

X 線銀河団の観測による fundamental plane の形成と物質密度パラメータの制限

丸橋 美香 (大阪大学大学院 理学研究科)

Abstract

本発表では、X 線で観測した銀河団のデータ (密度・半径・温度) を三次元対数空間上にプロットするとある平面 ("fundamental plane") に乗るという研究 (Fujita & Takahara 1999a, b) について紹介する。fundamental plane に乗ることは銀河団は 2 つの物理量で記述される two-parameter-family であることを示している。さらに、観測から得られる X 線光度と温度の相関はこの平面を横から見たものである。また fundamental plane 上の銀河団のデータ分布は帯状になっており、この帯の方向から現在の宇宙の密度パラメータに制限をかけることができる。実際理論モデルと比較したところ、 $\Omega < 0$ という制限をかけることができた。

1 銀河団とは

銀河団は現在の宇宙で最大の自己重力系である。十分に大きい領域が重力収縮して形成されると考えられており、内部で大規模な加熱や冷却はないとされるため、形成時の宇宙の物質密度パラメータをよく反映していると考えられている。また銀河団を満たす銀河団ガスからは、主に制動放射により X 線が放射されている。

2 "Fundamental plane" (Fujita & Takahara (1999a))

45 個の X 線銀河団の観測データ (中心付近のガス密度・コア半径・X 線温度) を三次元対数空間 ($\log \rho_0$, $\log R$, $\log T$) 上にプロットし最小二乗法により、平面

$$A \log \rho + B \log R + C \log T + D = 0 \quad (1)$$

ここで ρ, R, T はそれぞれ密度, 半径, 温度であり単位は $\text{g}/\text{cm}^2, \text{Mpc}, \text{keV}$ である。にフィッティングしたところ。板状に分布していることがわかった。[htbp]

これを "fundamental plane" と呼ぶことにする。さらに観測データは fundamental plane 上にバンドのように分布することも明らかになった。このバンドを "fundamental band" と呼ぶことにし、fundamental

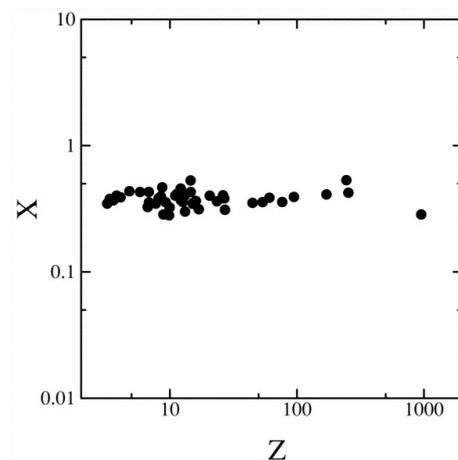


図 1: データ点の X Z 面での分布

plane に垂直な平面 ("vertical plane") でも同様にフィッティングした。vertical plane は、

$$Aa + Bb + Cc = 0 \quad (2)$$

という条件のもと

$$a \log \rho_0 + b \log R + c \log T + d = 0 \quad (3)$$

と表すことができる。fundamental plane と vertical plane の単位法線ベクトル (それぞれ $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2$) を求め、さらにこの 2 つの外積からどちらの単位法線ベクトルに対しても垂直な単位ベクトル \mathbf{e}_3 を算出した

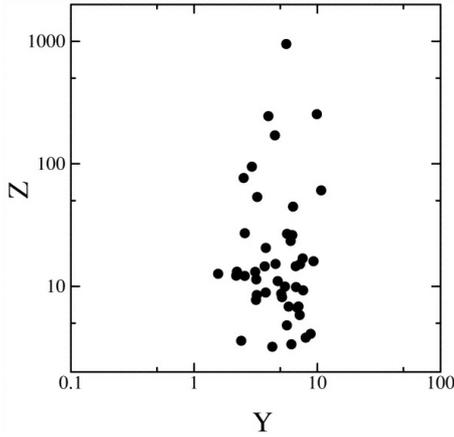


図 2: データ点をの Y Z 面での分布

ところ、以下のようになった。

$$\begin{cases} \mathbf{e}_1 = (0.47, 0.65, -0.60) \\ \mathbf{e}_2 = (0.39, 0.46, 0.80) \\ \mathbf{e}_3 = (0.79, -0.61, -0.039) \end{cases} \quad (4)$$

すると、基底ベクトル、 $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$ を使って、fundamental plane を基準とした座標系 (X, Y, Z) での議論が可能になる。 X は fundamental plane に垂直な方向、 Z は fundamental band の方向、 Y はそれらの両方に垂直な方向である。 (X, Y, Z) と密度・半径・温度 (ρ, R, T) との関係は以下のようなになる。

$$\begin{cases} X = \rho^{0.47} R^{0.65} T^{-0.60} \\ Y = \rho^{0.30} R^{0.46} T^{0.80} \\ Z = \rho^{0.79} R^{-0.61} T^{-0.039} \end{cases} \quad (5)$$

この関係を使い、各物理量を (X, Y, Z) で表すことができる。例えば熱制動放射の場合、X 線光度は以下の相関をもつ。

$$L_X \propto \rho^2 R^3 T^{1/2} \quad (6)$$

従って、

$$L_X \propto X^{2.6} Y^{2.6} Z^{-0.27} \quad (7)$$

一方温度 T に関しては、ほとんど Z 軸に対する依存性を持たず、 X 軸の分散も小さいことから、 Y 軸の分散が T の変化量を決めている。したがって

$$T \propto Y^{0.80} \quad (8)$$

であり、これより、観測に比較的近い関係、

$$L_X \propto T^{3.3} \quad (9)$$

を得る。

3 Cosmological implications from X-ray clusters (Fujita & Takahara (1999b))

銀河や銀河団の形成・進化は宇宙論パラメータに強く依存している (例. 重力収縮時期)。この論文では銀河団の形成過程について、理論予想と観測データの分布 (fundamental plane と band) を比較・検討することで膨張宇宙における宇宙論パラメータに制限をかけることを目的としている。

銀河団は重力収縮を完了し、ビリアル化される。ここでは簡単のために球対称に収縮すると考える。また、ビリアル化は宇宙の平均密度の何倍になった時に起こるかは理論的に推定することができ、これを Δ_c と定義する。銀河団形成時の赤方偏移を z_{coll} とすれば、ビリアル密度 ρ_{vir} および collapse factor Δ_c は以下のように記述できる。

$$\begin{cases} \rho_{\text{vir}} = \Delta_c \frac{\Omega_0 \rho_{\text{crit},0} (1+z_{\text{coll}})^3}{\Omega(z_{\text{coll}})} \\ \Delta_c \approx 18\pi^2 + 60x - 32x^2 \\ x = \Omega(z_{\text{coll}}) - 1 \end{cases} \quad (10)$$

ここで宇宙の平均密度として臨界密度 ρ_{crit} を用い、物質密度パラメータを $\Omega(z)$ で表した。

また、現在の添え字の 0 は現在の値を示す。さらに、宇宙の密度の揺らぎは以下のように示される。(Lacey & Cole (1993))

$$\delta_c(t_{\text{coll}}) = \begin{cases} \frac{2}{3} D(t_0) \left[1 + \left(\frac{t_\Omega}{t_{\text{coll}}} \right)^{\frac{2}{3}} \right] & (\Omega_0 < 1) \\ \frac{3(12\pi)^{\frac{2}{3}}}{20} \left(\frac{t_\Omega}{t_{\text{coll}}} \right)^{\frac{2}{3}} & (\Omega_0 = 1) \end{cases} \quad (11)$$

ここで $t_\Omega = \pi H_0^{-1} \Omega_0 (1 - \Omega_0)^{-3/2}$ であり、 D は成長因子を示している。つまり $\delta_c(t_{\text{coll}})$ は時刻 (= 赤方偏移) の関数であることがわかる。

また、宇宙初期のパワースペクトルの関係 $P \propto k^n$ より、質量 M の銀河団に対応する密度ゆらぎを $\delta \propto$

$M^{-(n+3)/6}$ と表すことができる。これから $t = t_{\text{coll}}$ で形成された銀河団のビリアル質量と、現在 ($t = t_0$) 形成されている銀河団のビリアル質量の関係を $\delta_c(t)$ を用いて記述することが可能である。

$$M_{\text{vir}}(t_{\text{coll}}) = M_{\text{vir}}(t_0) \left[\frac{\delta_c(t_{\text{coll}})}{\delta_c(t_0)} \right]^{-6/(n+3)} \quad (12)$$

すなわちビリアル質量は赤方偏移 $z_{\text{coll}} = z_{\text{coll}}(t_{\text{coll}})$ の関数であることがわかる。さらにビリアル半径・ビリアル温度も赤方偏移の関数となる。つまり、赤方偏移 z_{coll} から、それらの物理量の相関が得られることになる。これらの理論をもとに温度・ビリアル半径・ビリアル質量の関係をグラフ化し、さらに paper1 で用いたデータをプロットする。ここでは、ビリアル半径とビリアル密度の関係を示した図を紹介する。

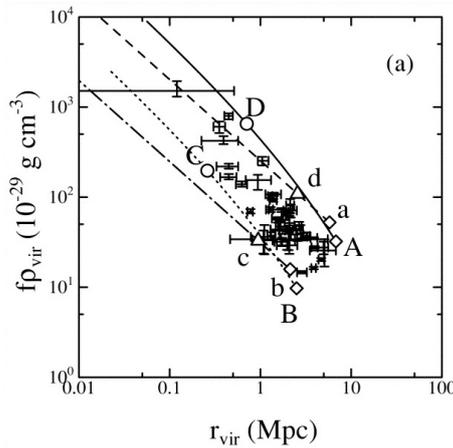


図 3: $n = 1$ の場合のビリアル質量とビリアル半径の関係

ビリアル密度・半径はそれぞれ形成時の赤方偏移の関数として示すことができるため、グラフ上に理論的相関を表すことができる。ここで、現在の密度パラメータや銀河団のビリアル質量が必要なため、それぞれ $\Omega_0 = 1.0, \Omega_0 = 0.2, M_{\text{vir}} = 10^{16} M_{\odot}, M_{r_{\text{mvir}}} = 5 \times 10^{14} M_{\odot}$ という値を設定した。4 本の理論曲線の先端 A, B, a, b は $z_{\text{coll}} = 0$, C, D は $z_{\text{coll}} = 1 - 1/\Omega_0$, c, d は $z_{\text{coll}} = 0.5$ の値を示している。つまり、銀河団の観測データは a, b, c, d, A, B, C, D が囲む領域の中にあるはずである。

構造形成のシミュレーションによれば、物質密度パラメータが 1.0 の宇宙では構造の形成に時間がか

かり、 $z_{\text{coll}} \sim 0$ 付近に銀河団のデータが集中するはずであるが、実際のデータはそれ以前（より大きな赤方偏移の時期）に銀河団が収縮していることがわかる。構造形成を阻害する宇宙膨張は時間がたつにつれ加速していく。そのため Ω_0 が小さいほど、構造形成は早い段階で行われる。すなわち、 $\Omega_0 < 1$ より現実的であると結論付けられた。

Reference

- [1] Fujita.Y, & Takahara.F 1999a, ApJ
- [2] Fujita.Y, & Takahara.F 1999b, ApJ
- [3] S.Ettori et al.2010, A & A
- [4] Lacey.C & Cole.S 1993, MNRAS
- [5] Bryan.C.L. & Norman.M.L 1998, ApJ
- [6] Kitayama.T & Suto.Y 1996, ApJ
- [7] Mohr et al. 1999, ApJ