

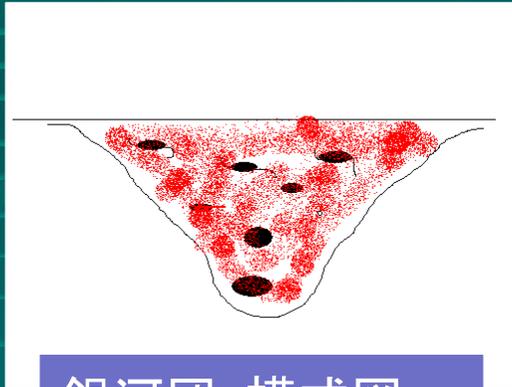
The Impact of Mergers on the Mass Estimation of Galaxy Clusters

滝沢元和¹、薙野綾²、松下恭子²

¹山形大、²東京理科大

山形大学宇宙物理学グループ談話会
(2008年6月6日)

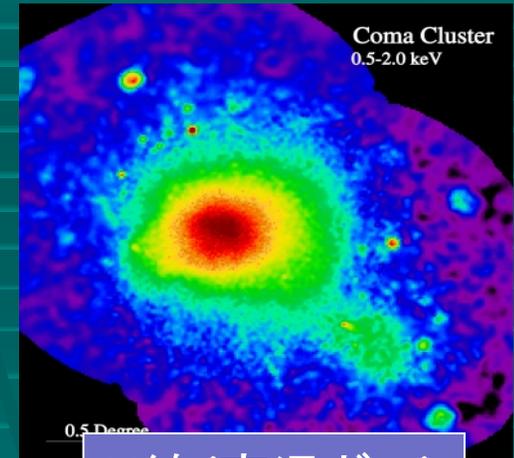
Introduction



銀河団: 模式図



可視光(銀河)



X線(高温ガス)

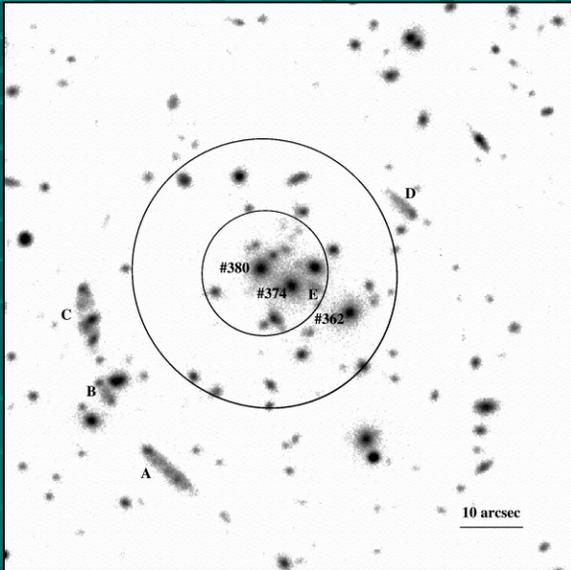
■ 銀河団

- 暗黒物質の重力ポテンシャル中に束縛された高温ガス ($T \sim 10^7 - 8K$)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)
- 暗黒物質の実験場(重力レンズ、self-interacting dark matter など)

Introduction (2)

- 質量は系の最も基本的なパラメーターのひとつ。自己重力系では特に大事。
- 銀河団などの大スケールでの質量分布
 - ダークマターの性質
 - 構造形成やバリオンの進化のてがかり
- 観測的に質量を決める場合、複数の方法によるクロスチェックが重要
 - 銀河の視線速度分散 + Virial定理 or Jeans 方程式
 - X線観測 (温度、密度分布) + 静水圧平衡
 - 強弱の重力レンズ

Introduction (3)



ところが、手法によって得られる質量が異なる場合がある。

重力レンズ銀河団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)

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、速度分散の等方性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?

● N体+流体のシミュレーションデータを用いて、「質量評価のシミュレーション」をおこない、本当の質量と比べてみる。

Simulation Data (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。

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

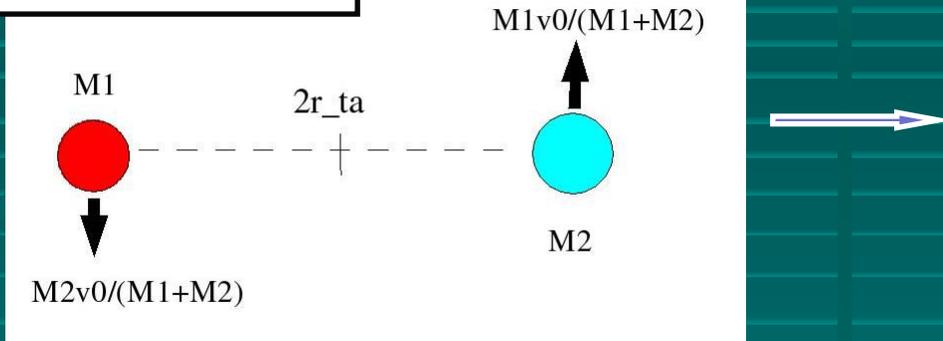
with

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

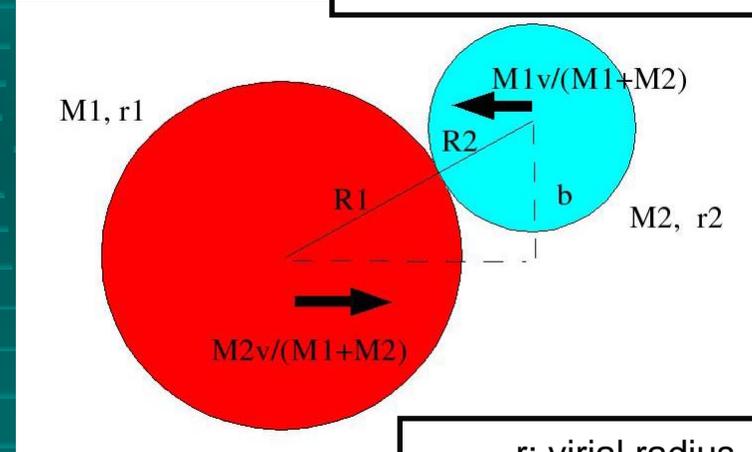
- $r \leq r_{\text{out}}$ で $M_{\text{gas}} / (M_{\text{gas}} + M_{\text{DM}}) = 0.1$

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、

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

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

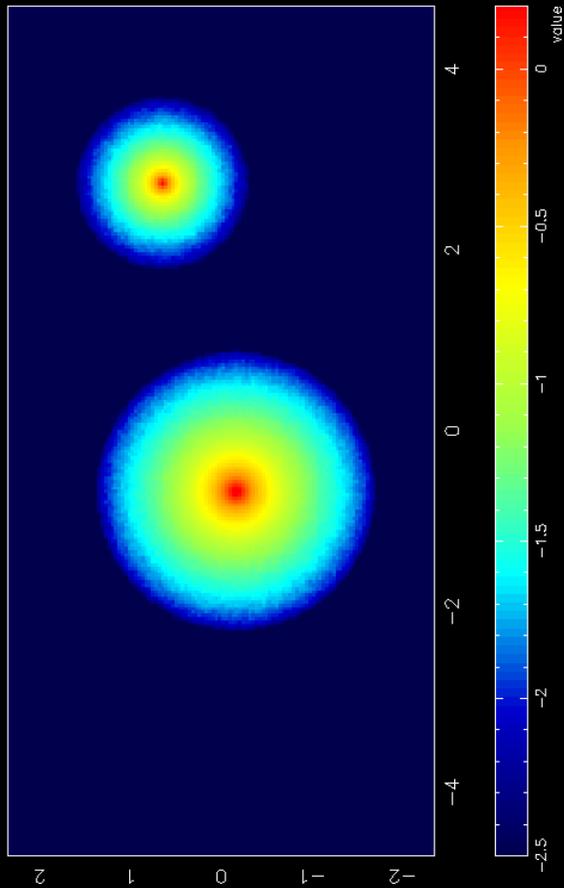
$$\lambda \equiv \frac{J|E|^{1/2}}{G(M_1 + M_2)^{5/2}} = \frac{vb}{(GM_1R_1)^{1/2}} \frac{\alpha^{3/2}}{(1 + \alpha)^{7/2}} \left\{ \frac{1}{1 + \alpha^{(5+n)/6}} - \frac{R_1v^2}{2GM_1} \frac{1}{1 + \alpha} \right\}^{1/2}$$

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

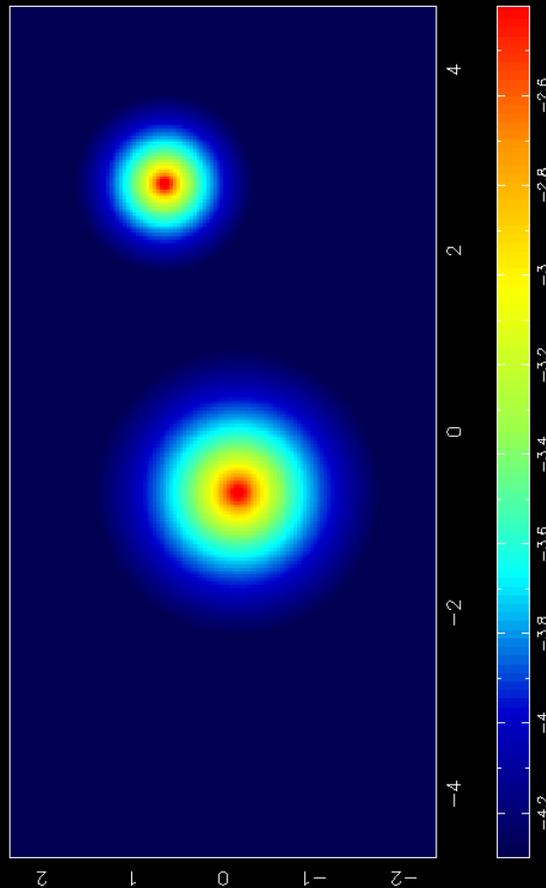
(v, b)

Movies (質量比1:4, $\lambda = 0.05$)

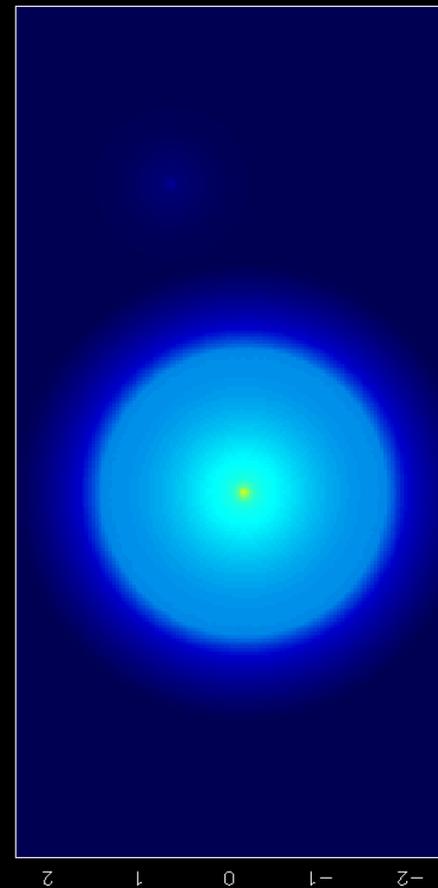
質量分布



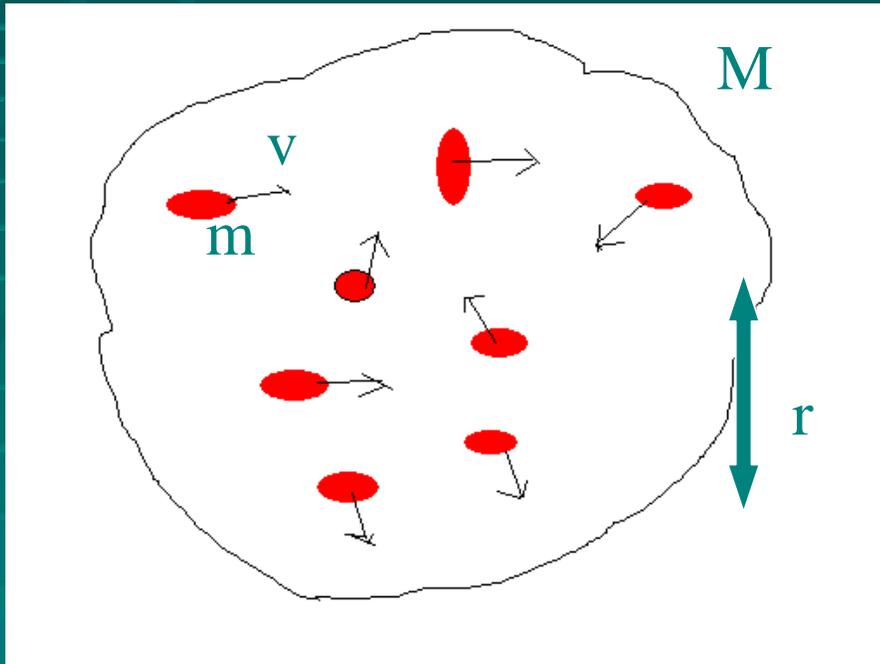
ガス密度分布



ガス温度分布



ビリアル定理による質量推定法



銀河のランダムな運動と銀河団の重力が
つりあってまとまった構造になっている。

自己重力系が力学平衡にあるとすると、
 $2K+W=0$

K:運動エネルギー

W:ポテンシャルエネルギー

$K \sim Mv^2/2$, $W \sim -GM^2/r$ なので
 $M \sim rv^2/G$

v 自体はわからなくても、視線方向の
成分ならわかるはず。
 r も天球面上の成分ならわかるはず。

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。

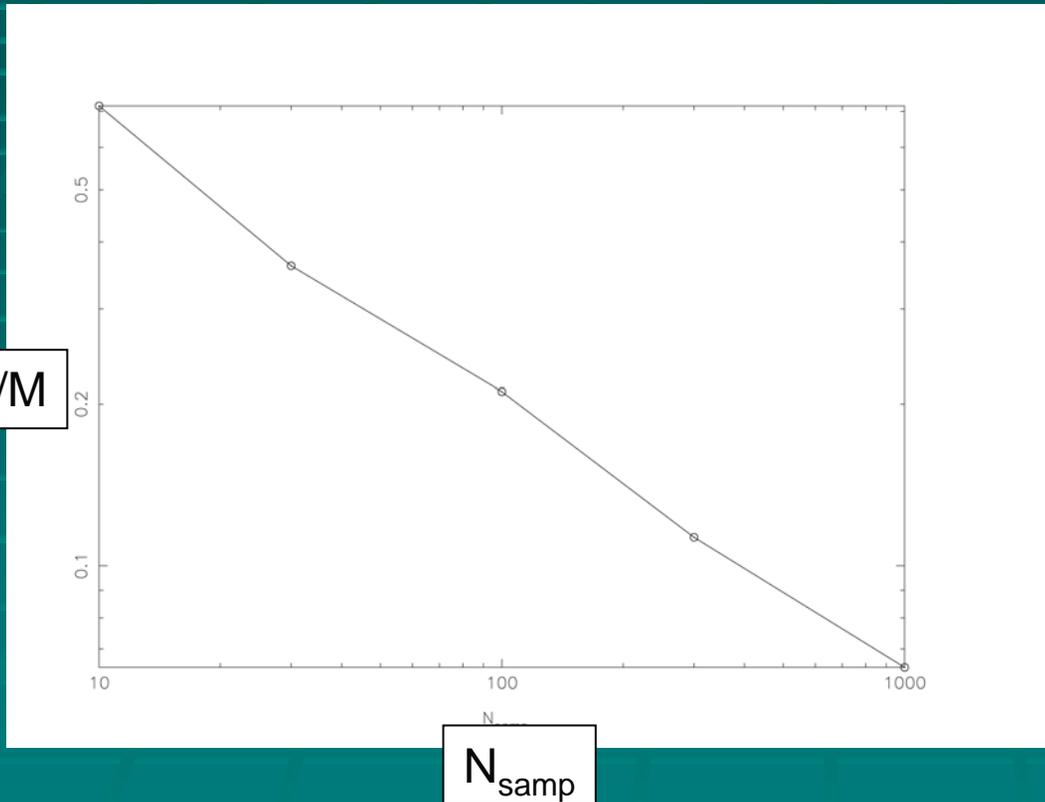
$$M_{\text{VT}} = \frac{3\pi}{G} \sigma_{\text{los}}^2 \left\langle \frac{1}{r} \right\rangle^{-1}$$

$$\left\langle \frac{1}{r} \right\rangle^{-1} = N_p \left(\sum_{i>j} \frac{1}{r_{ij}} \right)$$

r_{ij} : 天球面上に投影された距離
 σ_{los} : 視線方向の速度分散

- 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

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

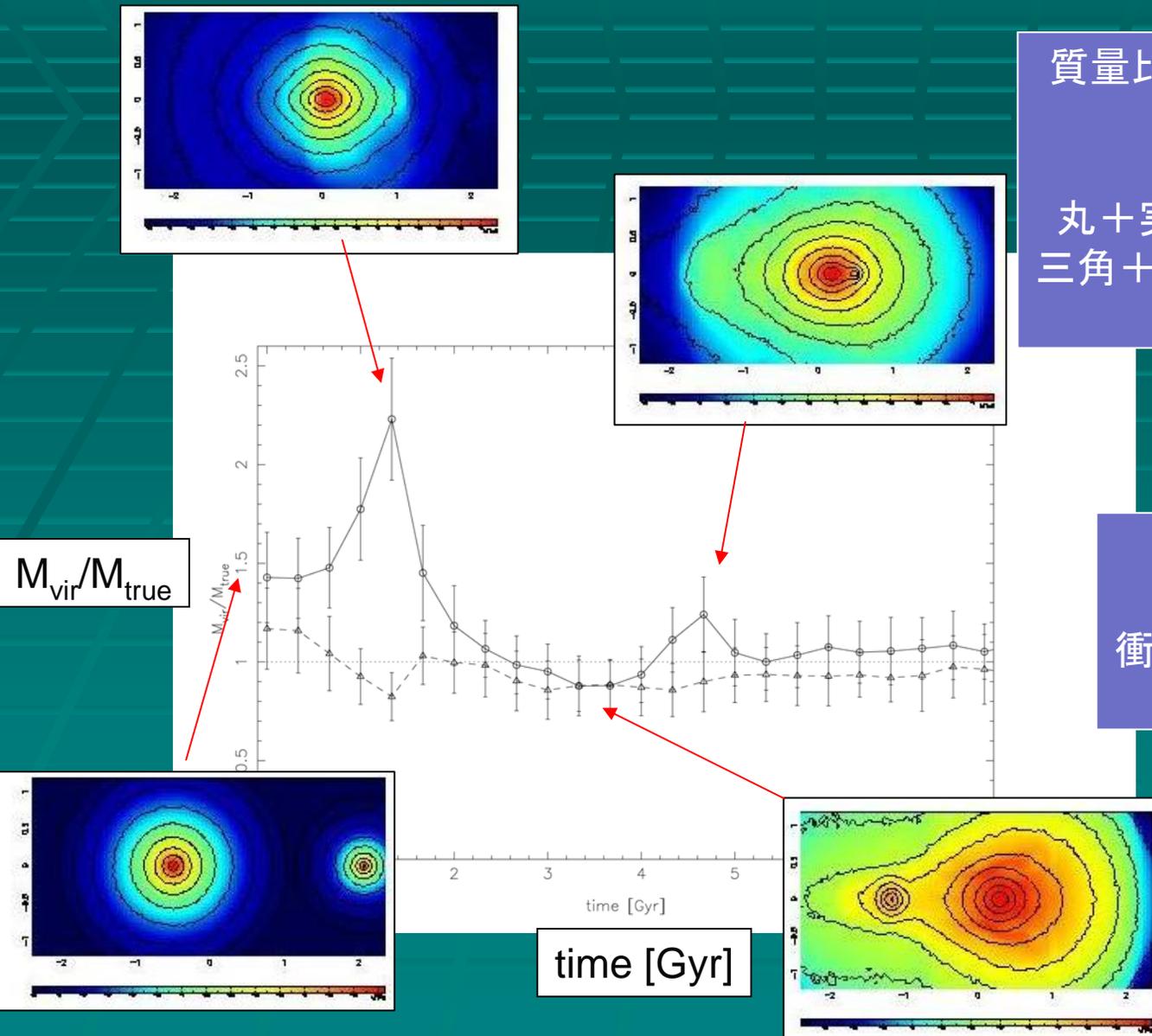
典型的な場合 ($N_{\text{samp}} \sim 100$)だと
1 σ で20%ぐらいのエラー

Virial定理を用いた場合：結果

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

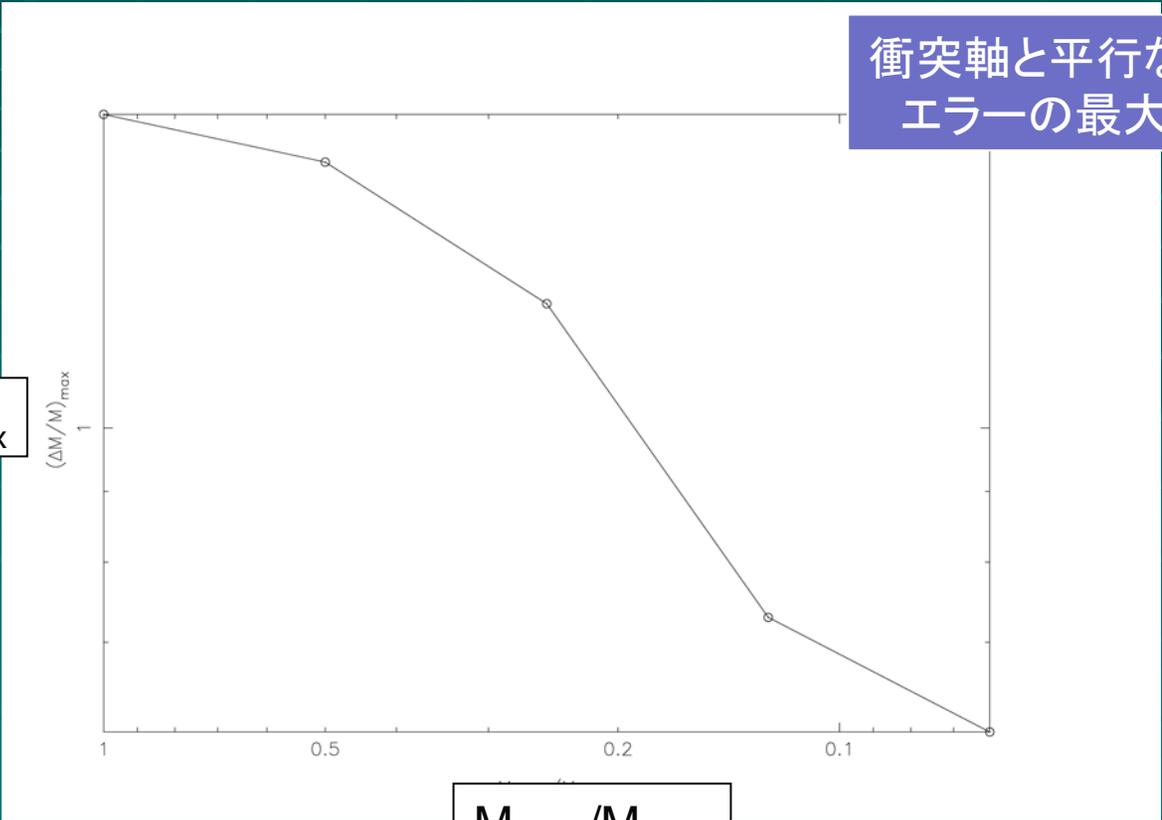
衝突軸方向から観測
→ 過大評価傾向
衝突軸に垂直方向から観測
→ やや過小評価傾向



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

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



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

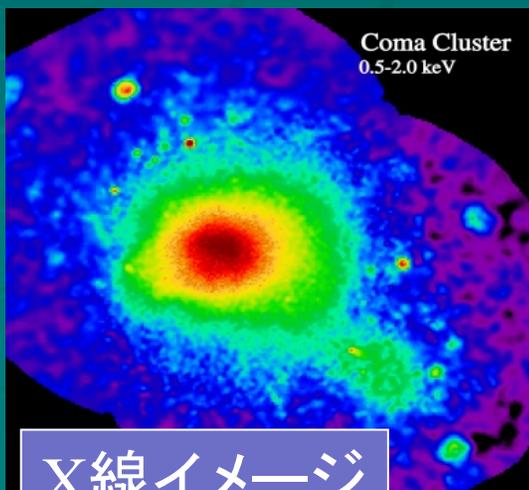
質量をはかる別のやり方： 高温ガスを使う



光(銀河)

銀河団には銀河だけでなく高温ガスもある。
光では見えないがX線で見える。
(実は銀河よりもたくさんある。)

高温(約1億度)のガスはそのままだと
蒸発してしまう(沸騰しているやかんと同じ)。
何かの力(重力)で閉じこめている。



X線イメージ

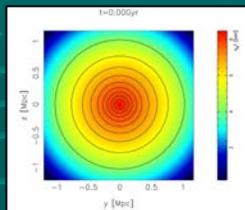
高温のガスを閉じこめるには
強い重力が必要→大量の質量が必要

X線観測データを使った質量評価

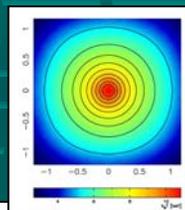
- シミュレーション中の銀河団をある方向から“観測”したとしてX線表面輝度mapおよび温度mapを作成。
- X線分布の重心を中心とした、X線表面輝度プロファイル $I_x(R)$ 、温度プロファイル $T(R)$ を作成。
- $I_x(R)$ をdeprojectionして密度プロファイル $\rho(r)$ を作成
- 密度および温度プロファイルを β モデル(またはダブル β モデル)でfit
- 静水圧平衡を仮定して質量プロファイルを計算

$$M_r = -\frac{k_B T_g r}{G \mu m_p} \left(\frac{d \ln \rho_g}{d \ln r} + \frac{d \ln T_g}{d \ln r} \right)$$

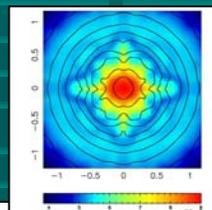
X線データでの質量評価：結果1



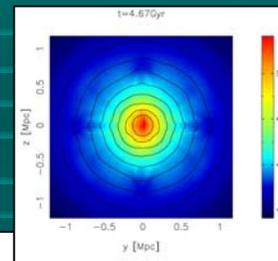
t=0.0, parallel



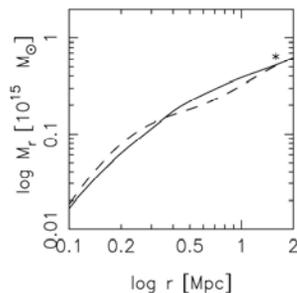
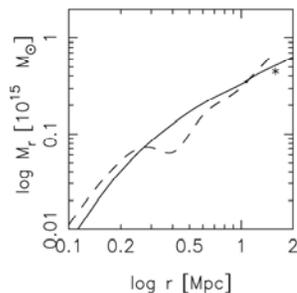
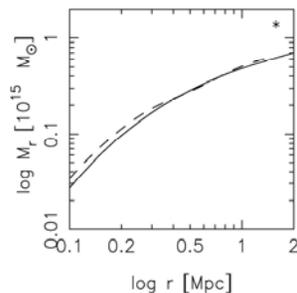
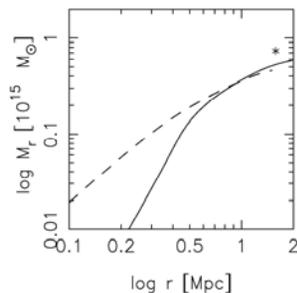
t=1.33, parallel



t=3.67, parallel



衝突軸方向
から



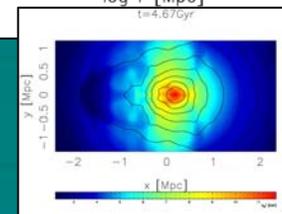
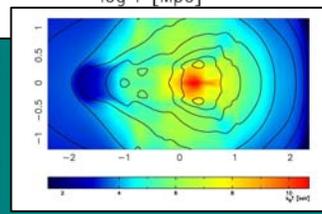
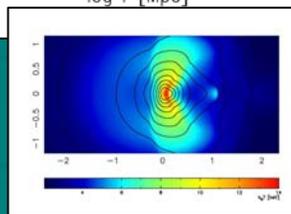
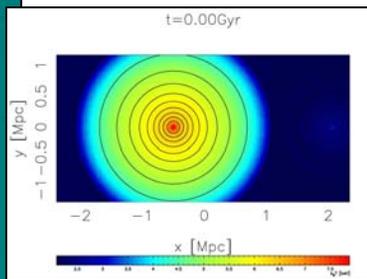
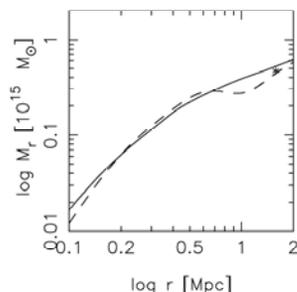
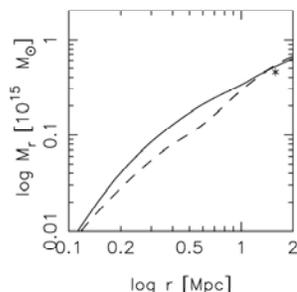
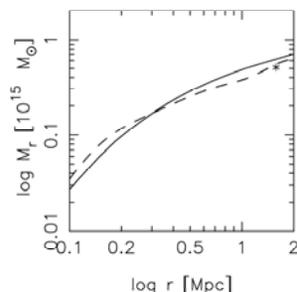
実線: M_{real}
点線: M_X 星印: M_{virial}

軸に垂直な
方向から

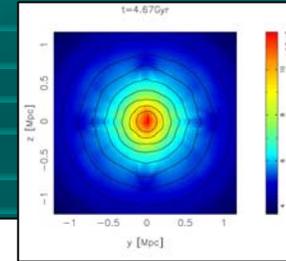
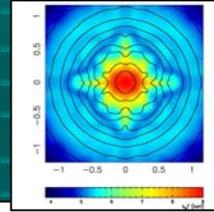
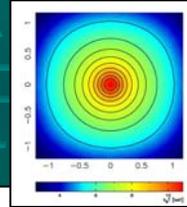
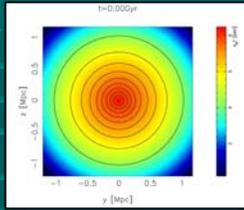
t=1.33, vertical

t=3.67, vertical

t=4.67, vertical



X線データでの質量評価：結果2

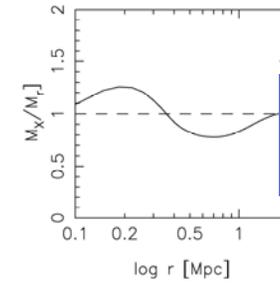
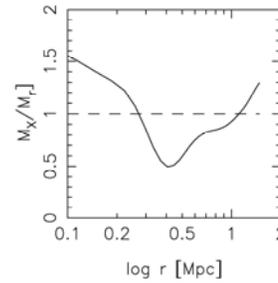
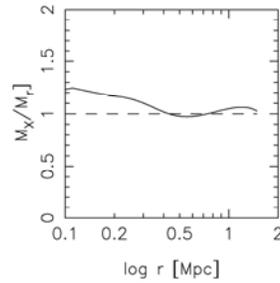
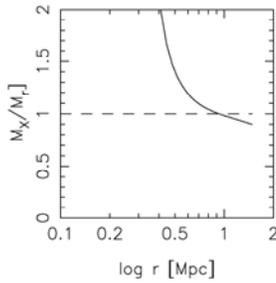


t=0.0, parallel

t=1.33, parallel

t=3.67, parallel

t=4.67Gyr



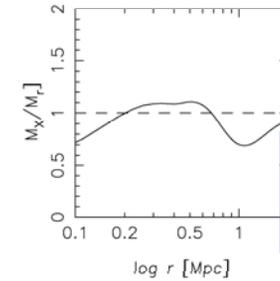
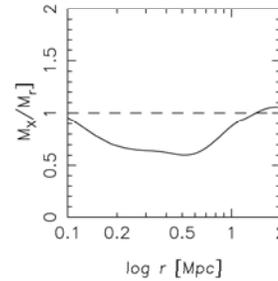
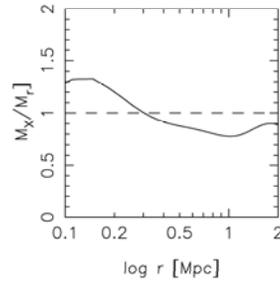
衝突軸方向
から

実線: M_X / M_{real}

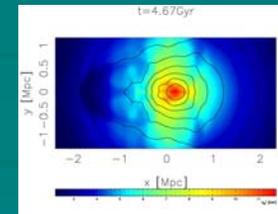
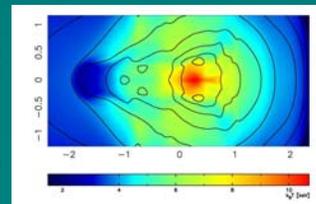
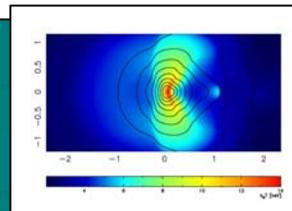
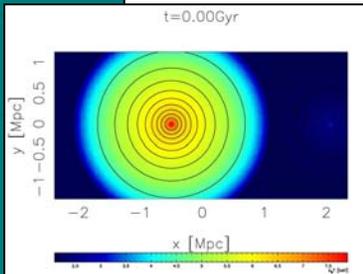
t=1.33, vertical

t=3.67, vertical

t=4.67, vertical



軸に垂直な
方向から



表面密度で比較

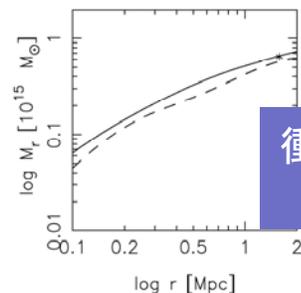
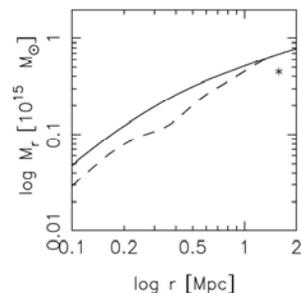
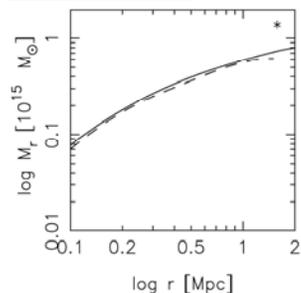
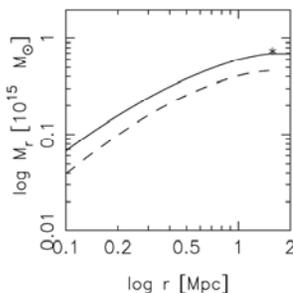
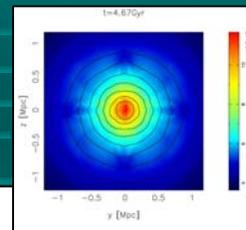
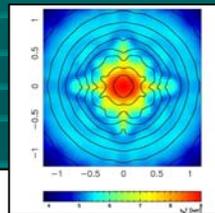
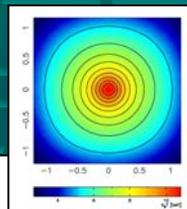
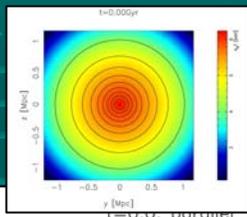
重力レンズで直接求まるのは表面質量密度
「 $M(r)$ 半径 r の球に含まれる質量」よりはむしろ
「 $M_{\text{prj}}(R)$ 半径 R の円筒内に含まれる質量」

X線データで求めた $M(r)$ を $M_{\text{prj}}(R)$ に変換
これを対応する「本当の質量」と比較
擬似的に重力レンズデータと比較しているつもり

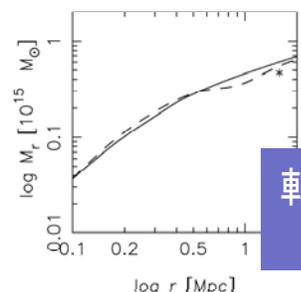
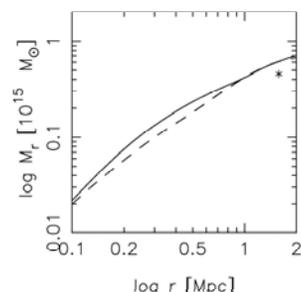
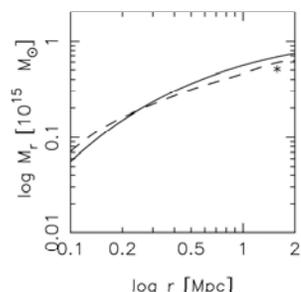
$$M_{\text{prj}}(R) = \int_0^R 2\pi R' \Sigma(R') dR',$$
$$\Sigma(R) = 2 \int_0^{b_{\text{out}}} \rho(\sqrt{R^2 + b^2}) db,$$

$$\rho(r) = \frac{1}{4\pi r^2} \frac{dM}{dr}.$$

X線データでの質量評価：投影質量1

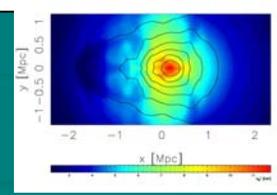
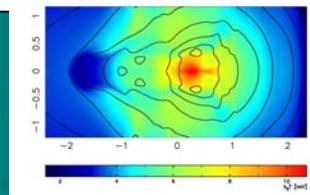
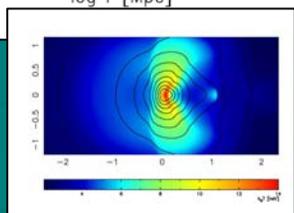
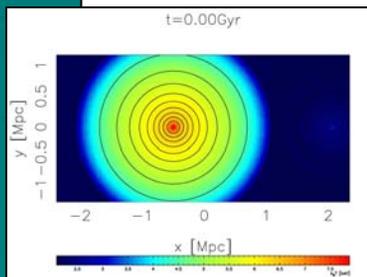


衝突軸方向
から

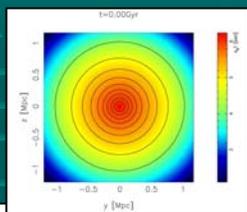


軸に垂直な
方向から

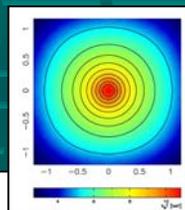
実線: M_{real}
点線: M_X 星印: M_{virial}



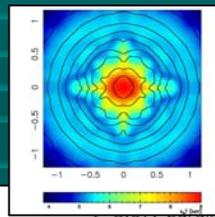
X線データでの質量評価：投影質量2



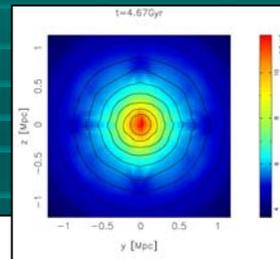
t=0.0, parallel



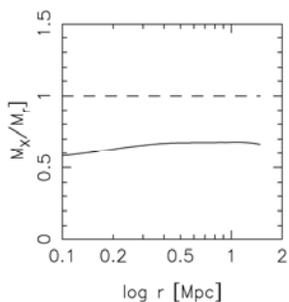
t=1.33, parallel



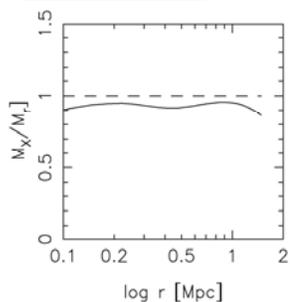
t=3.67, parallel



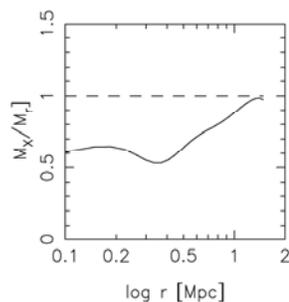
t=4.67, parallel



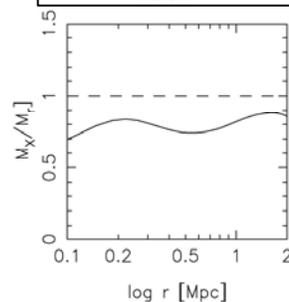
log r [Mpc]



log r [Mpc]



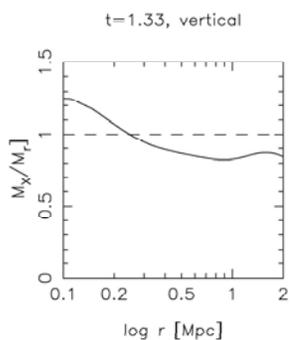
log r [Mpc]



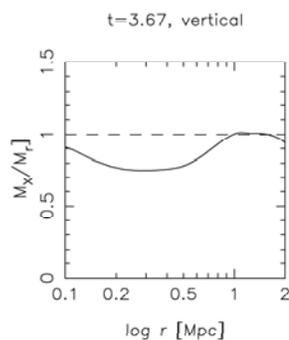
log r [Mpc]

衝突軸方向
から

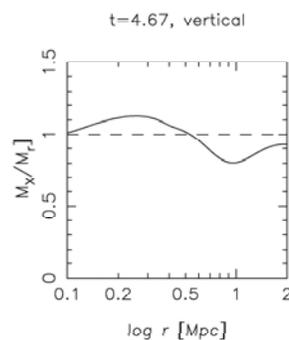
実線: M_X / M_{real}



log r [Mpc]

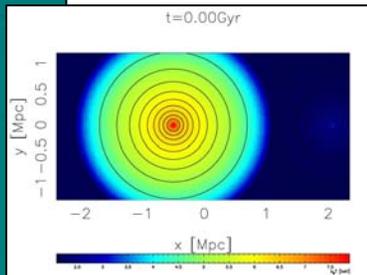


log r [Mpc]

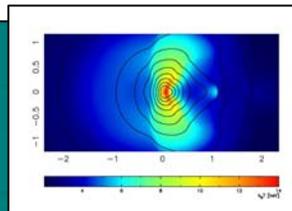


log r [Mpc]

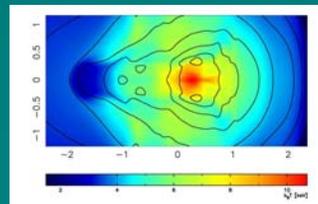
軸に垂直な
方向から



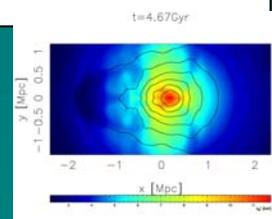
t=0.00Gyr



t=1.33Gyr



t=3.67Gyr



t=4.67Gyr

まとめ

- 銀河団の質量の決定には複数の方法があるが、必ずしもコンシステントな結果が得られていない場合がある。
- シミュレーションデータを用いて質量決定の不定性を評価した。
- ヴィリアル定理を用いた質量評価
 - 4:1衝突の場合で最大で2倍近い過大評価。
 - 観測方向による違い大(速度分布の非等方性がきいている)。
- X線データを用いた質量評価
 - ヴィリアル定理を用いた場合よりは誤差は小さい。
 - 観測方向による違いも小さめ(圧力は当方的、非等法な温度むらはならされるから)。
 - 温度むらはやはり誤差のよい指標である。
 - 衝突軸方向から見た場合、projected massは過小評価する傾向(cf. 重力レンズ)
- 重力レンズとの比較もやってみたい。