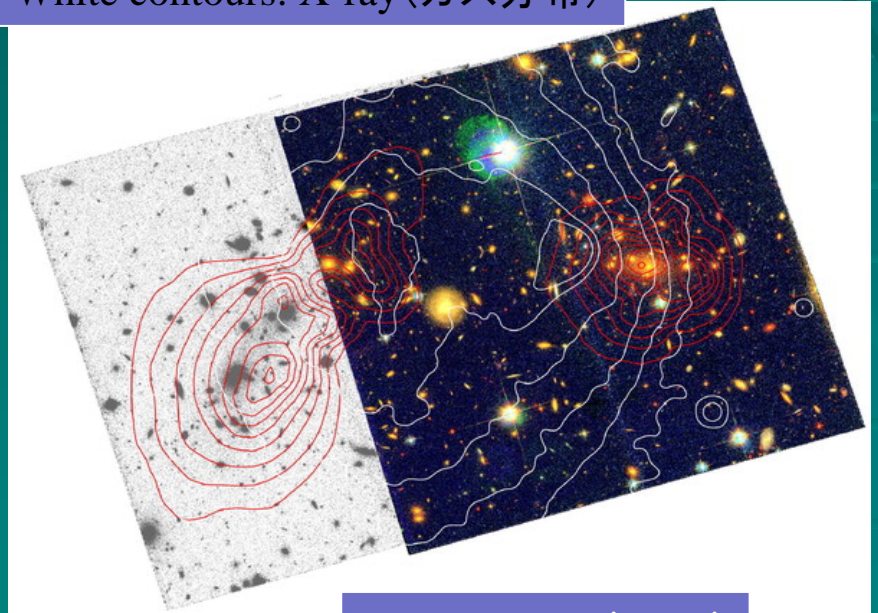
Contours: X-ray brightness
Colors: temperature



Markevitch et al. (2002)

1E 0657-56

Red contours: 質量分布
White contours: X-ray (ガス分布)

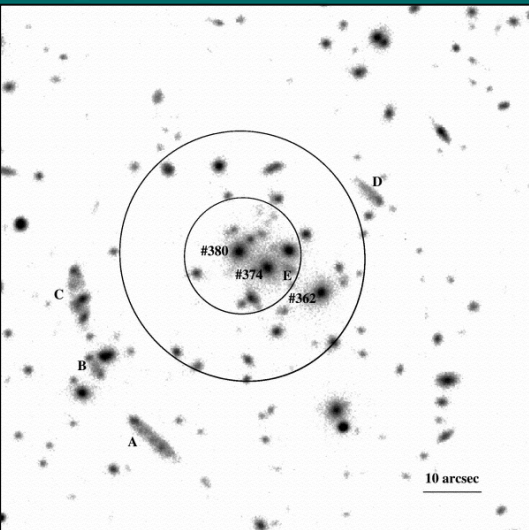


Bradac et al. (2006)

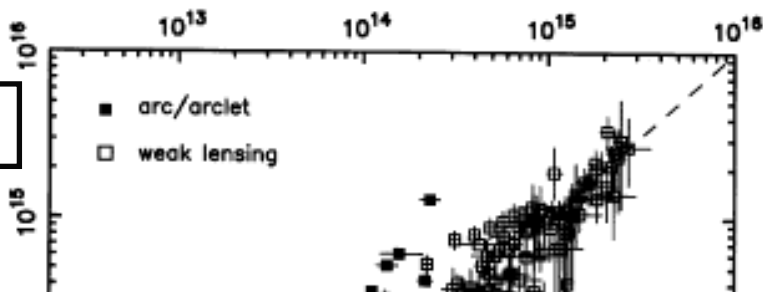
Introduction(2):質量決定の不定性

重レンズ銀河団CL 0024+17 (Ota et al. 2004より)
～200Kpc以内の質量に有意な食い違い。

- $M_X = 0.84^{+0.20}_{-0.13} \times 10^{14} h_{50}^{-1}$ solar mass (Ota et al. 2004)
- $M_{\text{lens}} = 3.117^{+0.004}_{-0.004} \times 10^{14} h_{50}^{-1}$ solar mass (Tyson et al. 1997)
- $M_{\text{lens}} = 2.22^{+0.06}_{-0.06} \times 10^{14} h_{50}^{-1}$ solar mass (Broadhurst et al. 2000)



M_{lens}



統計的に見ても (Wu et al. 1998)
systematic なずれ?

分散もけっこうある?

(ただし、やっていることは結構いいかげん)

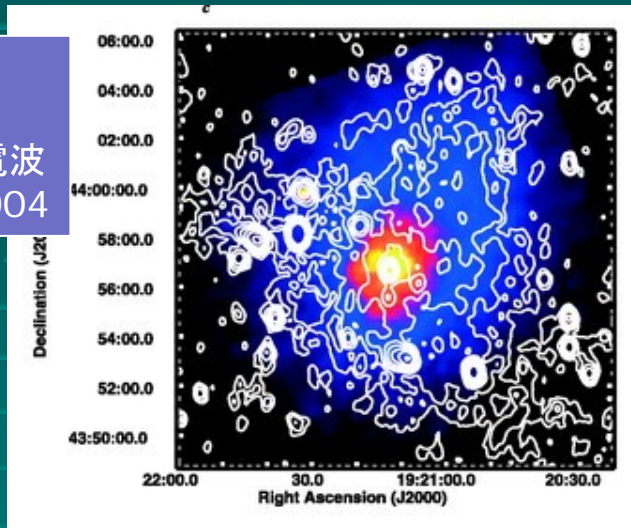
質量決定のさいにはいくつかの仮定が必要:

M_X (静水圧平衡、球対称etc)、 M_{lens} (軸対称etc)、 M_{virial} (力学平衡、速度分散etc)

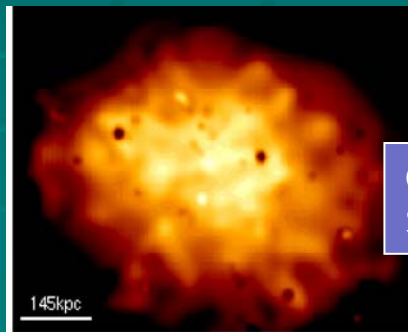
- それらの仮定は衝突中や衝突後数Gyrの銀河団では多かれ少なかれ破れている。
- いつ、どの方向から、どの方法を使うと、どのくらい過大(小)評価になるか?
- それらは観測的に「衝突銀河団」として認識されうるか?

Introduction(3): 粒子加速器としての銀河団

A2319
カラー: X線
等高線: 1.4GHz電波
Govoni et al. 2004



- 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。

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 β 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 $\rho_{\text{DM}} = 0$ 、 ρ_{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。

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

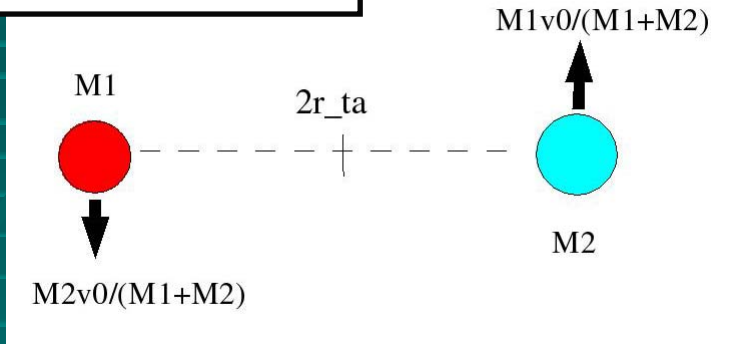
with

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

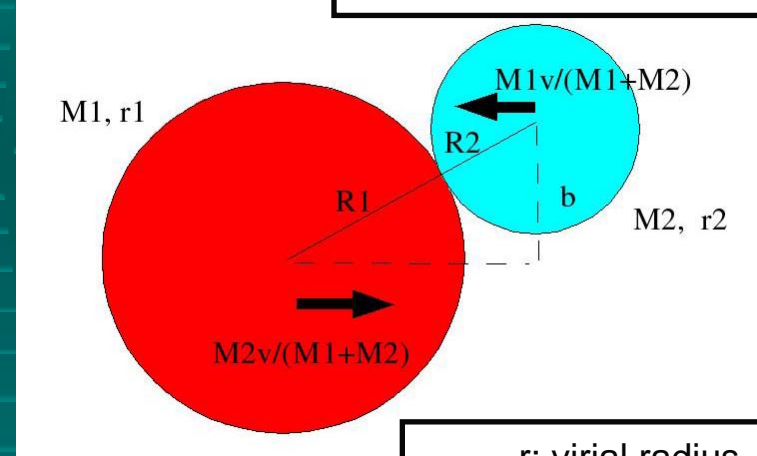
- $r \leq r_{\text{out}}$ で $M_{\text{gas}} / (M_{\text{gas}} + M_{\text{DM}}) = 0.1$

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、

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

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

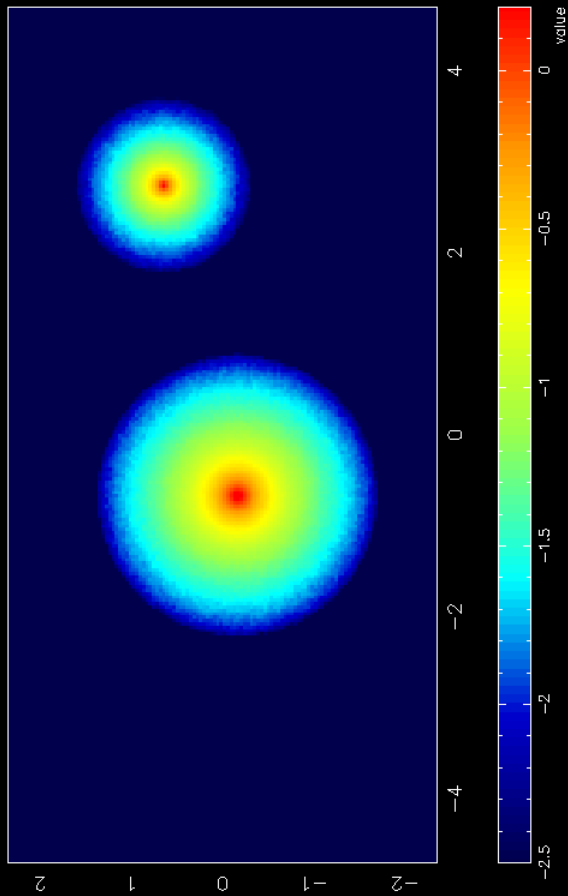
$$\lambda \equiv \frac{J|E|^{1/2}}{G(M_1 + M_2)^{5/2}} = \frac{vb}{(GM_1R_1)^{1/2}} \frac{\alpha^{3/2}}{(1 + \alpha)^{7/2}} \left\{ \frac{1}{1 + \alpha^{(5+n)/6}} - \frac{R_1v^2}{2GM_1} \frac{1}{1 + \alpha} \right\}^{1/2}$$

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

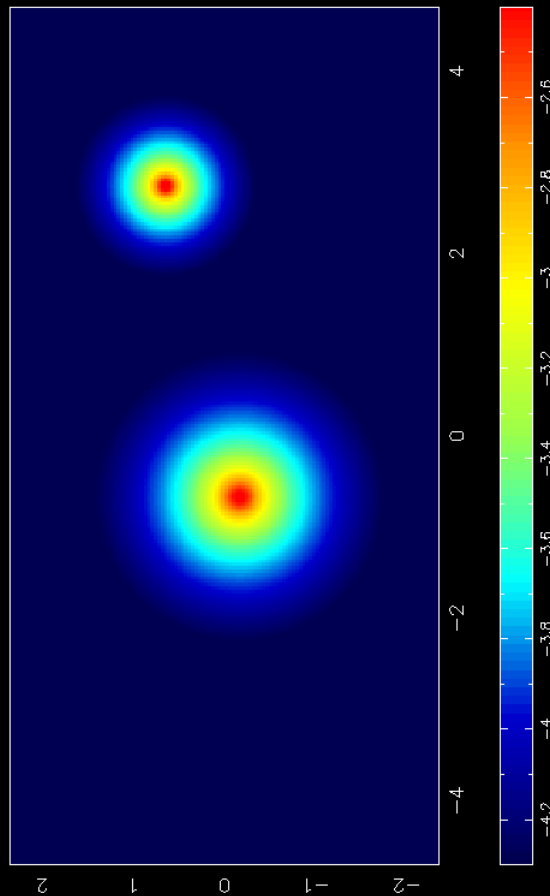
(v, b)

Movies (質量比1:4, $\lambda = 0.05$)

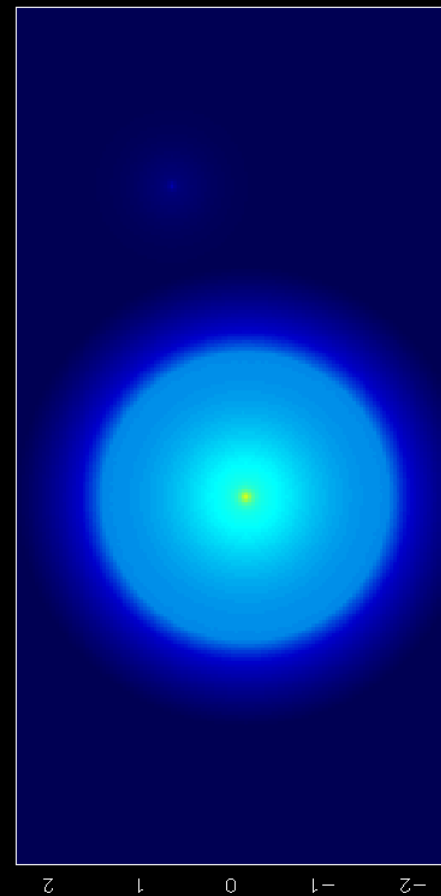
質量分布



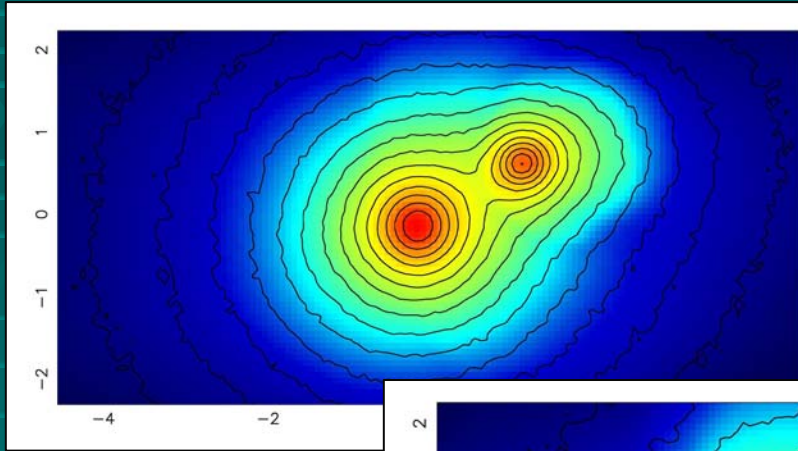
ガス密度分布



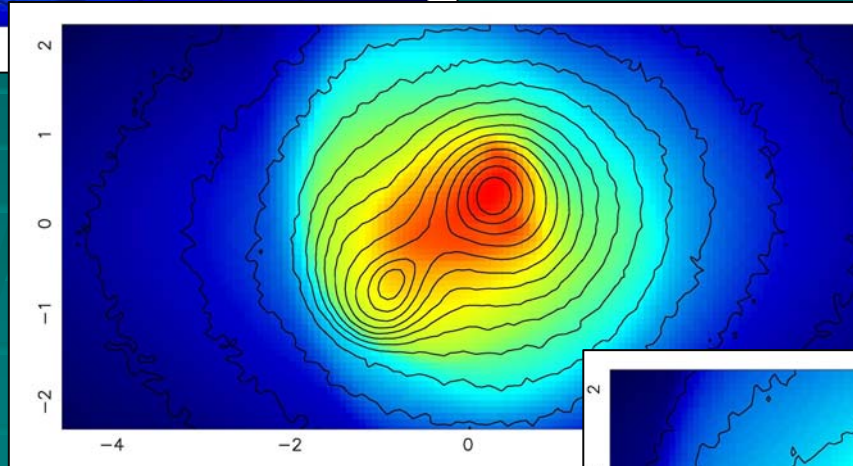
ガス温度分布



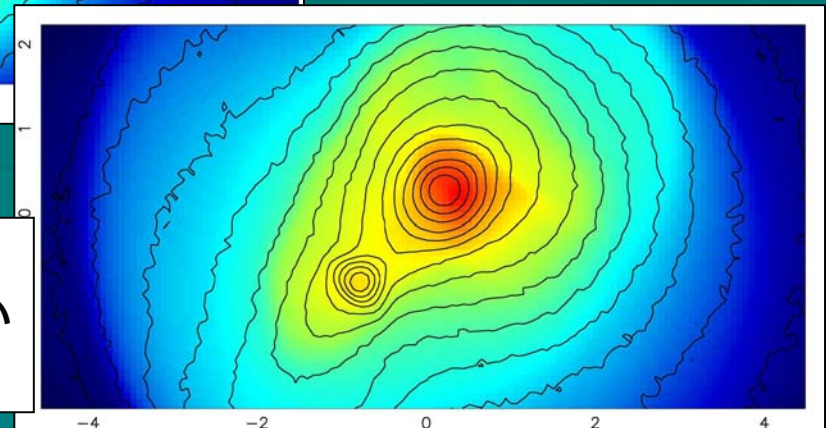
質量分布vsガス分布



core passage 前:
質量分布(等高線)
X線輝度分布(カラー)
はよく一致

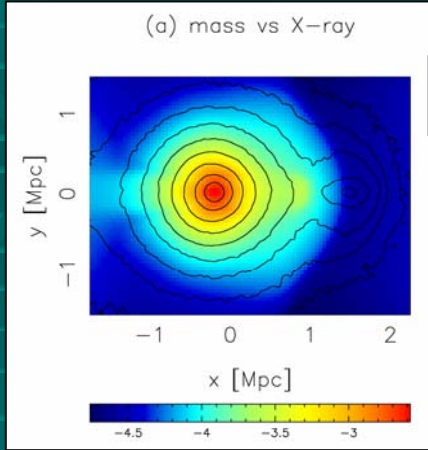


core passage後:
質量分布はダブルピーク
X線はelongateした構造

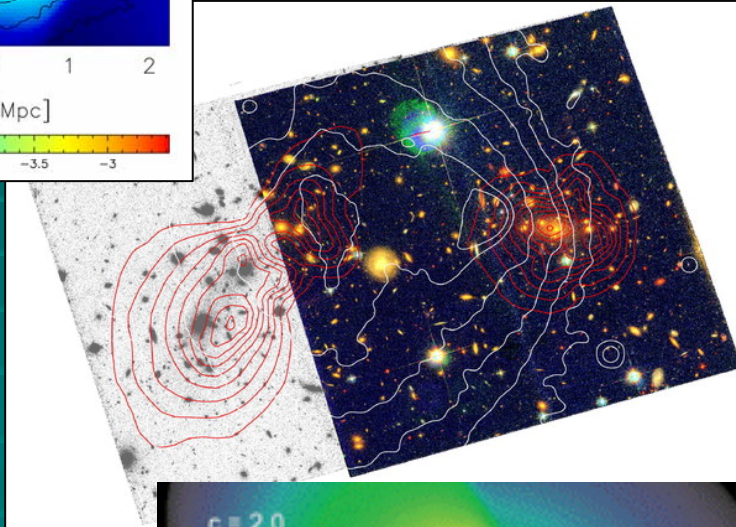


core passage後:
X線ピークを伴わない
質量ピーク

1E0657-56みたいな構造は？

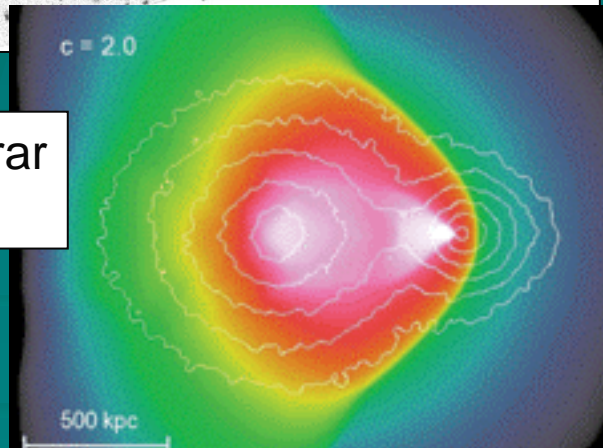


Takizawa 2006



- 典型的なNFW halo同士、ICMにcooling coreなしの場合、mass比が1:16程度が望ましい (Takizawa 2006、解析的解釈も)
- Weak lens + strong lens の解析からは質量比は1:1に近い、またlarger clumpはunusuallyに小さな concentration parameter ($c=2$)を持つ (Bradac et al. 2007)
- SPHで中心部がより高解像度な計算 (Springel & Farrar 2007)
- Larger clumpもずれるというのはなかなか難しい。

Springel & Farrar
2007



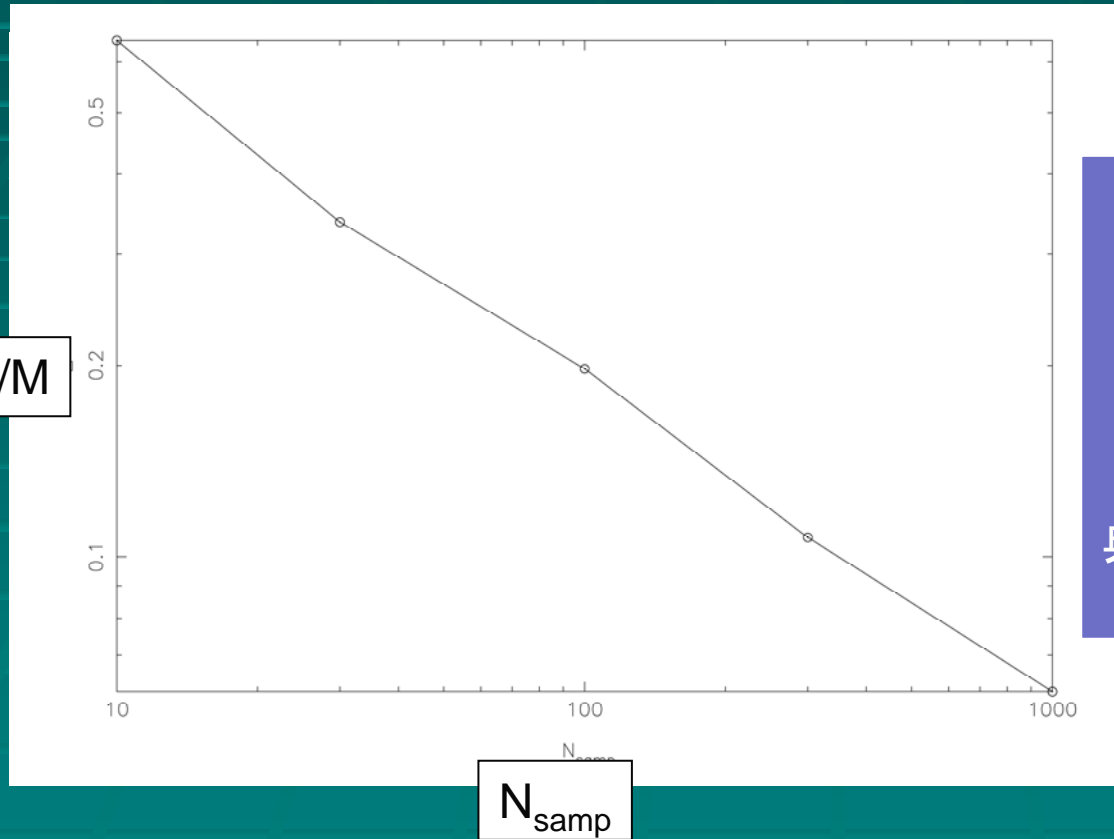
質量評価: virial定理を使った場合:

- シミュレーション中の銀河団をある方向から“観測”
- N体粒子のうち N_{samp} をランダムに選び出し、それを「視線速度の観測された銀河」とみなし、virial 定理を使って質量を評価。

$$M_{\text{VT}} = \frac{3\pi}{G} \sigma_{\text{los}}^2 \left\langle \frac{1}{r} \right\rangle^{-1}$$
$$\left\langle \frac{1}{r} \right\rangle^{-1} = N_p \left(\sum_{i>j}^{N_p} \frac{1}{r_{ij}} \right)$$

- 上の作業を100回行って、 M_{VT} の平均、分散を求め、「本当の質量」と比較。

銀河の個数によるランダムエラー



NFW+ β modelの平衡形状の
銀河団でvirial定理を使って
質量評価

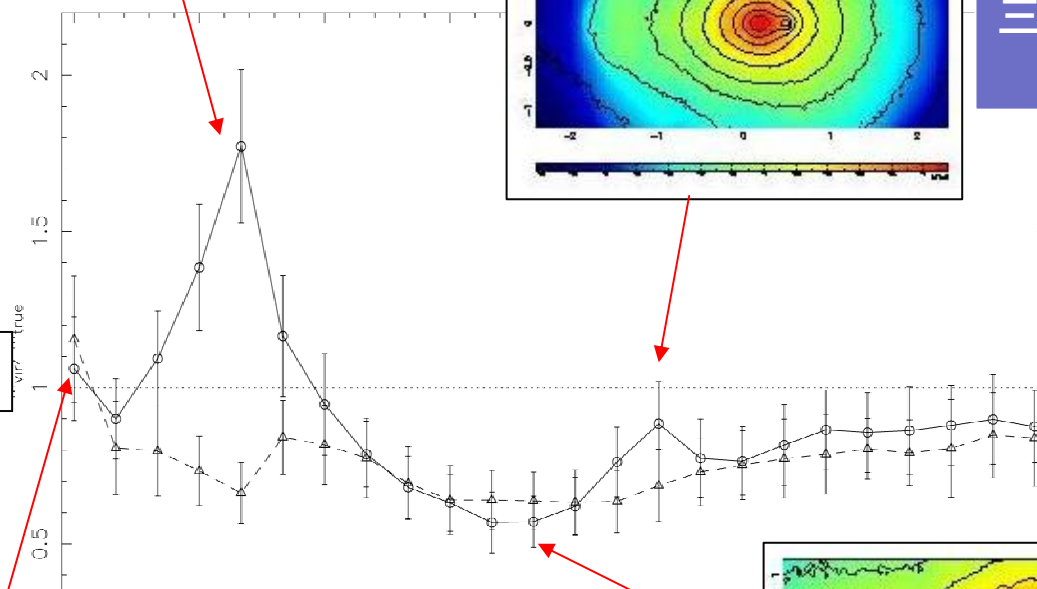
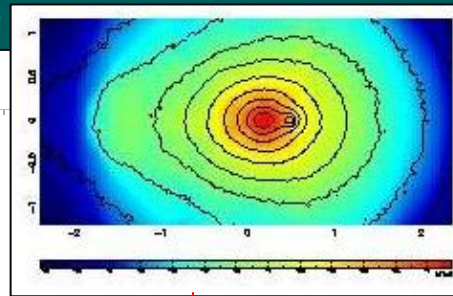
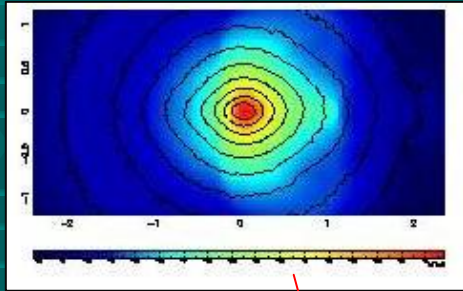
$$\Delta M/M \sim 0.2 N_{\text{samp}}^{0.5}$$

典型的な場合 ($N_{\text{samp}} \sim 100$)だと
1 σ で20%ぐらいのエラー

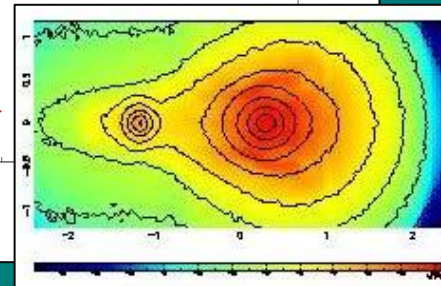
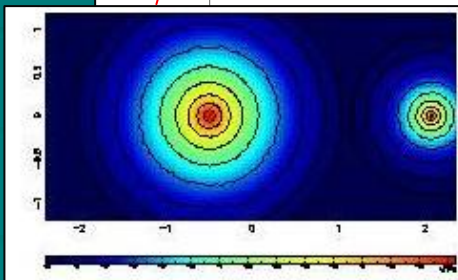
銀河団衝突による不定性

質量比1:4のmerger simulation
で、 M_{vir} と M_{true} を比較

丸+実線: 視線が衝突軸に平行
三角+破線: 視線が衝突軸に垂直
 $N_{\text{samp}}=100$



$M_{\text{vir}}/M_{\text{true}}$

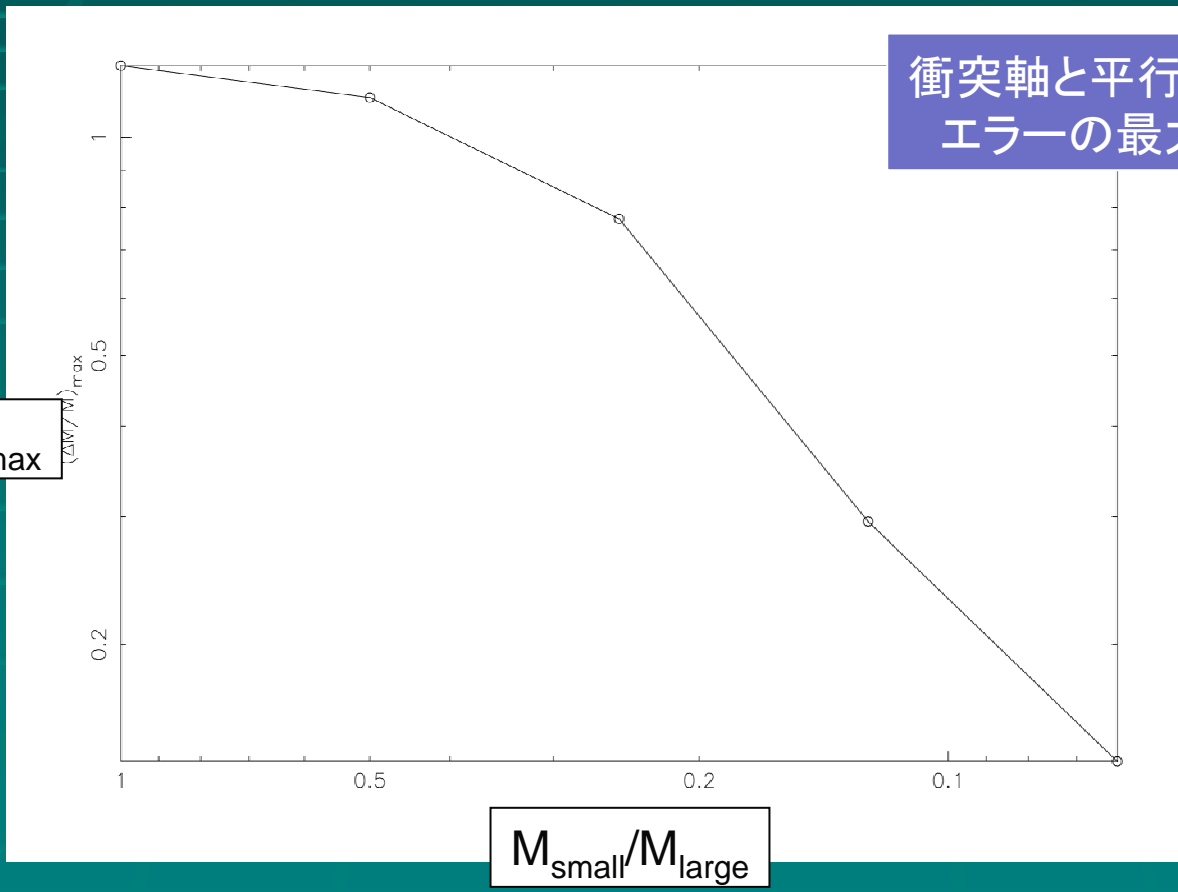


time [Gyr]

衝突の質量比にたいする依存性

衝突軸と平行な方向から見たときの
エラーの最大値の質量比依存性

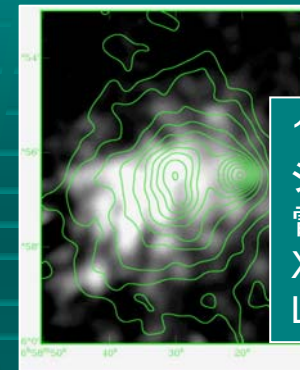
$(\Delta M/M)_{\max}$



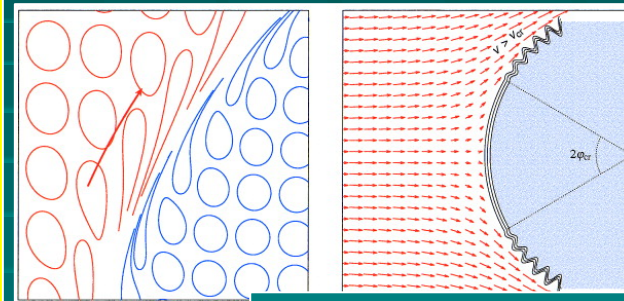
$M_{\text{small}}/M_{\text{large}}$

銀河団磁場の進化

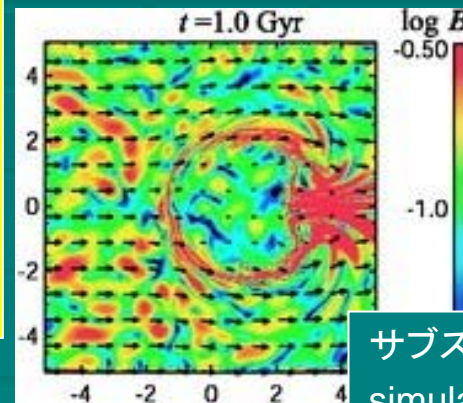
- 銀河団内には数 μG 程度の乱れた磁場が存在
 - ◆ シンクロトロン電波ハロー(レリック)
 - ◆ Faraday rotation measure
- $P_B \sim 0.01 P_{th}$ 重要じゃないのか？そんなことはない。
 - ◆ 流体不安定性の抑制
 - ◆ 熱伝導の抑制
 - ◆ 粒子加速(磁気乱流、衝撃波)
- いずれも磁場構造が重要
- ランダム磁場をもった銀河団同士の衝突をN体+MHD シミュレーションでしらべる。



1E0657-56銀河団の
シンクロトロン電波ハロー
電波(グレースケール)
X線(等高線)
Liang et al. (2000)



サブストラクチャーの運動による接触不連続面での磁場進化の模式図
Vikhlinin et al. (2001)



サブストラクチャーの運動のMHD simulation (Asai et al. 2007)

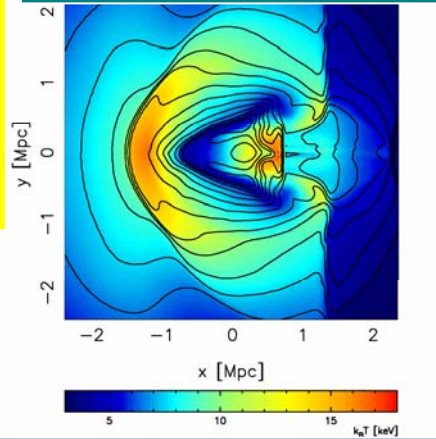
N体 + MHD simulations

- 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

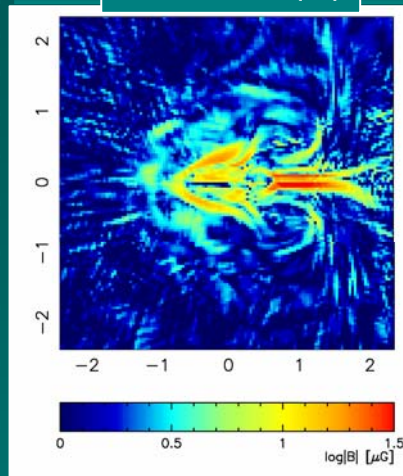
MHD Simulation: Results

1:4
head-on merger
コア通過後
0.66Gyr

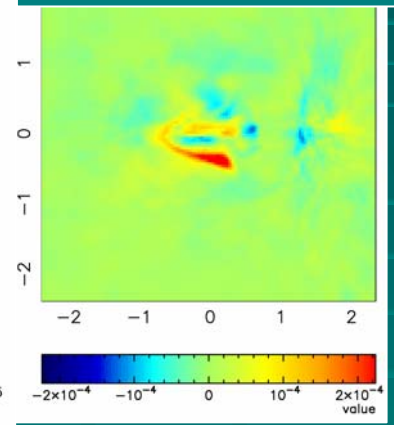
密度(等高線) & 温度(カラー)



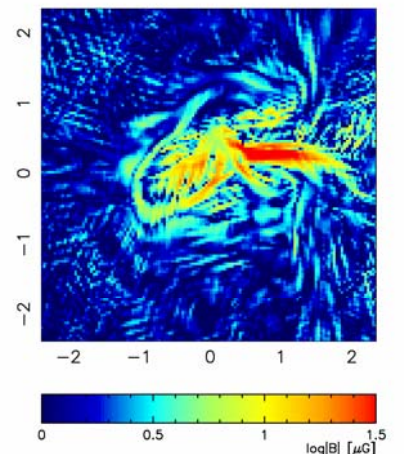
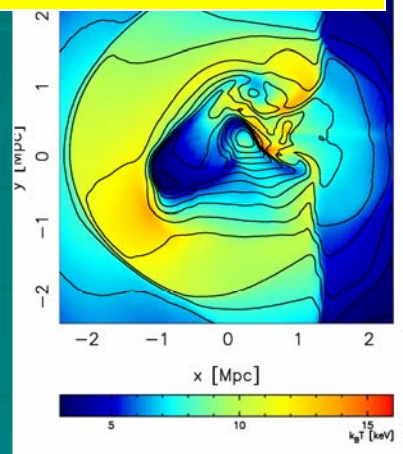
磁場強度 |B|



Faraday Rotation Measure
($\int n_e B_{\parallel} dl$)



1:4
off-center merger



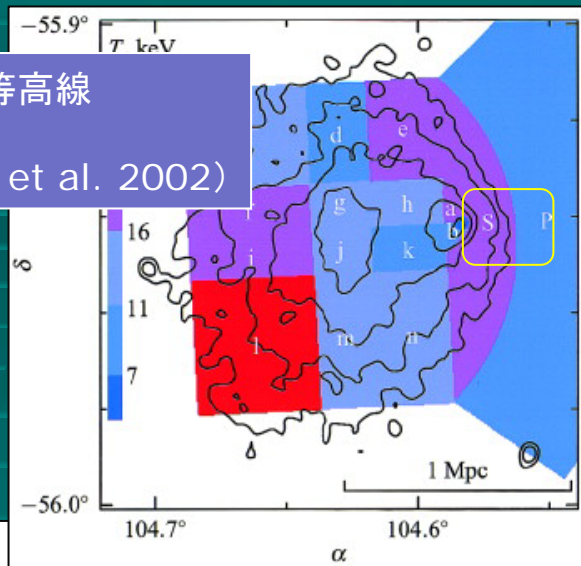
◆ 磁場に囲まれた低温領域 (Faraday Rotation Measureの大きな領域として見えるかも)
◆ 小銀河団後方に磁場が集められる。
(off-center mergerでは衝突相手に近い側の斜め後方)

まとめ

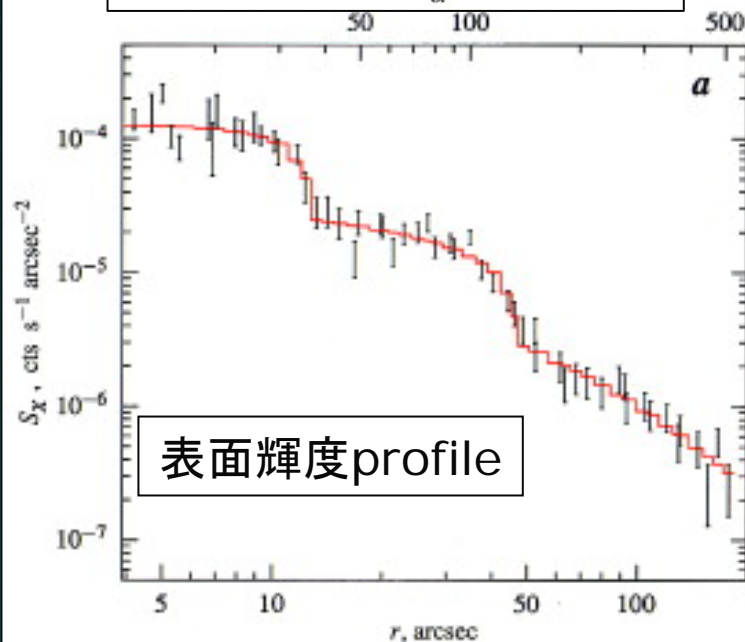
- 銀河団衝突の痕跡
 - X線観測 (ICMの密度・温度分布)
 - weak lensing (ガスとDMの分布の違い)
- 衝突中のDMとICMの空間分布
 - Core passage前: ほぼ一致
 - Core passage後: DMはdouble peak, ICMはelongate したpeak, ICMのpeakをとみなわないDM peak
 - 1E0657-56は依然としてpuzzle
- ヴィリアル定理を用いた質量評価
 - 銀河の個数によるランダムエラー
 - 衝突のダイナミクスによるシステムティック
- 磁場の進化
 - 磁場に囲まれた低温領域
 - Moving substructure 背後の整った磁場構造

1E 0657-56: cold front & bow shock

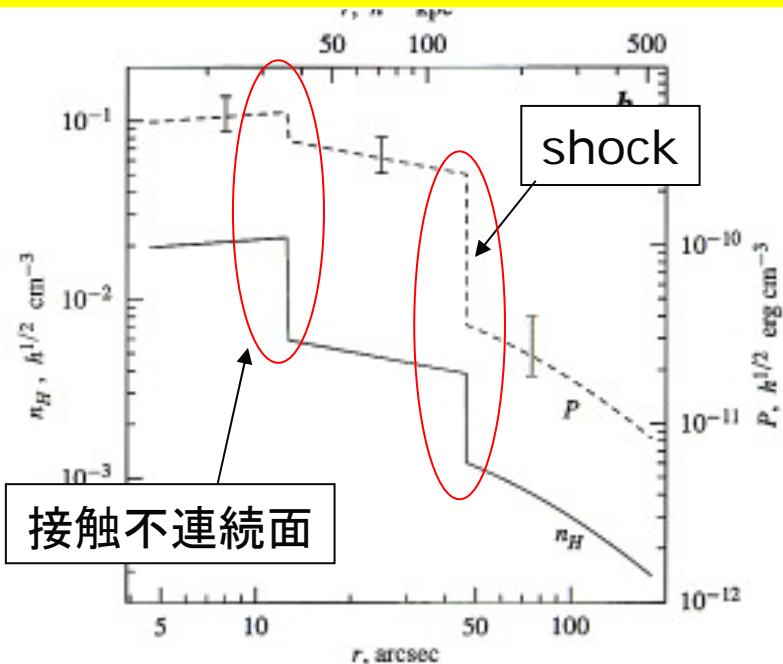
X線イメージ: 等高線
 温度: カラー
 (Markevitch et al. 2002)



Substructure 前面の密度、圧力 profile



表面輝度profile



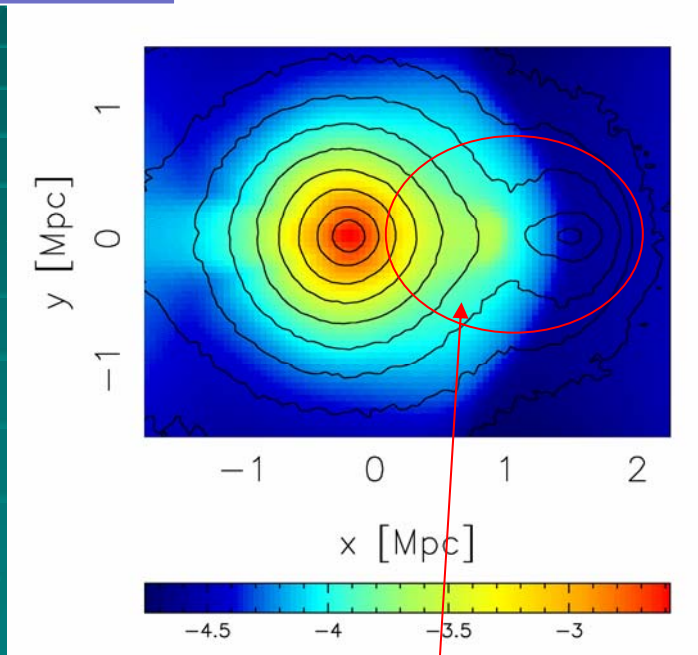
接触不連続面

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)

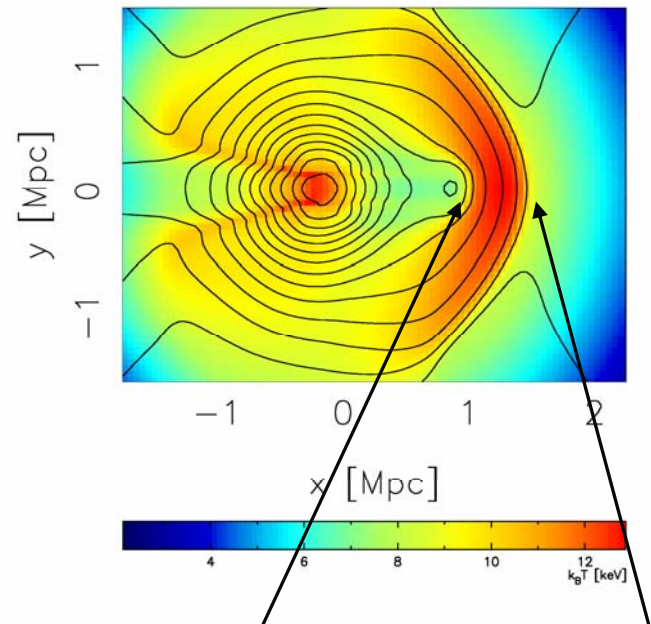
(a) mass vs X-ray



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
(Λ CDMでは $x \sim 0.25$)、結局

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

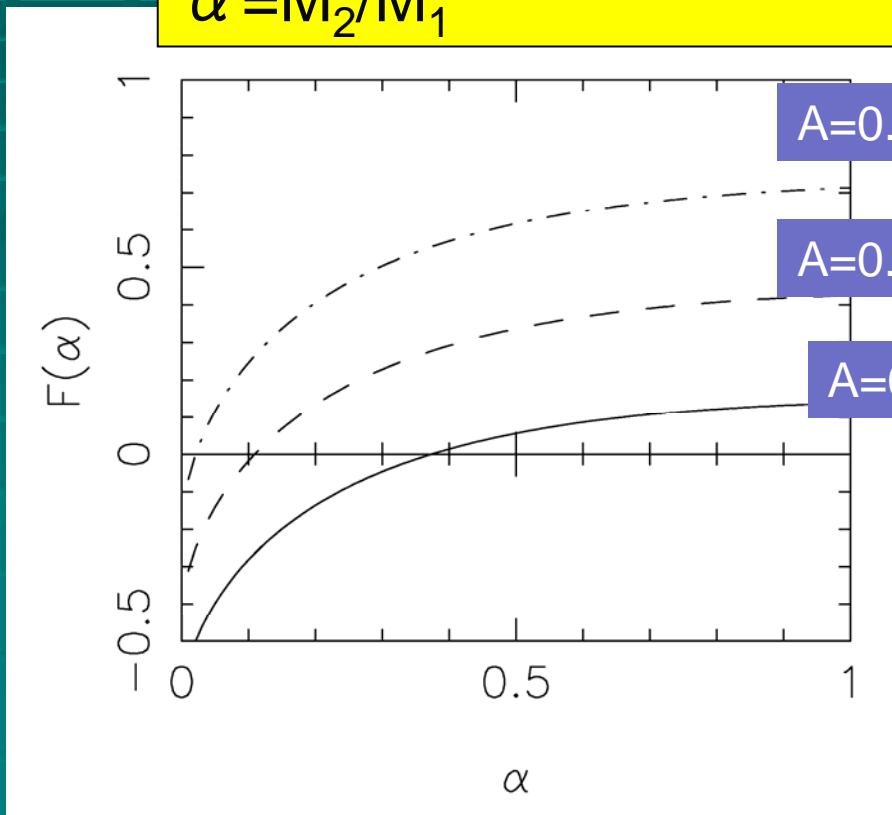
ただし、 $c=r_2/R_2$ はNFWモデルのconcentration parameter で M に弱く依存する関数
さらにNFWモデルでは

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

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。