

銀河団衝突に関する話題： 質量分布、質量評価

滝沢元和

(山形大学理学部物理学科)

「国立天文台CfCAユーザーズミーティング」

(2007.11.29--30@国立天文台三鷹)

目次

- Introduction
- ダークマター分布vsガス分布
(Takizawa 2006 PASJ, 58, 925)
- 質量評価の不定性について
(Takizawa, Nagino, & Matsushita in prep)
- まとめ

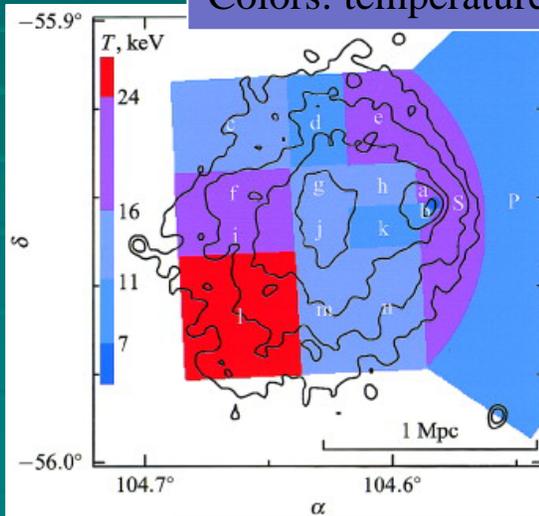
Introduction (1) :

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

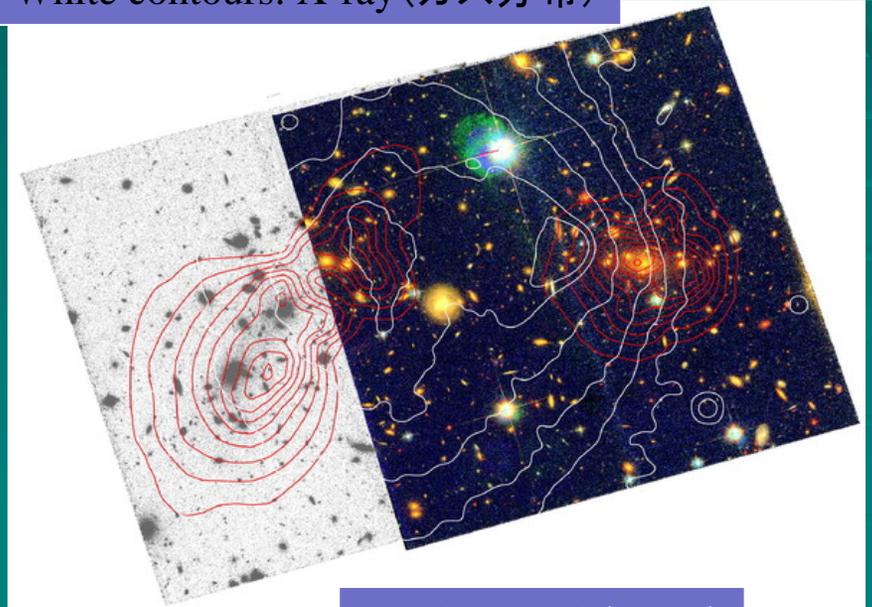
Contours: X-ray brightness
Colors: temperature



Markevitch et al. (2002)

1E 0657-56

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

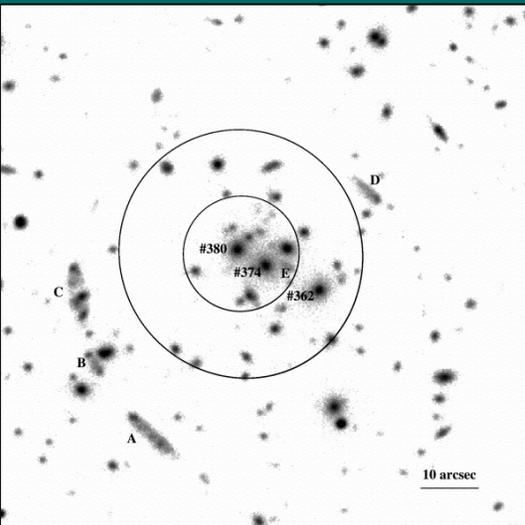


Bradac et al. (2006)

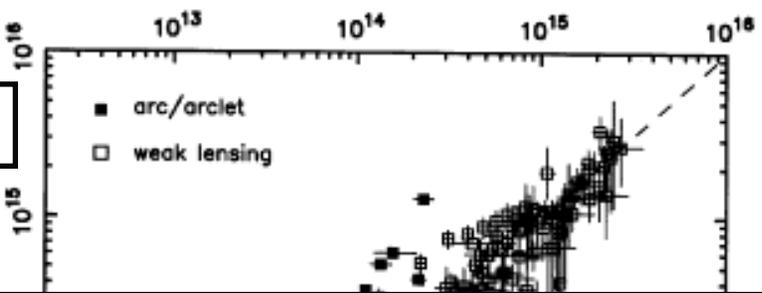
Introduction(2):質量決定の不定性

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?

Numerical Methods and Models

- 計算方法: N体 + 流体

Particle Mesh(PM)法+Roe TVD

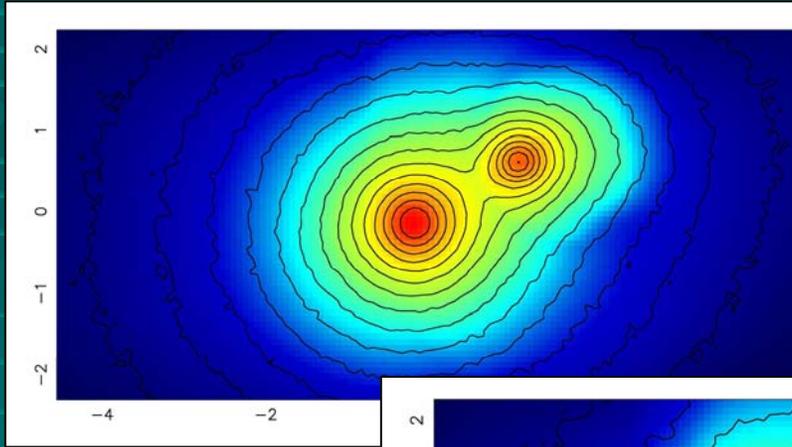
- 自己重力: FFT with isolated boundary conditions
- 格子数 $256 \times 128 \times 128$
- 粒子数 $256 \times 128 \times 128 (\doteq 4.2 \times 10^6)$
- VPP5000 @ 国立天文台 CfCA
- Virialized cluster model

- DM NFW profile
- ガス β model

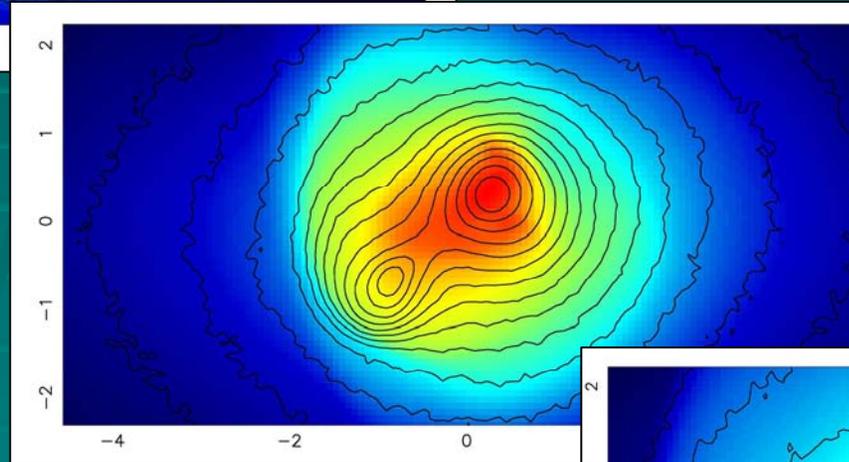
$$\rho_{\text{DM}}(r) = \frac{\delta_c \rho_{c0}}{(r/r_s)(1 + r/r_s)^2},$$

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

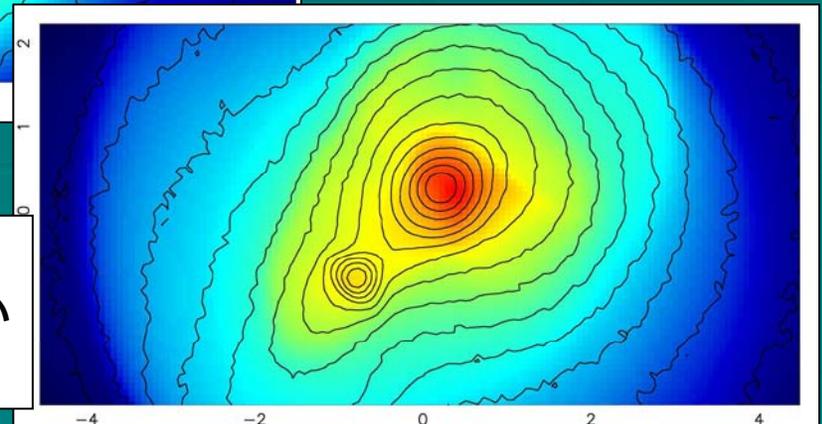
質量分布vsガス分布



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



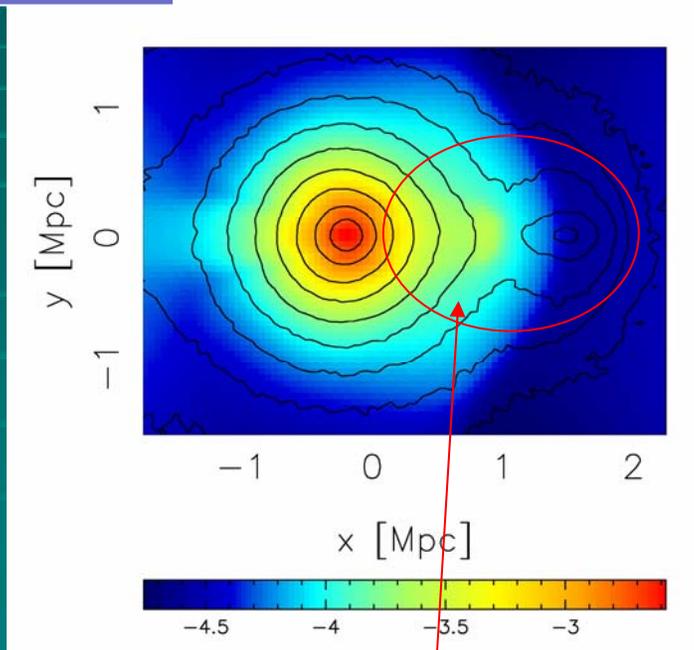
core passage後:
X線ピークを伴わない
質量ピーク

1E0657-56のような構造は？

質量比16:1の正面衝突、コア通過後0.67Gyr

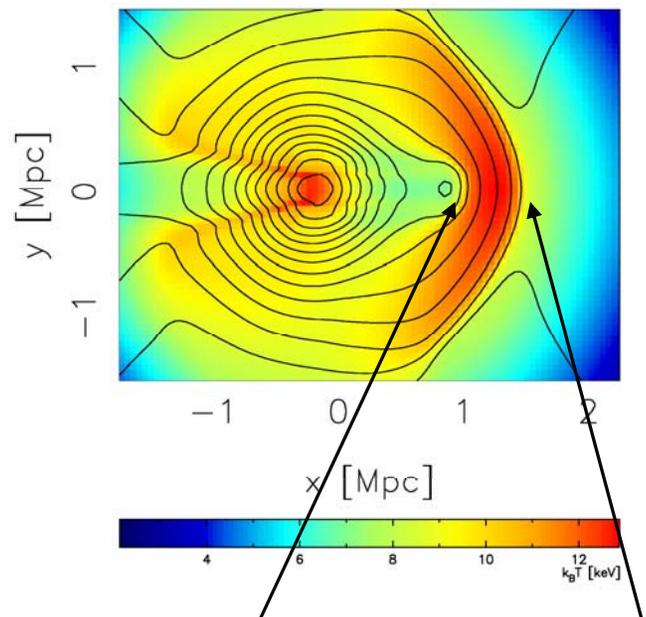
質量分布(等高線)
X線イメージ(カラー)

(a) mass vs X-ray



X線イメージ(等高線)
温度分布(カラー)

(b) X-ray vs kT_{ew}



質量ピークに遅れるX線ピーク

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

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

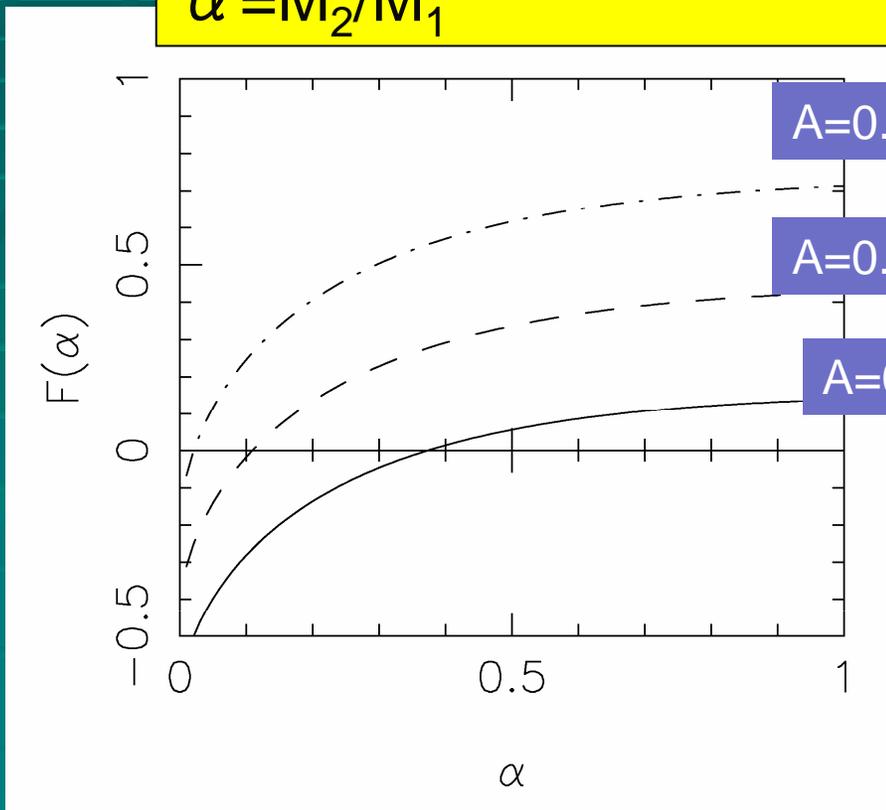
ただし、 $c=r_2/R_2$ はNFWモデルのconcentration parameter で M に弱く依存する関数
さらにNFWモデルでは

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

簡単な解析的モデルによる議論(2)

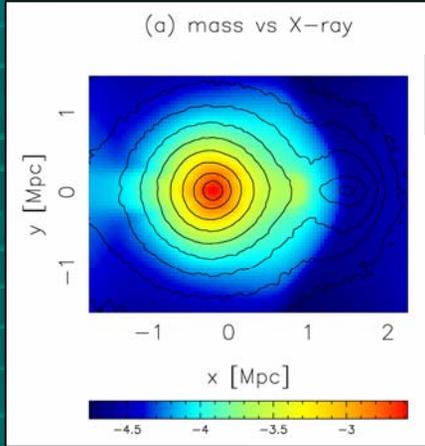
$$F(\alpha) \propto (\text{重力}) - (\text{ラム圧})$$
$$\alpha = M_2/M_1$$

$F(\alpha) < 0$ でラム圧優勢

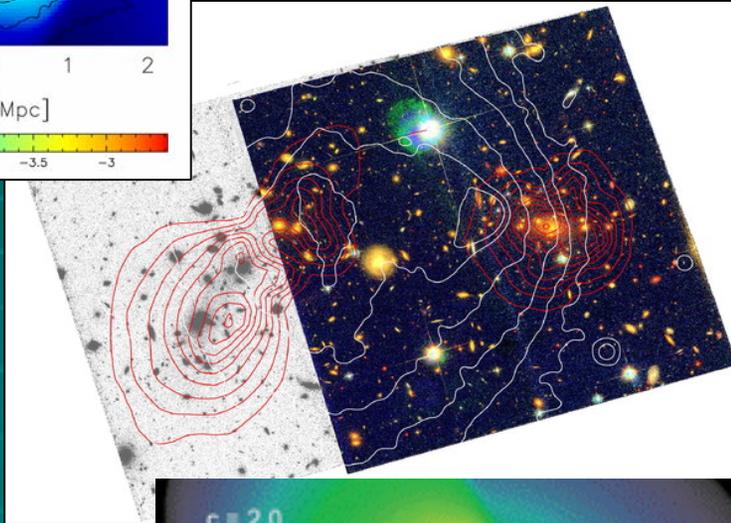


$\alpha \sim 0.1$ より小さいところではram pressureによるガスのはぎ取りが有効
→ 小さなsubstructureほどガスがはぎ取られやすい。

1E0657-56みたいな構造は？

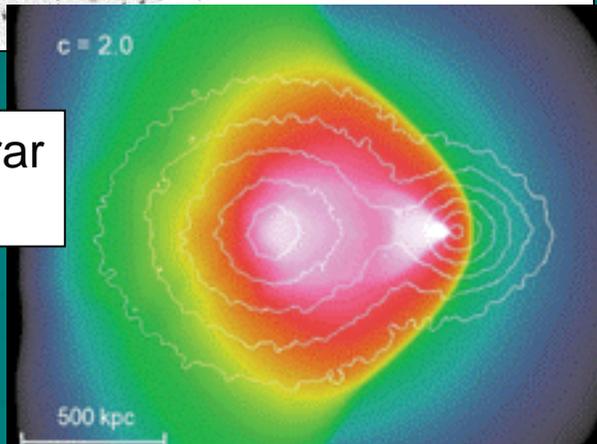


Takizawa 2006



- 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



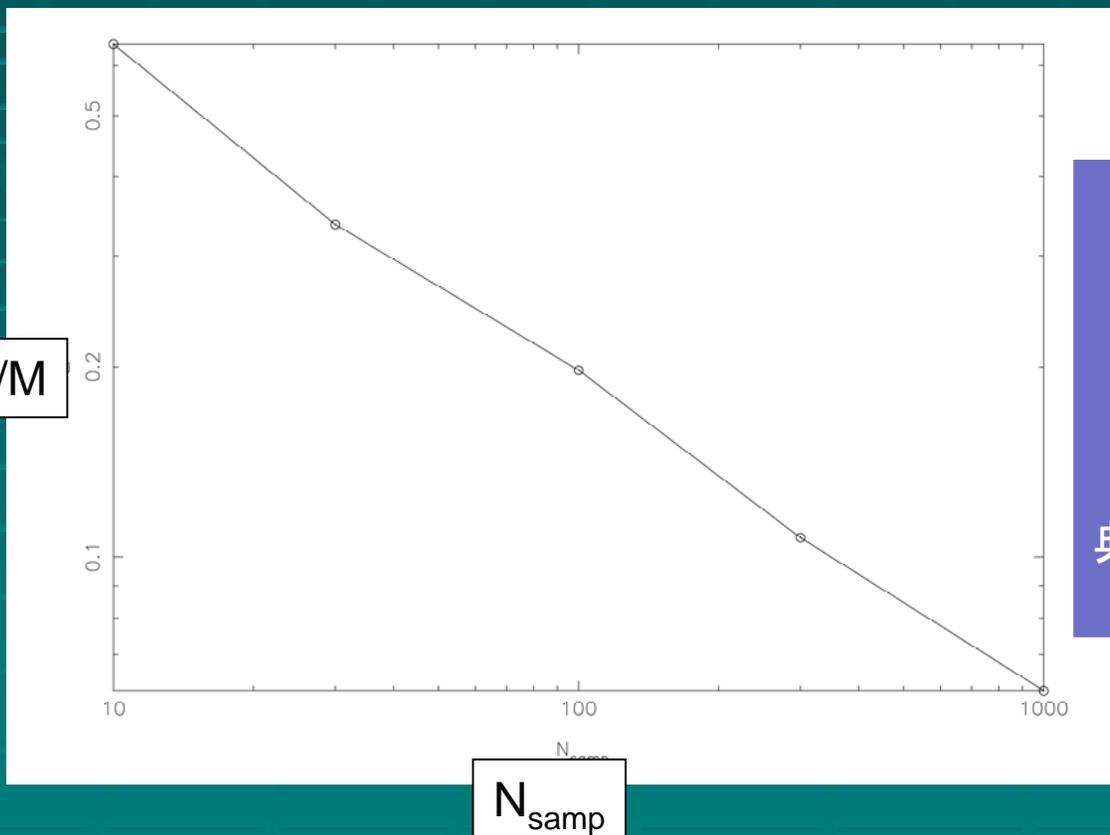
質量評価: virial定理を使った場合:

- 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

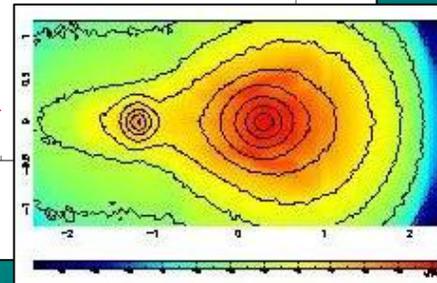
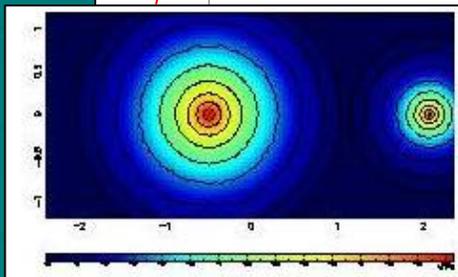
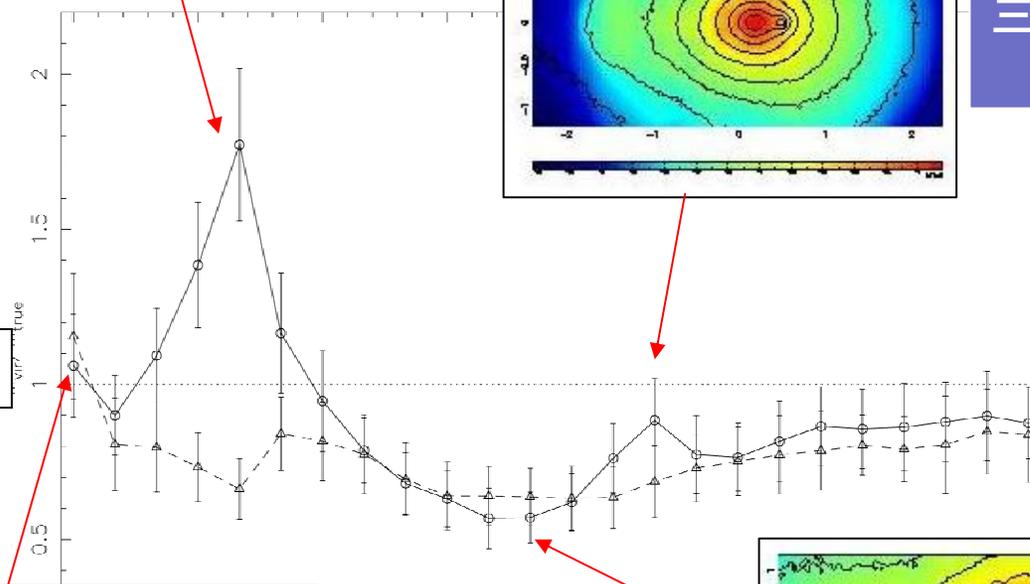
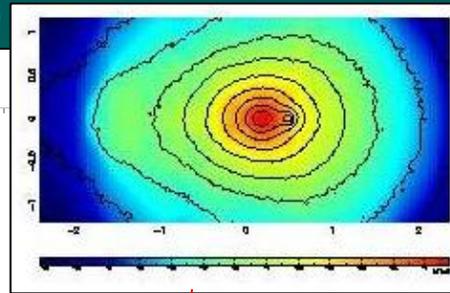
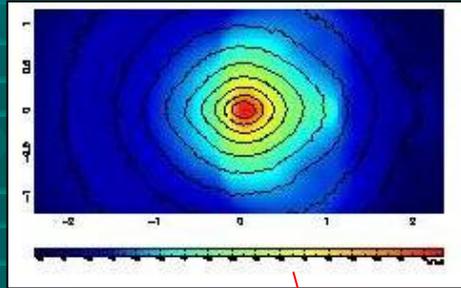
$$\Delta M/M \sim 0.2 \times N_{\text{samp}}^{-0.5}$$

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
 $N_{\text{samp}}=100$



time [Gyr]

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をともしないDM peak
 - 1E0657-56は依然としてpuzzle
- ヴィリアル定理による質量評価
 - 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
 - X線観測による質量評価との比較も
(Takizawa, Nagino & Matsushita in prep)