

# N体＋流体シミュレーションでさぐる 衝突銀河団の質量決定の不定性

滝沢元和<sup>1</sup>、薙野綾<sup>2</sup>、松下恭子<sup>2</sup>  
(<sup>1</sup>山形大、<sup>2</sup>東京理科大)

先駆的科学計算に関するフォーラム2008  
～天文科学～  
(2008年7月21--22日) @九州大学

# Introduction

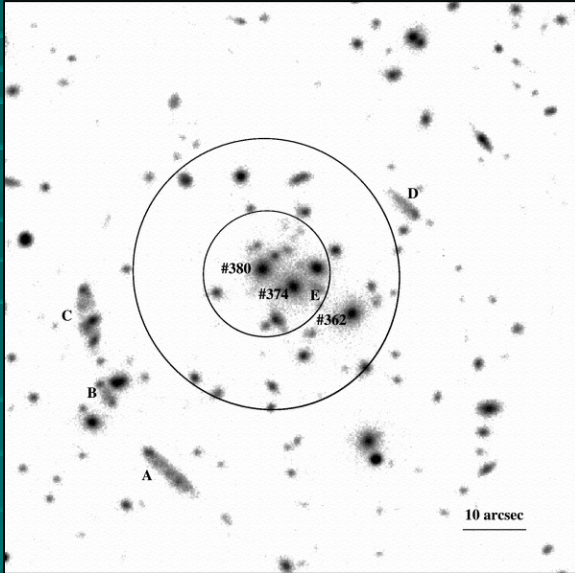
## (天文学における数値シミュレーション)

- (普通は)理論と実験
- 天文現象を地球上の実験室で再現することは困難 (ほとんど不可能)
  - 長さ、時間などの尺度が全然違う
  - 再現困難な極限状態 (超高温、超高压、強重力、超希薄)
- コンピューター上でシミュレーションする
  - なにがおき(てい)るのか？
  - どう観測されるのか？
  - (簡単な)理論モデルと観測の比較はどれくらい意味があるか？

# 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)、 $M_{\text{lens}}$  (軸対称etc)、 $M_{\text{virial}}$  (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?

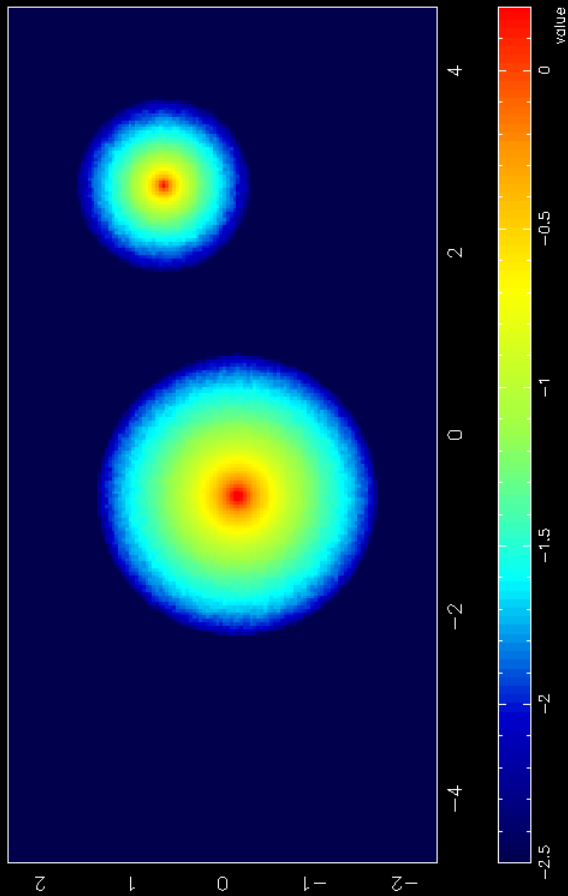
● N体+流体のシミュレーションデータを用いて、「質量評価のシミュレーション」をおこない、本当の質量と比べてみる。

# Simulation Data (N体+流体)

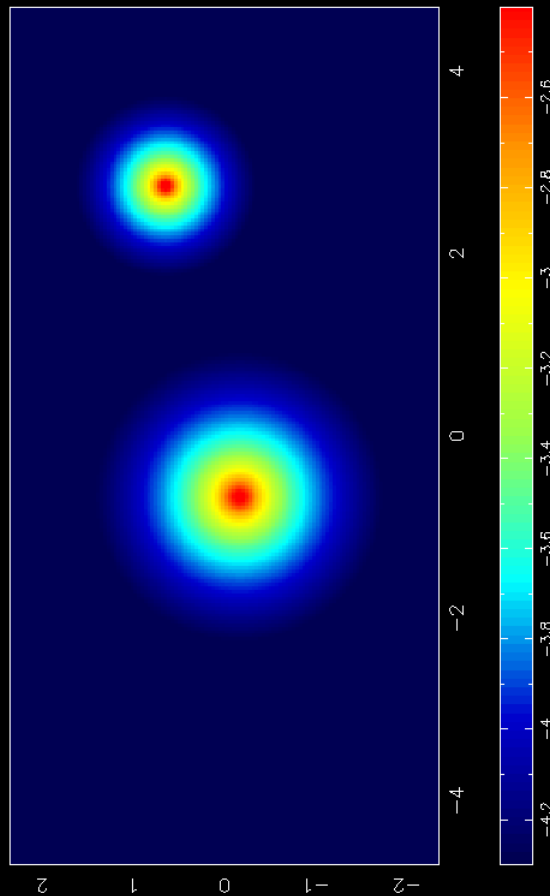
- N体計算: Particle Mesh(PM)法
- 自己重力: FFT with isolated boundary conditions
- 流体計算: Roe TVD法
  - 境界条件: zero gradient boundary conditions (ただしoutflowのみを許す)
- 格子数  $256 \times 128 \times 128$
- 粒子数  $256 \times 128 \times 128 (\doteq 4.2 \times 10^6)$
- VPP5000@国立天文台

# Movies (質量比1:4, $\lambda = 0.05$ )

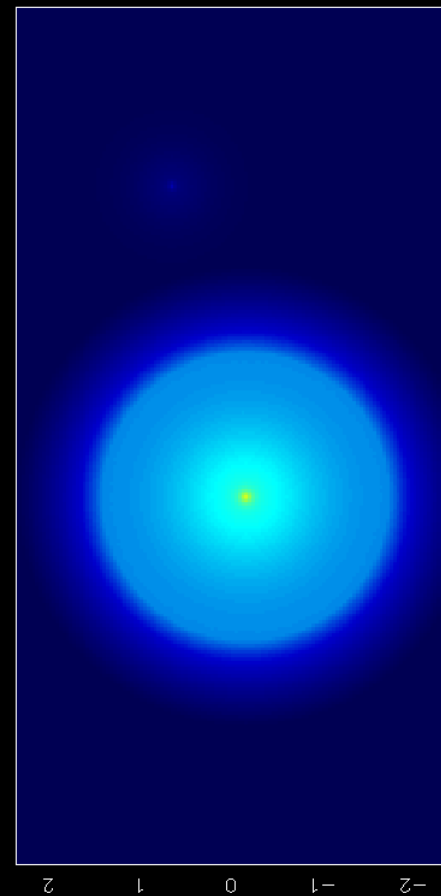
質量分布



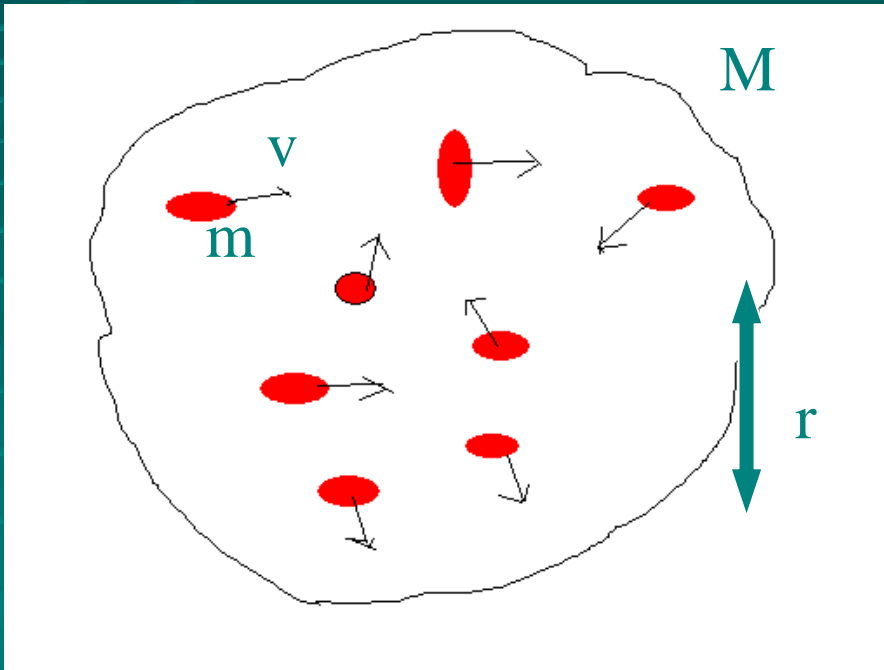
ガス密度分布



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 $N_{\text{samp}}$ 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  
 $\sigma_{\text{los}}$ : 視線方向の速度分散

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

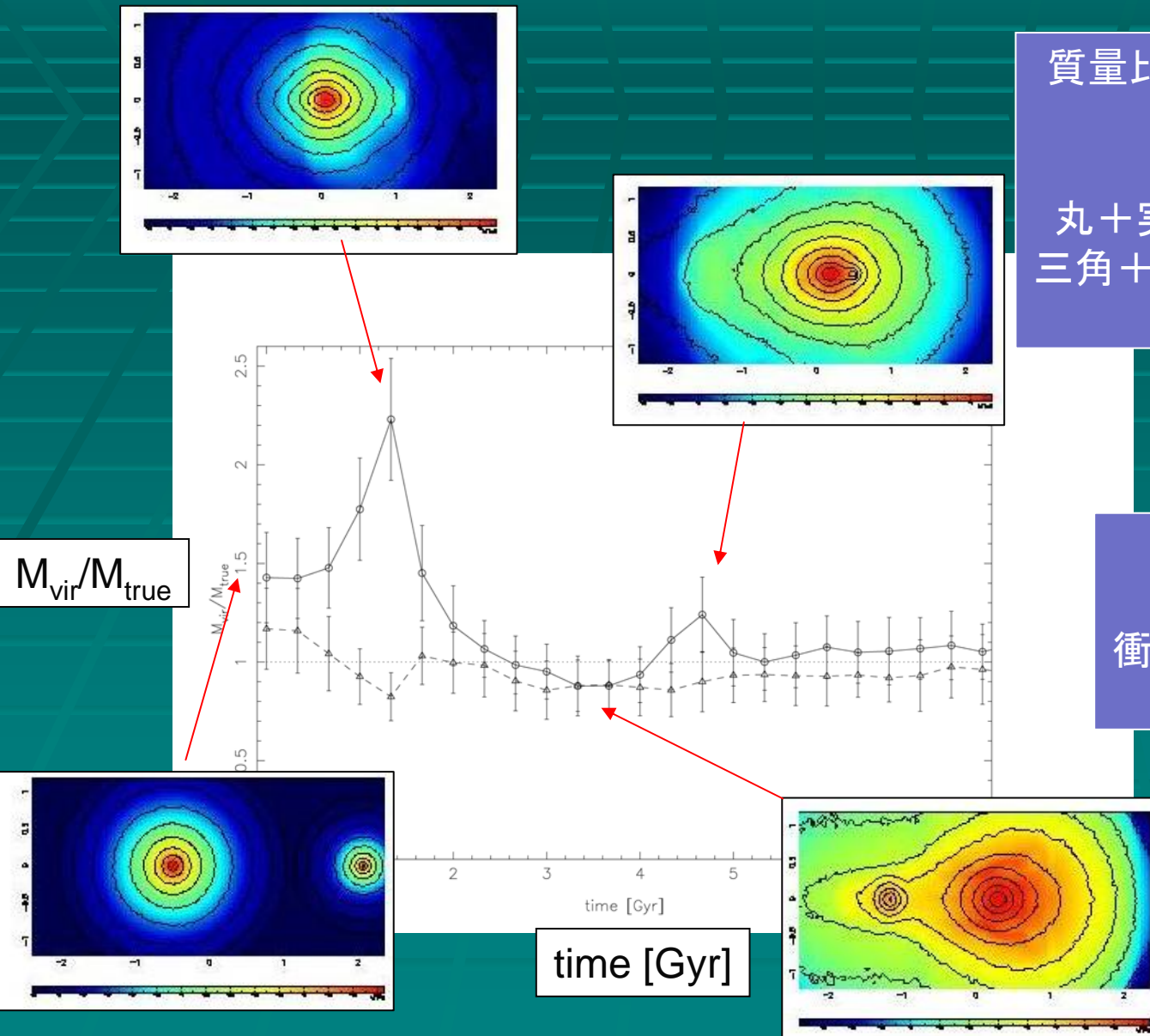


# Virial定理を用いた場合：結果

質量比1:4のmerger simulation  
で、 $M_{\text{vir}}$ と $M_{\text{true}}$ 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

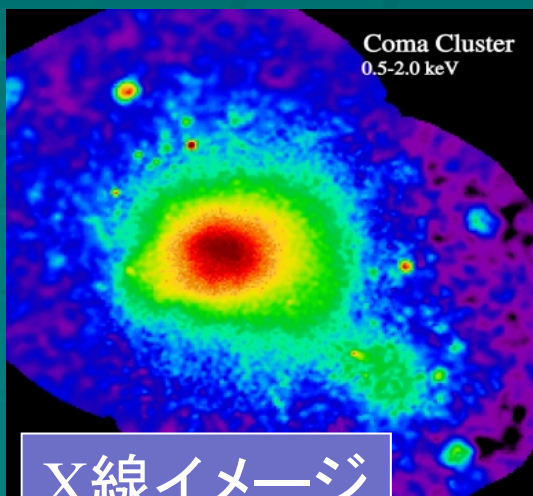


# 質量をはかる別のやり方： 高温ガスを使う



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。



X線イメージ

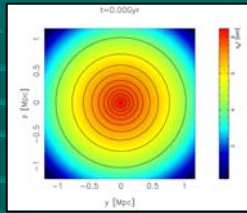
高温のガスを閉じこめるには  
重力が必要→質量が必要

# X線観測データを使った質量評価

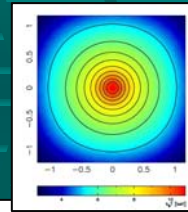
- シミュレーション中の銀河団をある方向から“観測”したとしてX線表面輝度mapおよび温度mapを作成。
- X線分布の重心を中心とした、X線表面輝度プロファイル $I_x(R)$ 、温度プロファイル $T(R)$ を作成。
- $I_x(R)$ をdeprojectionして密度プロファイル $\rho(r)$ を作成
- 密度および温度プロファイルを $\beta$ モデル(またはダブル $\beta$ モデル)でfit
- 静水圧平衡を仮定して質量プロファイルを計算

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

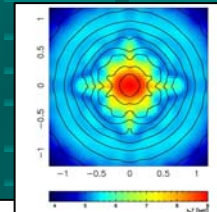
# X線データでの質量評価：結果1



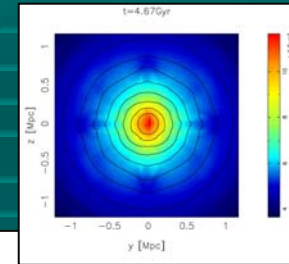
t=0.0, parallel



t=1.33, parallel

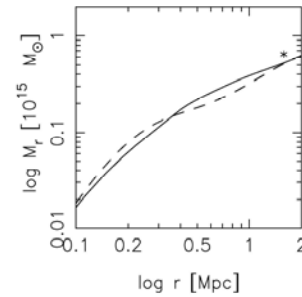
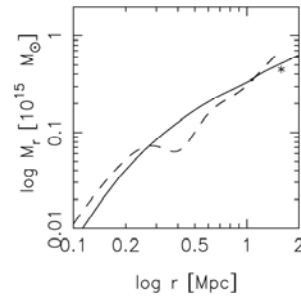
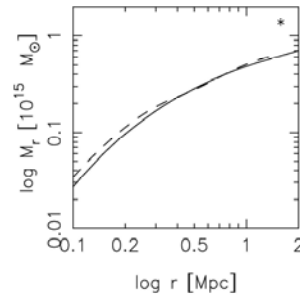
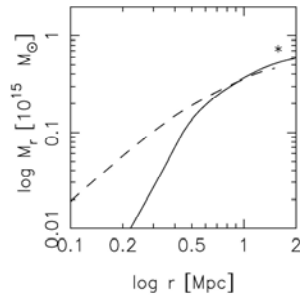


t=3.67, parallel



t=4.67, parallel

衝突軸方向  
から



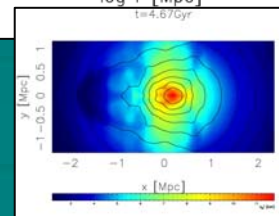
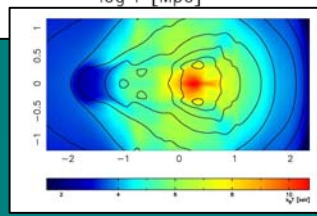
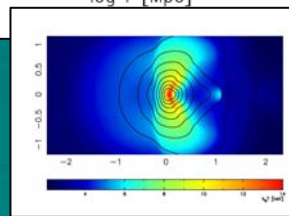
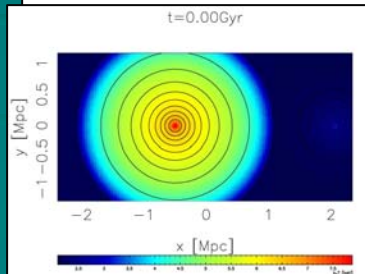
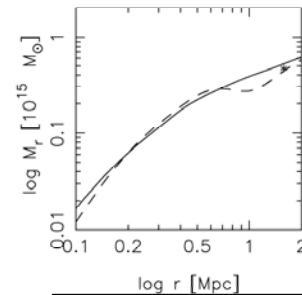
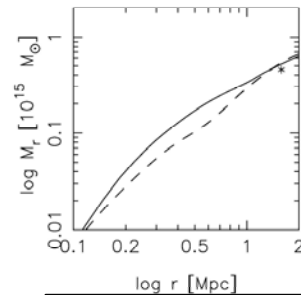
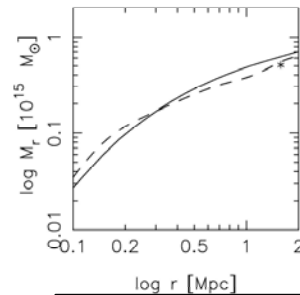
t=1.33, vertical

t=3.67, vertical

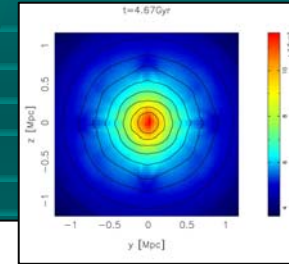
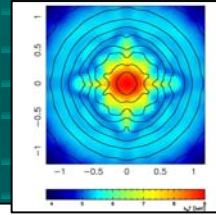
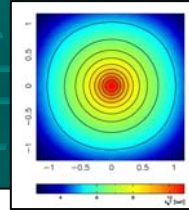
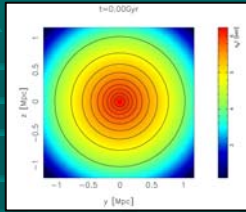
t=4.67, vertical

軸に垂直な  
方向から

実線:  $M_{\text{real}}$   
点線:  $M_X$  星印:  $M_{\text{virial}}$



# X線データでの質量評価：結果2

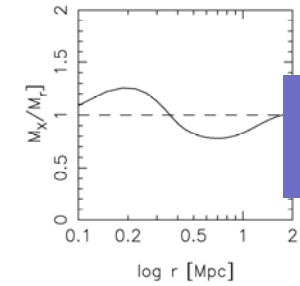
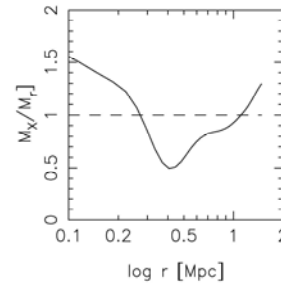
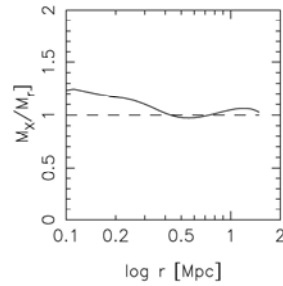
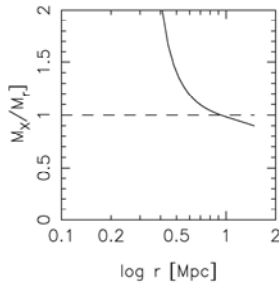


t=0.0, parallel

t=1.33, parallel

t=3.67, parallel

t=4.67Gyr



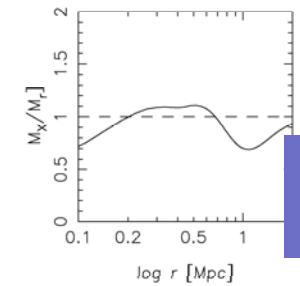
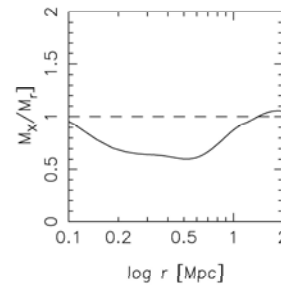
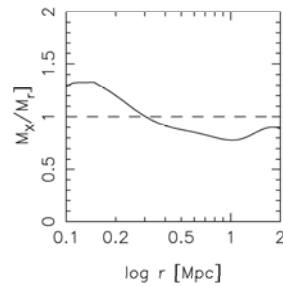
衝突軸方向  
から

実線:  $M_X / M_{\text{real}}$

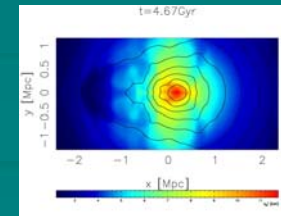
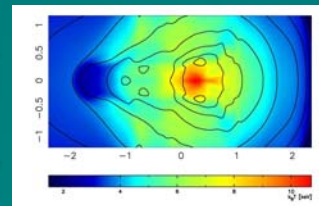
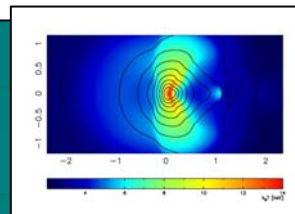
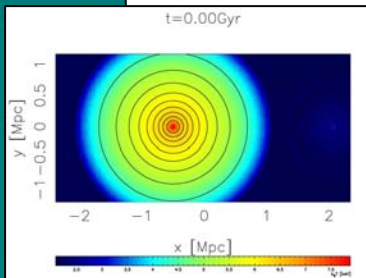
t=1.33, vertical

t=3.67, vertical

t=4.67, vertical



軸に垂直な  
方向から



# 表面密度で比較

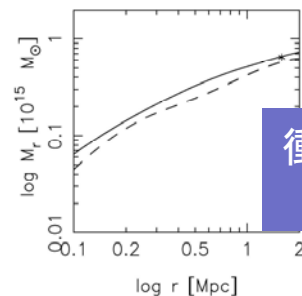
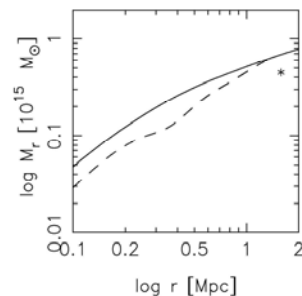
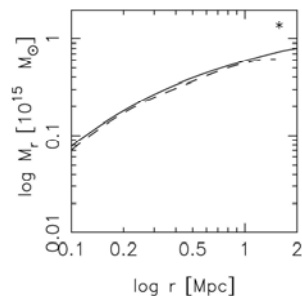
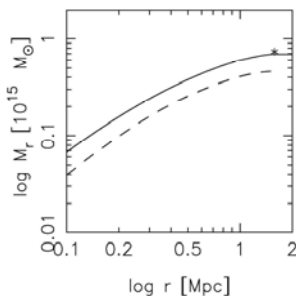
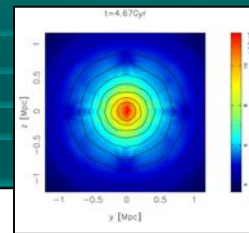
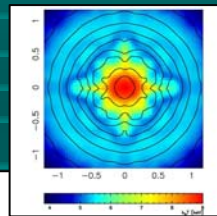
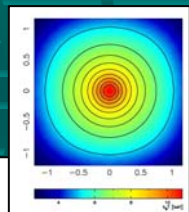
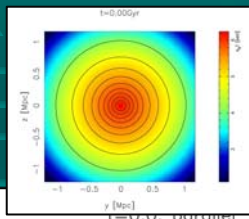
重力レンズで直接求まるのは表面質量密度  
「 $M(r)$  半径 $r$ の球に含まれる質量」よりはむしろ  
「 $M_{\text{prj}}(R)$  半径 $R$ の円筒内に含まれる質量」

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

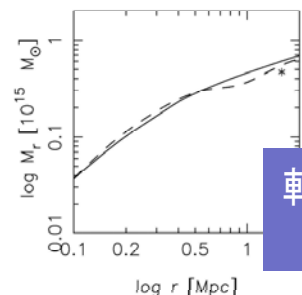
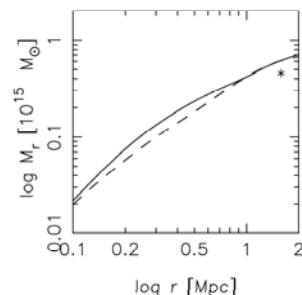
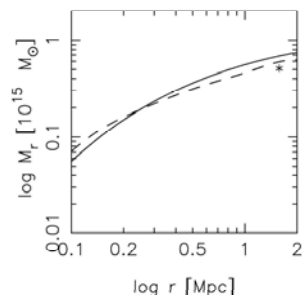
$$M_{\text{prj}}(R) = \int_0^R 2\pi R' \Sigma(R') dR',$$
$$\Sigma(R) = 2 \int_0^{b_{\text{out}}} \rho(\sqrt{R^2 + b^2}) db,$$

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

# X線データでの質量評価：投影質量1

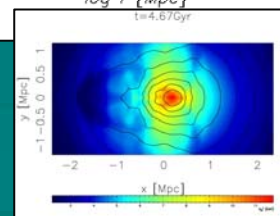
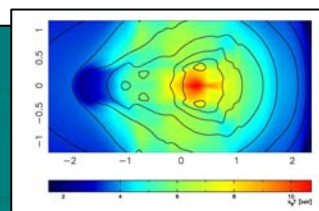
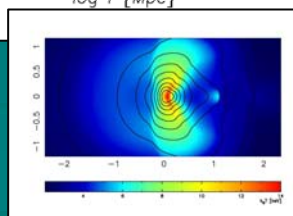
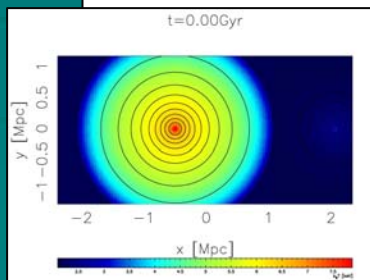


衝突軸方向  
から

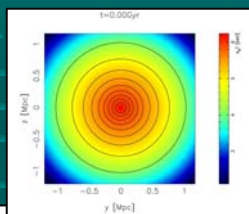


軸に垂直な  
方向から

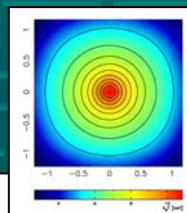
実線:  $M_{\text{real}}$   
点線:  $M_X$  星印:  $M_{\text{virial}}$



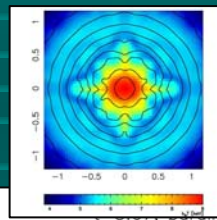
# X線データでの質量評価：投影質量2



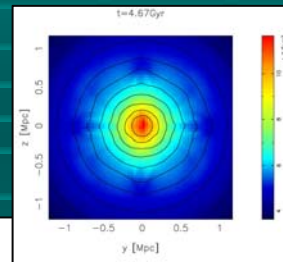
t=0.0, parallel



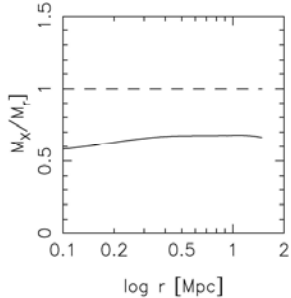
t=1.33, parallel



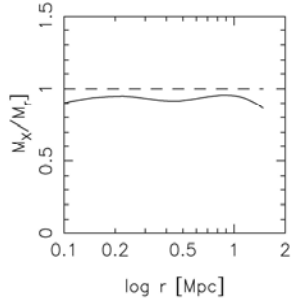
t=3.67, parallel



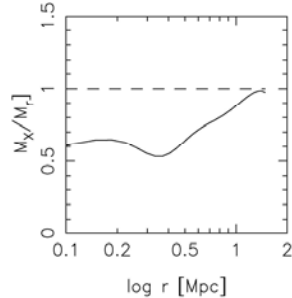
t=4.67, parallel



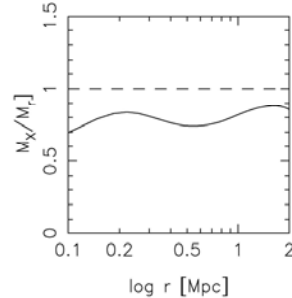
log r [Mpc]



log r [Mpc]



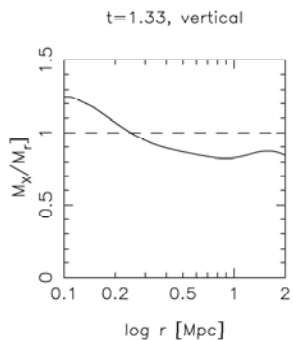
log r [Mpc]



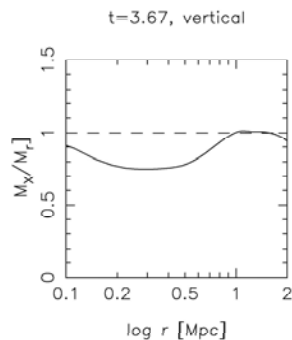
log r [Mpc]

衝突軸方向  
から

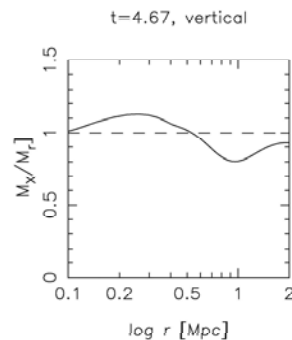
実線:  $M_X / M_{\text{real}}$



t=1.33, vertical

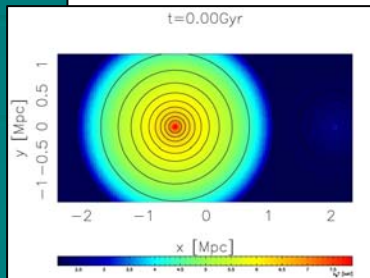


t=3.67, vertical

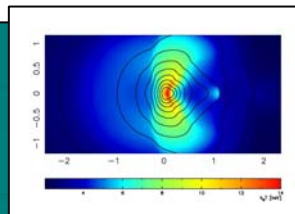


t=4.67, vertical

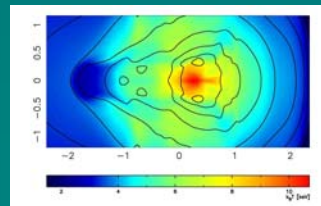
軸に垂直な  
方向から



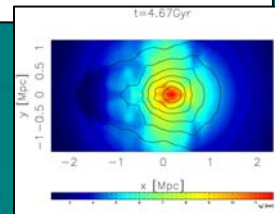
t=0.00Gyr



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。