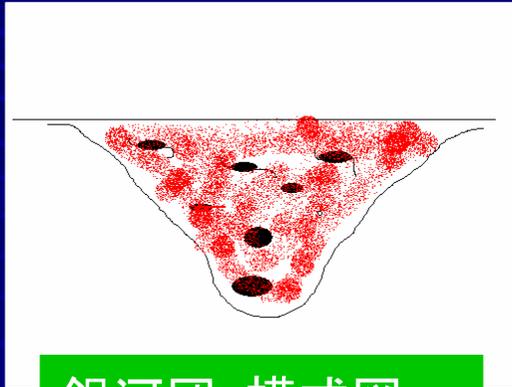


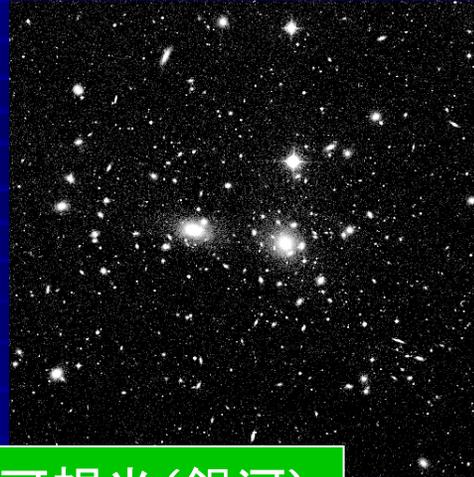
衝突銀河団の N体+流体シミュレーション

滝沢元和

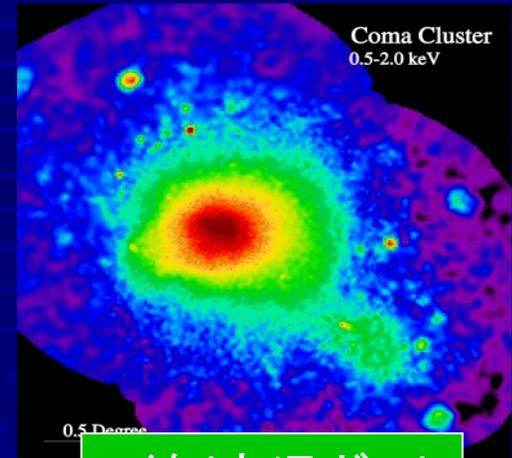
Introduction



銀河団: 模式図



可視光(銀河)



X線(高温ガス)

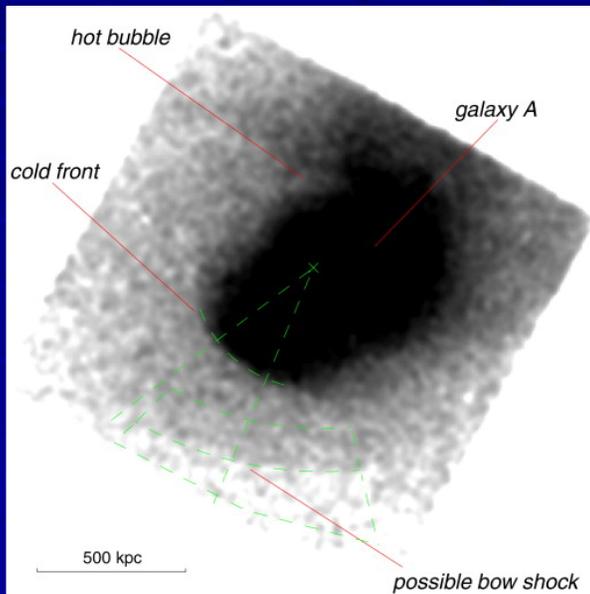
■ 銀河団

- 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) :

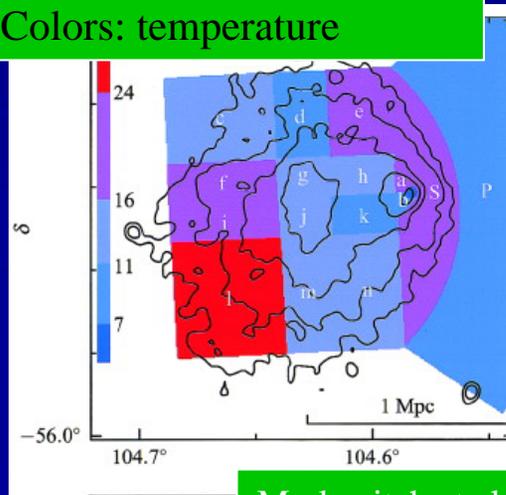
銀河団衝突の痕跡 (X線、weak lensingより)

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

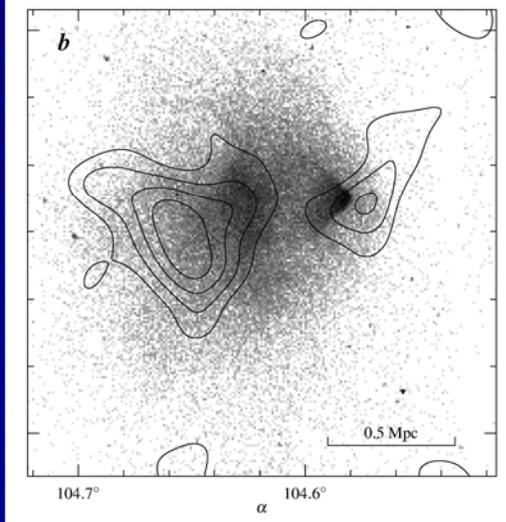


Markevitch et al. (2002)

1E 0657-56

Contours: 質量分布

Gray scale: X-ray (ガス分布)



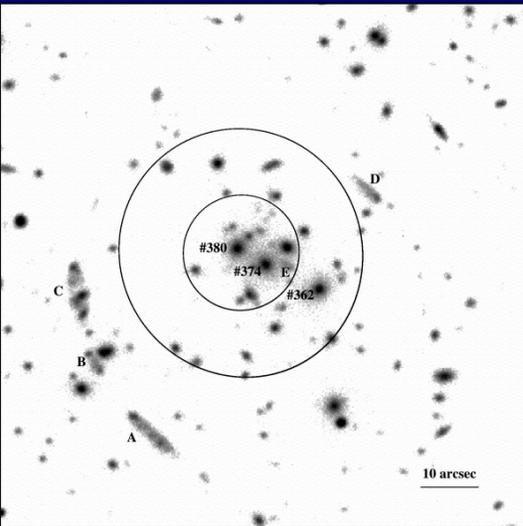
X線イメージ(グレースケール)
質量分布(等高線)
Markevitch et al. (2004)

Introduction(3):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)



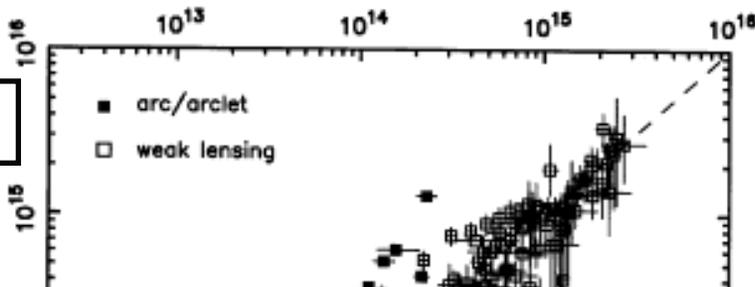
統計的に見ても (Wu et al. 1998)

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)

M_{lens}



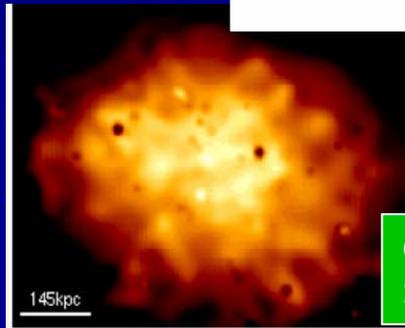
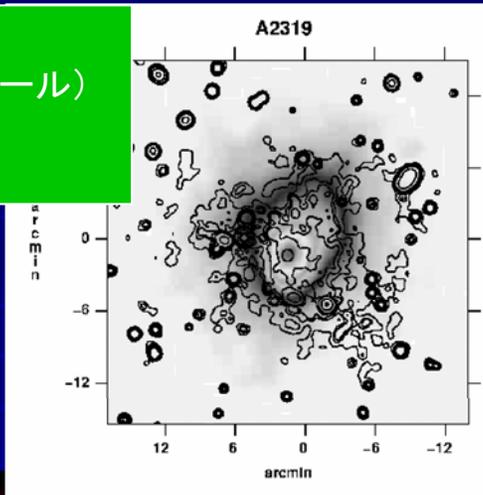
質量決定のさいにはいくつかの仮定が必要:

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(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



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

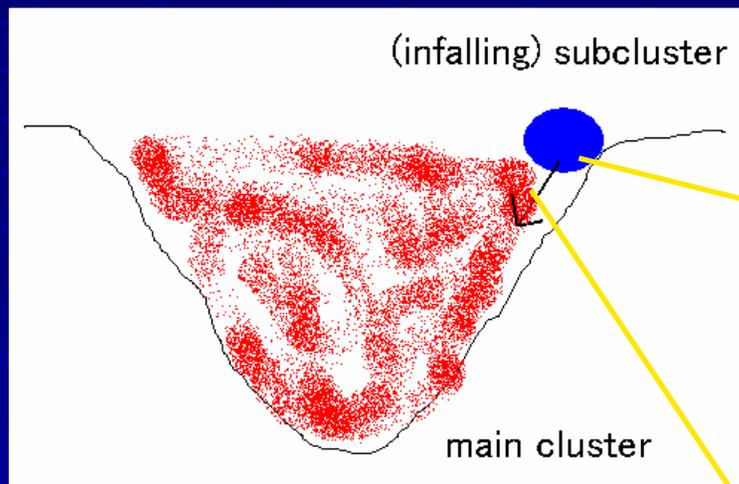
- 銀河団プラズマ中には非熱的高エネルギー電子($E_e \geq \text{GeV}$)がMpcスケールにわたって存在。
- 衝撃波
- 乱流
 - かみのけ座銀河団でのP分布
 - ダイナモによる磁場増幅
 - 磁気乱流による粒子加速
 - 次世代のX線分光では充分観測可能(NeXT)

(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。

銀河団内を運動するsubstructureの 流体simulation(今年度前半まで)

- メインクラスターの重力ポテンシャル内でのサブクラスターの運動を、サブクラスターをtest particle と近似して解く。
- 上の結果をサブクラスター前面の境界条件に反映。
- サブクラスター周囲のガスの運動を流体コード(Roe TVD法)で解く。



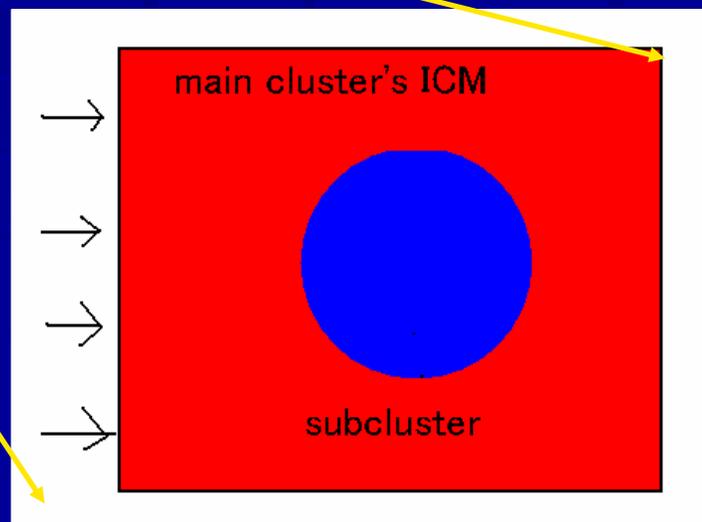
Simulation Box:

800kpc × 800kpc × 800kpc

Mesh Size:

400 × 400 × 400

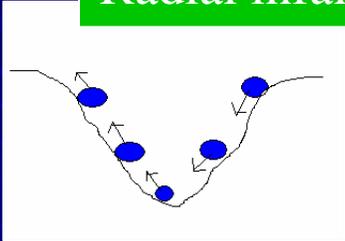
VPP5000@NAOJ



今年度前半までの成果

(Takizawa 2005 ApJ, 629, 791)

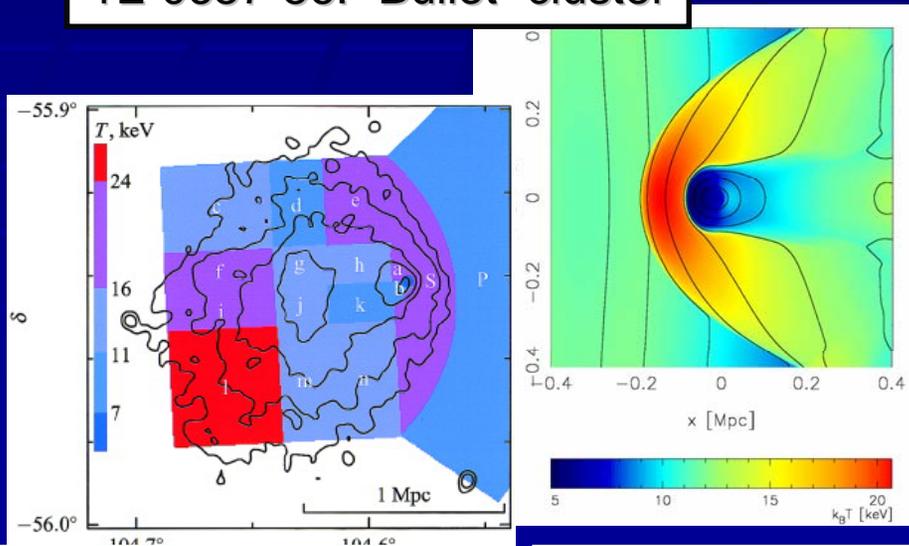
Radial infall model



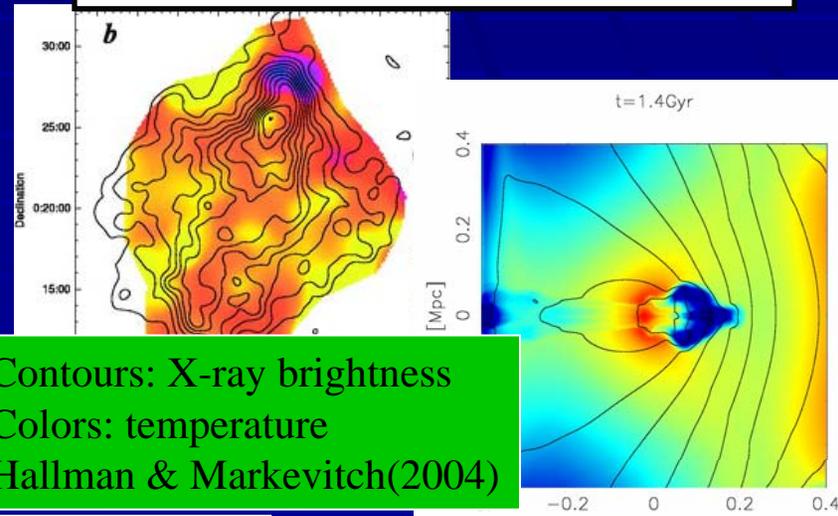
Sloshing model



1E 0657-56: "Bullet" cluster



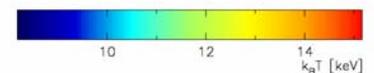
A168: Turbulence is generating through RT instability ?



Contours: X-ray brightness
Colors: temperature
Hallman & Markevitch(2004)

Contours: X-ray brightness
Colors: T : temperature
Markevitch et al. (2002)

X-ray image made from the simulation data
Contours: X-ray brightness
Colors: emissivity-weighted temperature



N体 + 流体 (今年度後半から)

- 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)

Basic Equations

暗黒物質(N体:質点系)

$$\frac{dv_i}{dt} = -\nabla\phi$$
$$\frac{dx_i}{dt} = v_i$$

銀河団ガス(圧縮性流体)

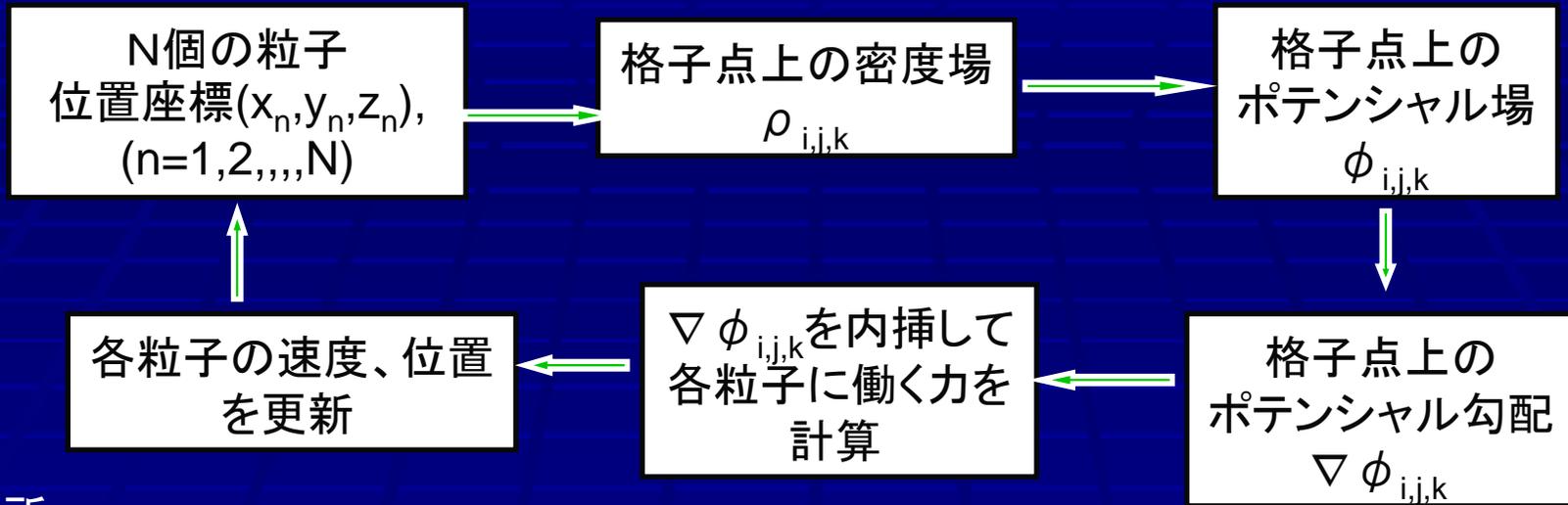
$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u_x \\ \rho u_y \\ \rho u_z \\ \rho E \end{pmatrix} + \frac{\partial}{\partial x} \begin{pmatrix} \rho u_x \\ \rho u_x^2 + P \\ \rho u_x u_y \\ \rho u_x u_z \\ \rho u_x H \end{pmatrix} + \frac{\partial}{\partial y} \begin{pmatrix} \rho u_y \\ \rho u_x u_y \\ \rho u_y^2 + P \\ \rho u_y u_z \\ \rho u_y H \end{pmatrix} + \frac{\partial}{\partial z} \begin{pmatrix} \rho u_z \\ \rho u_x u_z \\ \rho u_y u_z \\ \rho u_z^2 + P \\ \rho u_z H \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\rho \frac{\partial \phi}{\partial x} \\ -\rho \frac{\partial \phi}{\partial y} \\ -\rho \frac{\partial \phi}{\partial z} \\ -\rho \nabla \phi \cdot \mathbf{u} \end{pmatrix}$$

$E = u^2/2 + U$ (単位質量あたりの総エネルギー)
 $H = E + P/\rho$ (単位質量あたりのエンタルピー)

自己重力

$$\nabla^2 \phi = 4\pi G(\rho_{DM} + \rho_g)$$

Particle Mesh (PM)法

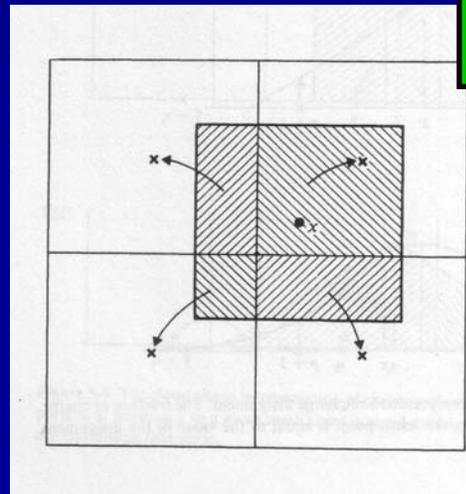


•長所

- 速い
- 流体の格子法と相性がよい

•短所

- 格子が必要
- FFTを使う場合には格子数に制限(2^n など)
- 格子間隔以下の構造を追えない



Cloud in Cell (CIC)の
概念図(二次元の場合)

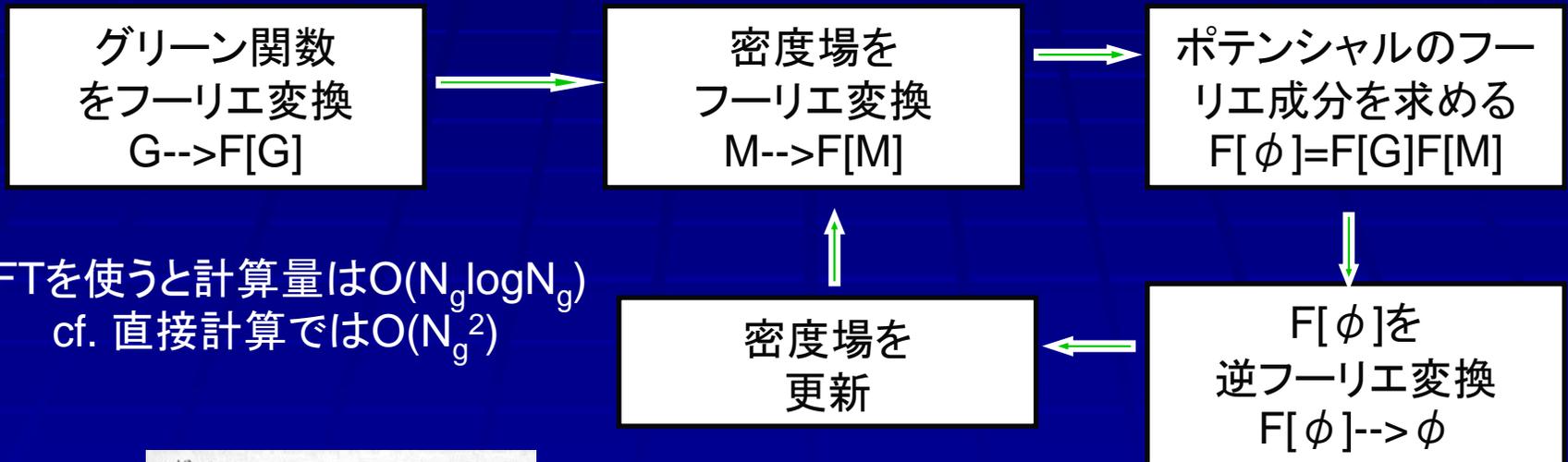
FFTでの重力ポテンシャルの求め方

• Convolution Method (二次元の例)

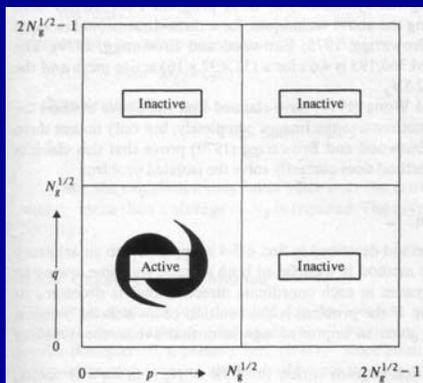
$$\phi_{p,q} = \sum \sum G_{p-p',q-q'} M_{p',q'} \quad \text{ただし、} G_{p,q} = -G\{\varepsilon^2 + p^2 + q^2\}^{-1} \text{ (グリーン関数)}$$

このとき、 $F[f]$ を f のフーリエ成分とすると、

$$F[\phi]_{k,l} = F[G]_{k,l} F[M]_{k,l} \quad \text{(Convolution theorem)}$$



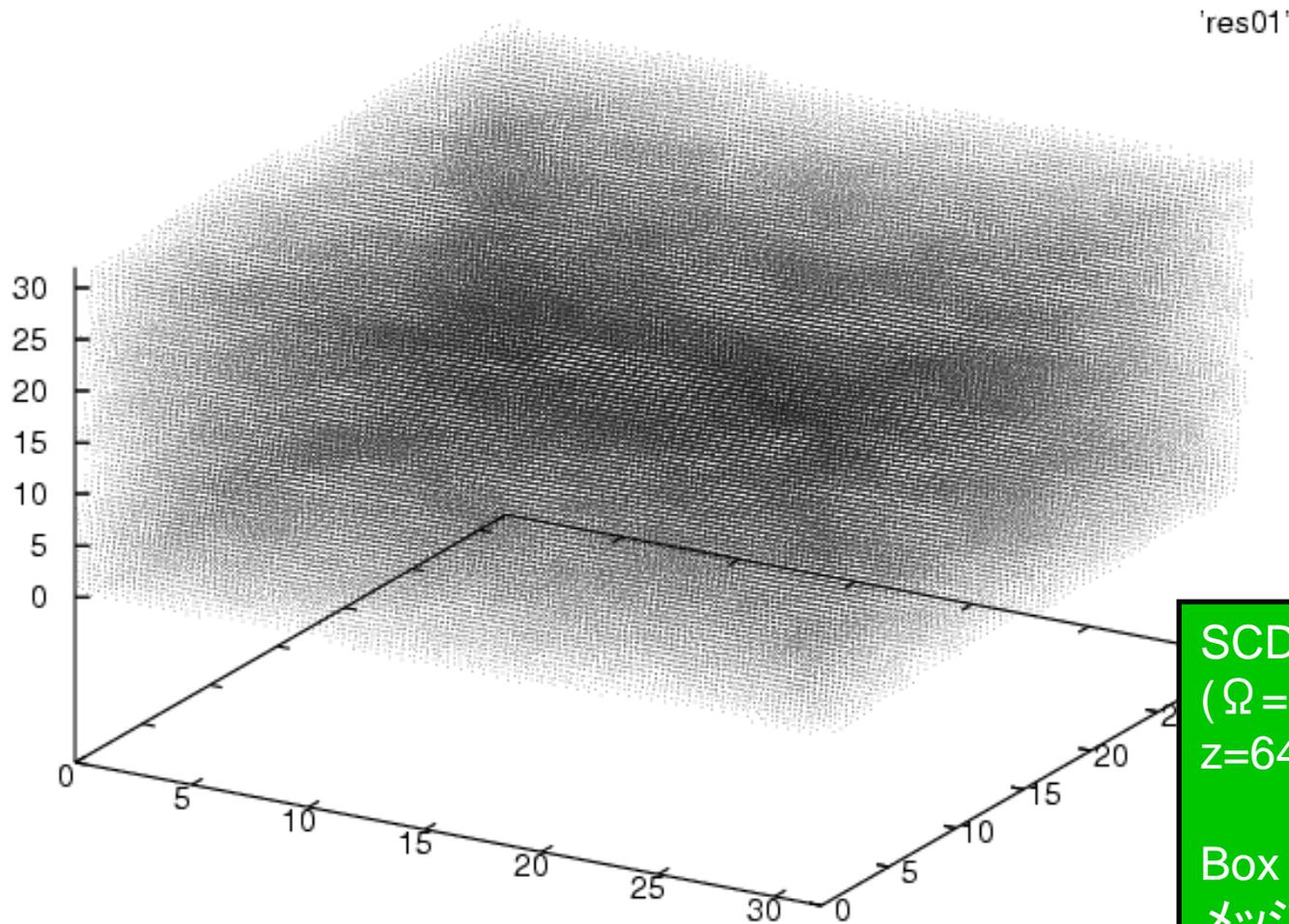
FFTを使うと計算量は $O(N_g \log N_g)$
cf. 直接計算では $O(N_g^2)$



• 孤立系での求め方

- 各次元毎に格子数を2倍し、広げた領域では質量ゼロとする。
- 全体が周期的だとして計算すると”Active”領域では $\phi_\infty = 0$ の解と同じになる。

PM法の計算例： Cosmological N-body Simulations



SCDM
($\Omega = 1.0, \Lambda = 0.0$)
 $z = 64.3 \sim 0.0$

Box size: $(32\text{Mpc})^3$
メッシュ数: $(64)^3$
粒子数: $(64)^3 \doteq 26\text{万}$

Virialized Cluster Model

- DMの密度分布はKingモデル、ICMの密度分布は β モデルを仮定(コア半径は共通)

DM密度分布 $\rho_{\text{DM}}(r) = \rho_{\text{DM},0} \left\{ 1 + \left(\frac{r}{r_c} \right)^2 \right\}^{-\frac{3}{2}}$

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

- $r_{\text{out}} \geq 15r_c$ 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。

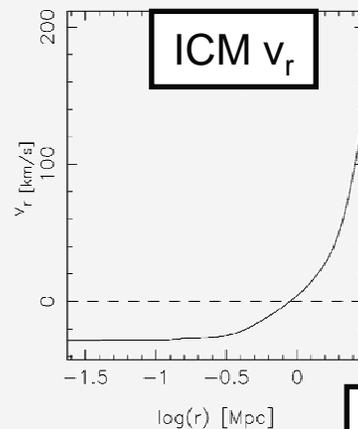
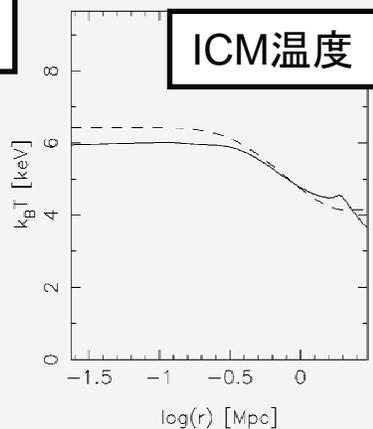
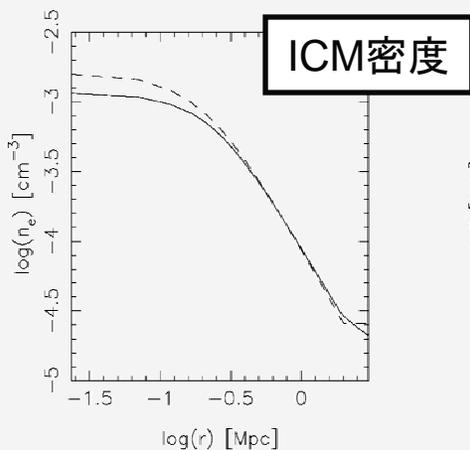
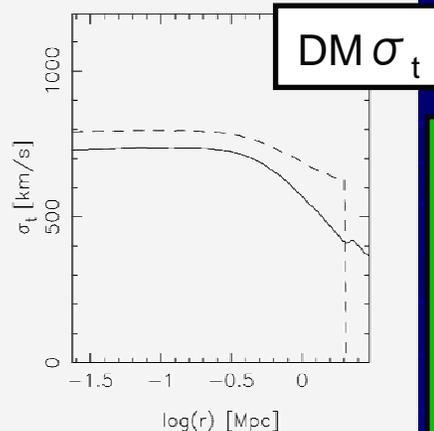
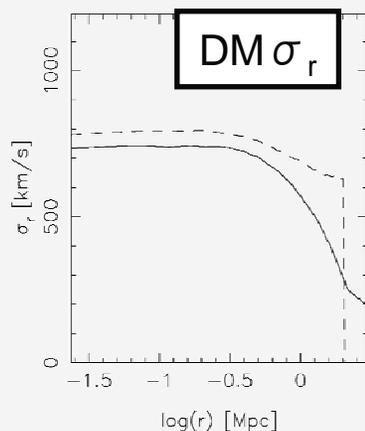
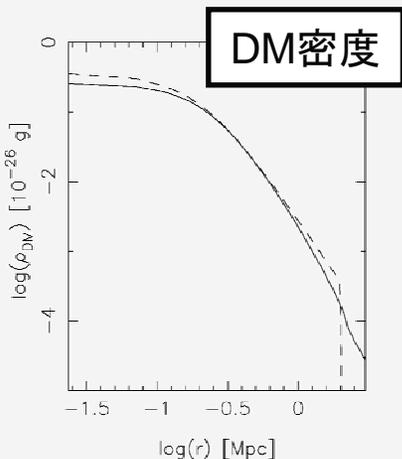
$$\frac{dP}{dr} = -\frac{GM_r}{r^2} \rho_g$$

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 $M_{\text{gas}} / (M_{\text{gas}} + M_{\text{DM}}) = 0.1$

Virialized Cluster Modelのテスト



計算領域: $(6\text{Mpc})^3$
格子数: $(128)^3$
粒子数: $(128)^3 \approx 200\text{万}$

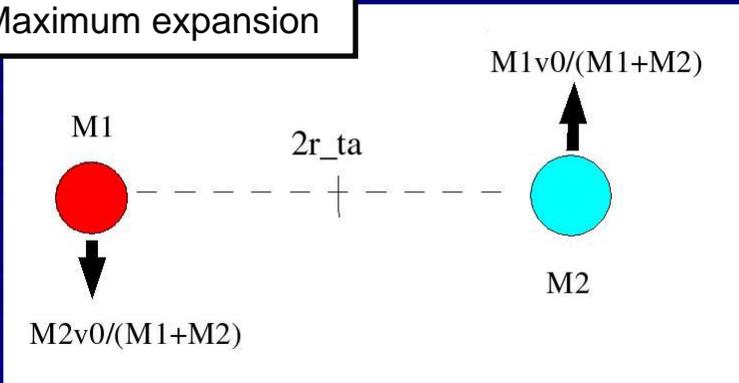
Cluster model:
 $M_{DM} = 5.0 \times 10^{14}$ solar mass
 $r_c = 200\text{kpc}$
 $\beta = 0.6$

$t=0 \sim 5$ Gyrまで計算

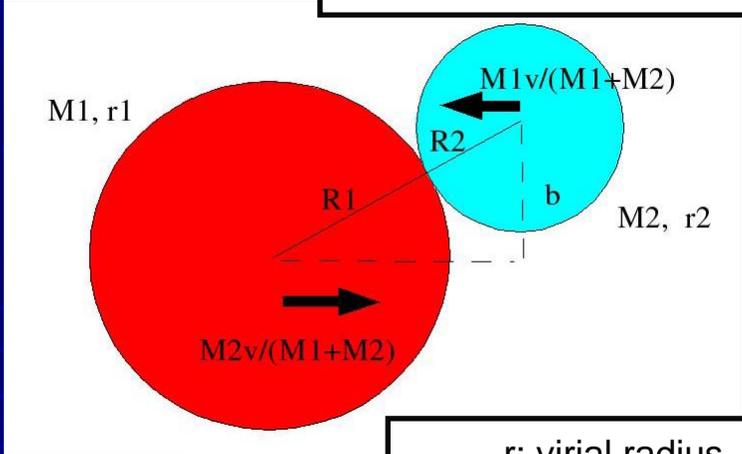
点線: $t=0$ Gyr
実線: $t=5$ Gyr

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

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

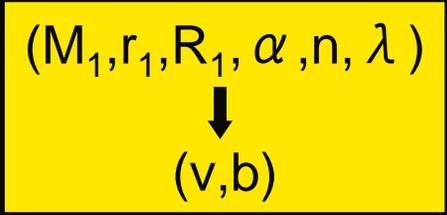
$$2Mv_0r_{ta} = Mvb$$

r: virial radius
R: outer boundary radius

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

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

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



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

1:4 Merger

- Larger cluster
 $r_c=200$ kpc, $r_{out}=3$ Mpc, $\beta=0.6$,
 $M=5.0 \times 10^{14}$ solar mass
- Smaller cluster
 $r_c=100$ kpc, $r_{out}=1.5$ Mpc $\beta=0.6$,
 $M=1.25 \times 10^{14}$ solar mass

$R \propto M^{0.5}$ のスケーリング則 ($P(k) \propto k^{-2}$ 擬似的に表現)

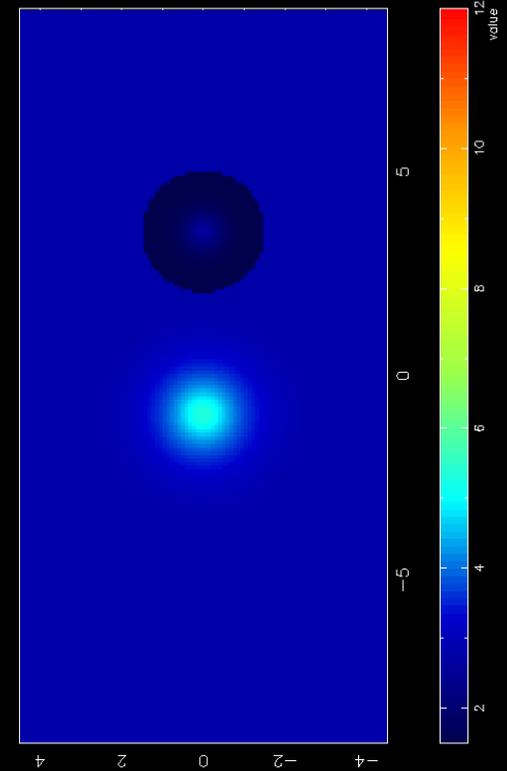
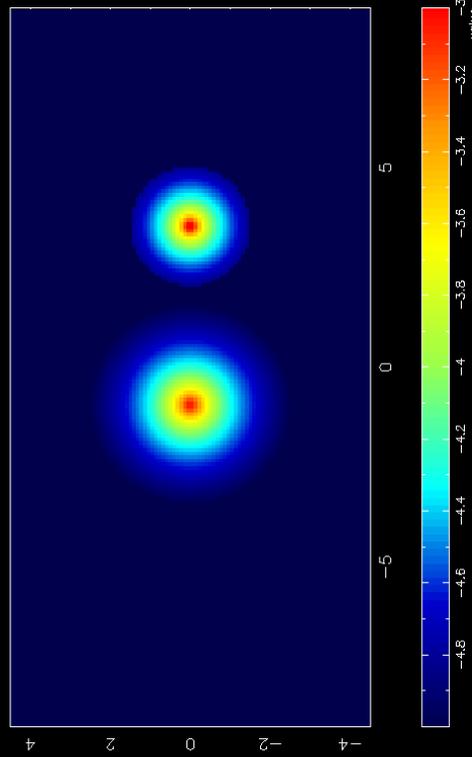
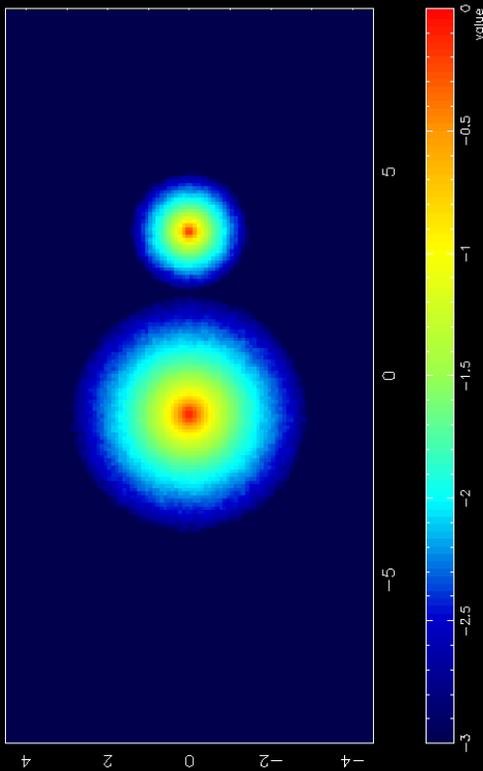
- Simulation Box
 - 18Mpc \times 9Mpc \times 9Mpc (200 \times 100 \times 100)
 - 粒子数 $N=200$ 万
- $t=0$ で両clusterは互いに接している状態。 $t=12$ Gyr まで計算。

1:4 Head-on Merger

DMの面密度
(視線方向に積分)

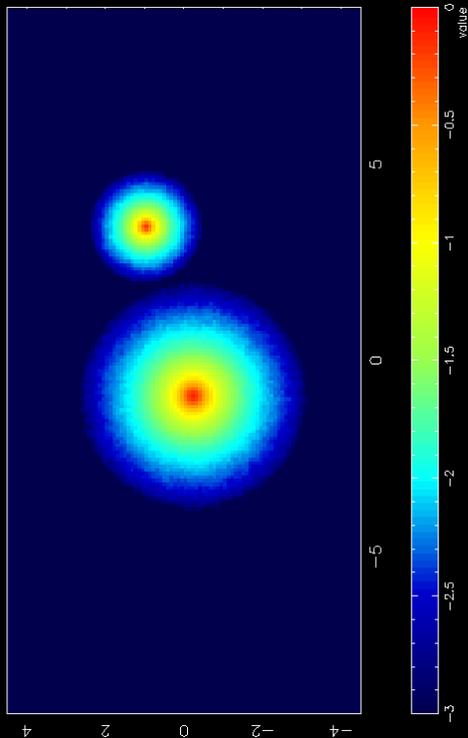
ガス密度(中心面で)

ガス温度(中心面で)

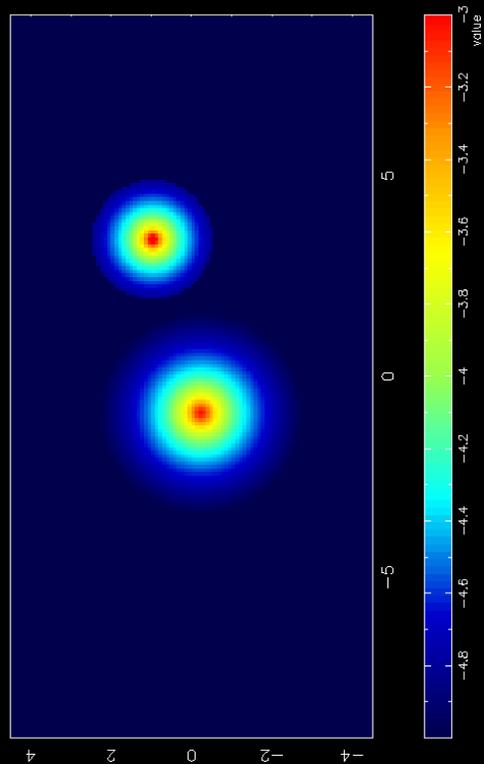


1:4 Off-center Merger: $\lambda = (J|E|^{0.5}/GM^{2.5})=0.05$

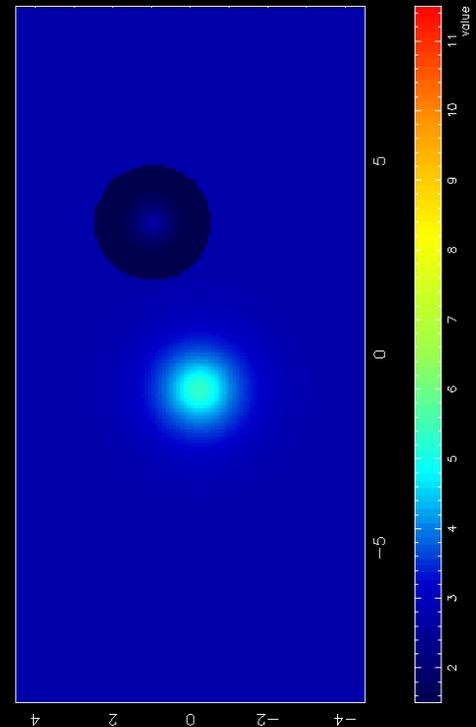
DMの面密度
(視線方向に積分)



ガス密度(中心面で)



ガス温度(中心面で)



N-body+hydro Merger(まとめ)

- 小銀河団のダークハローは生き残って、銀河団ポテンシャル中を減衰振動(スロッシング)しながら小さくなっていく。
- スロッシングに伴って複数組の(弱い)衝撃波が外側へと伝搬していく。またKelvin-Helmholtz不安定による渦状の構造が生じる。そのスケールはサブストラクチャーのサイズ程度。
- 衝突後8Gyr後でも音速の0.3-0.5倍程度の組織的な流れがガスに残る(スロッシングによる重力ポテンシャルの変動による)。
- Off-Center な merger の場合、ガスにbulkな回転運動が残る

まとめ

- 銀河団内を運動するsubstructureの流体シミュレーションを行った(Takizawa 2005 ApJ, 629, 791).
 - 1E0657-56(バウショック+コールドフロント)、
 - A168(RT不安定性によって壊れつつあるコールドフロント)
- N体+流体コードを開発中(並列化はまだ)。銀河団衝突に適用。
 - ダークハローのスロッシングによるweak multiple shocks
 - Off-center merger によるbulk rotation
- 質量決定の不定性をシミュレーションデータを使って評価(門間くん頑張ってるね)
- Additional Physics (放射冷却、磁場、非熱的粒子のモデル化、NFW的な密度分布 etc)
- 「すざく」に提案中(A2319, Coma, Ophiuchus, A399&A401, A3667, A1914)のX線観測ともあわせて衝突銀河団の力学進化や粒子加速の謎に迫っていきたい。

Future work というか願望というか

■ 観測のより詳細な予測

- X-ray line profile (Astro-E)
- SZ map (with 北山さん)

XRSのトラブルによりpending

継続中(札幌で山田さん@東邦大が学会発表)

■ MHD

- 非並列のideal MHD 三次元
- 並列化(a few months?)、

並列化は4月に完成。完成。
diffusiveは白木さん頑張っ

■ N体と合わせたconsistentな計算

- 多分PMかな、、、(去年度中には作って、AO1の観測結果と比較してみたい)

今日お話ししたとおりだいたい完成(MHDも)。
並列化はまだ(今年度中にはなんとかかな?)

■ 自分でも観測

- A2319 (with 中澤さん@ISAS他、Co-PI:Burns@Colorado, Astro-E2)
- Coma (PI:Loewens)

XRSのトラブルによりキャンセル、、、(2)
再募集のAO1に6件(内1件はPI)アプライ中