

衝突銀河団のN体+流体シミュレーション

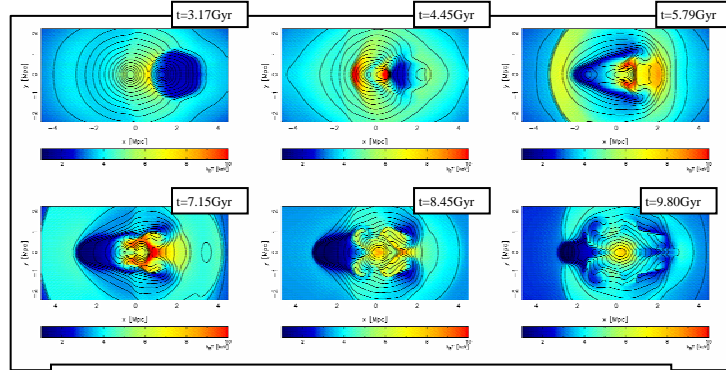
滝沢元和

山形大学理学部物理学科

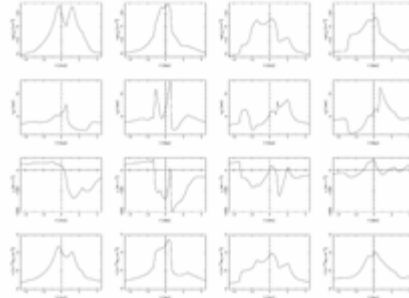
(Abstract)

衝突銀河団の力学的進化についてN体+流体シミュレーションを行って調べた。小銀河団のダークハローは、より大きな銀河団のダークハロー中で完全にはこわされずに生き残って数回振動する(いわゆるスロッピングをする)。そのため、振動に伴って複数の衝撃波の組が外側へと伝播していく。また、スロッピングによる重力ポテンシャルの変動によって複雑な渦状の流れが励起される。そのため衝突後数Gyr以上たった後でも音速の30%から、局所的には50%近い流れが残ることが判明した。さらに、スロッピングするダークハローはガスをはぎとられ、結果としてX線表面輝度分布と質量面密度分布とのあいだに有意な食い違いをもった構造が現れることもわかった。

Results for 1:4 Head-on Merger ($\lambda = 0$)



中心面での密度(等高線)と温度(カラー)の様子。
小銀河団のダークハローのスロッピングにもよって複数組の衝撃波の組が伝播し、渦状の流れが励起される。



中心軸でのガスの物理量の時間進化
上から密度、温度、速度のx成分、圧力。
左から右にそれぞれt=3.17, 4.45, 5.79, 7.15 Gyr。

Introduction

銀河団はより小さな銀河団や銀河群との衝突合体を繰り返しながら今なお成長途上にある天体である。その痕跡はガスの温度分布や密度分布、さらに近年では弱い重力レンズ効果ではかれる質量分布によっても明らかになってきている。衝突銀河団ではガス中に衝撃波や接触不連続面のような特徴的な構造がみられたり、またKelvin-Helmholtz (KH) 不安定性などによって乱流が引き起こされることが予想される。またガスと暗黒物質で質量の空間分布が異なるようなこともおきるかもしれない。このような構造をとらえるには高精度かつ高空間分解能なN体+流体計算が必要不可欠である。我々は、N体計算にPM法を、流体部分にRoe TVD法を用いたN体+流体コードを新たに作成し、これらの問題にとりかかりはじめています。

Numerical Method

- N体: Particle Mesh (PM) 法
- 流体: Roe TVD法 (空間、時間二次精度)
- 自己重力: FFT with isolated boundary conditions
- Simulation Box
 - 18Mpc × 9Mpc × 9Mpc (256 × 128 × 128)
 - 粒子数 N= 256 × 128 × 128 (約400万)

Virialized Cluster Model

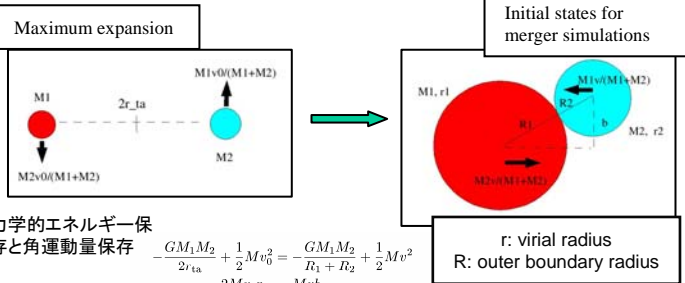
•DMの密度分布はKingモデル、ICMの密度分布は β モデルを仮定 (コア半径は共通)

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

- $r_{out} \geq 15r_c$ では $\rho_{DM}=0$ 、 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。
- ICMの温度分布は静水圧平衡の式より定める。

$$\frac{d}{dr} (\rho_{DM} \sigma^2) = -\frac{GM_r}{r^2} \rho_{DM} \quad \frac{dP}{dr} = -\frac{GM_r}{r^2} \rho_g$$

Initial Conditions for Merging Clusters



$R \propto M^{(5+n)/6}$ のスケールリング則 ($P(k) \propto k^n$) および spherical collapse model ($r_{ta} = 2r_{vir}$) を使うと、

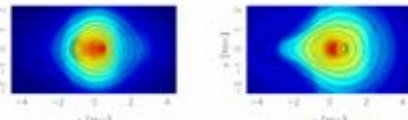
$$v^2 = \frac{2GM_1}{R_1} (1 + \alpha) \left\{ \frac{1}{1 + \alpha^{(5+n)/6}} - \frac{1}{4(1 + \alpha)^{(5+n)/6} r_1} \right\} \left\{ \frac{1}{16(1 + \alpha)^{(5+n)/3} \left(\frac{b}{r_1} \right)^2} \right\}^{-1}$$

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

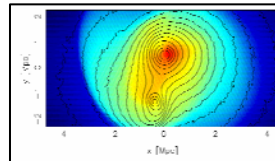
$$\lambda = \frac{J|E|^{1/2}}{G(M_1 + M_2)^{5/2}} = \frac{vb}{(GM_1 R_1)^{1/2} (1 + \alpha)^{7/2}} \left\{ \frac{1}{1 + \alpha^{(5+n)/6}} - \frac{R_1 v^2}{2GM_1 (1 + \alpha)} \right\}^{1/2}$$

今回は $n=-2$ ($R \propto M^{1/2}$) を適用 (c.f. CDMでは $n=1 \sim -2$)

X線表面輝度分布と質量面密度分布の食い違い



X線表面輝度分布(カラー)と質量面密度分布(等高線)。 $\lambda=0$ のモデルのt=4.45Gyr (左)およびt=8.00(右)。視線は衝突軸と垂直方向。小銀河団のダークハローからはガスがはぎ取られ、また衝撃波加熱の結果ガスの温度は小ダークハローのポテンシャルでは束縛できない。そのためガスとダークマターの分布に食い違いが生じる。



$\lambda=0.1$ のoff-center merger でのX線表面輝度分布(カラー)と質量面密度分布(等高線)。ガスとダークマターでelongationの方向がずれる。

Summary

- ◆ PM+Roe TVD法のN体+流体コードを用いて衝突銀河団の力学的進化を調べた。
- ◆ 小銀河団のダークハローのスロッピングにもよって、複数組の(弱い)衝撃波が外側に伝播していく。またKelvin-Helmholtz不安定性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。
- ◆ 衝突してから数Gyrたった後でも音速の0.3-0.5倍程度の組織的なガスの流れが残る。(スロッピングによる重力ポテンシャルの変動のため)
- ◆ ガスがはぎ取られたダークハローの運動に伴ってガスとダークマターの空間分布に食い違いが生じる。またoff-center merger の場合には分布のelongationの方向がずれるような構造も生じる。