

論文の内容の要旨

論文題目 X-ray Study of Distant Clusters of Galaxies: Structure and Evolution
(X線による遠方銀河団の構造と進化の研究)

氏名 太田直美

銀河団は、重力的に閉じた天体としては宇宙で最も大きな天体である。このため、宇宙の構造と進化の歴史をよく保存する重要な天体として注目されてきた。銀河団は、可視光領域ではもちろん銀河の集団であるが、むしろダークマターの重力に支配された系ととらえる方が適当である。その重力に閉じ込められた高温ガスから放射されるX線は、ダークマターの最もよいトレーサーの一つである。そこで、銀河団の構造についてX線観測から制限を与えることができる。このような解析を多数のサンプルについて一様な解析手法によって行うことで、そこにある共通の性質と redshift の依存性を調べることができるであろう。その結果から銀河団の構造と進化、さらには、それを重力的に支配しているダークマターについて強い制限が得られると期待される。

X線分光に優れた能力を持つ ASCA 衛星と空間分解能に優れた ROSAT 衛星のデータの組み合わせによって、遠方の銀河団までこのような解析を適応することが可能である。すでに、それぞれの約7年間観測により多数の観測データが蓄積されている。これまでに redshift, z が、 $z < 0.1$ の銀河団については、Mohr et al. (1999)により45個のサンプルによる研究が行われている。しかし、 $z > 0.1$ のサンプルについては、20個程度のサンプルについて系統的な解析が行われただけである。

本論文で私は、ASCA 衛星と ROSAT 衛星の両方で観測が行われている redshift の範囲 $0.1 < z < 1$ のすべての銀河団、80個（望遠鏡の視野中心から外れた位置で観測が行われた3個を含まない）について、ASCA 衛星、ROSAT 衛星の両方のデータに対して一様な解析方法を適用し、銀河団の構造（X線ガスの空間分布および温度）を調べた。その結果を用いて、遠方銀河団サンプルのX線パラメータの redshift に対する依存性、およびそれらのパラメータ間の相関について議論を行なった。

X線空間輝度分布の解析には ROSAT 衛星の HRI 検出器の X 線データを用いた。解析の第一ステップとして X 線輝度分布の中心を X 線光子の空間上の重心を求める手法により求めた。この方法のシステムティックな誤差を検討する過程で、この方式により軸対称な形をした regular cluster と非対称性を持つ irregular cluster の 2 種類に、銀河団が分類できることがわかった。次に、方位角方向に平均した輝度分布 (radial profile) を求めた。これを、まず isothermal β -model による輝度分布モデルでフィッティングを行い、 β 、コア半径 r_c 、中心での X 線表面輝度を決定した。この解析に伴うシステムティックな誤差として、中心の決定誤差、使用する画像領域の大きさの取り方、バックグラウンドの非一様性、画像の空間分解能の影響をシミュレーションなどで検討し、その影響が光子統計的による誤差に比べて小さいことを確認した。ただし、コア半径が、解析に用いた画像の分解能 5" 角以下の場合には、常に 5" 角程度の値が得られるので、注意する必要があることもわかった。

β モデルフィットの χ^2 の値は一つ一つの銀河団で見れば acceptable な範囲である。しかし、80 個の銀河団の値の分布は、 χ^2 分布よりも有意に値の大きい方にずれている。実際、いくつかの銀河団について、中心付近でデータにモデルからのシステムティックな excess が見られた。そこで、regular cluster について、二通りの方法で中心の excess を検討し、9 個の銀河団は統計的に有意な excess があることがわかった。これらの銀河団の輝度分布はコア半径の異なる二つの β モデル成分を持つモデル (double β モデル) で表現できた。9 個の銀河団において、2 つのコア半径は、それぞれ約 50kpc と約 200kpc でその比は約 4 であった。一方、表面輝度の比は、2 個については約 1 : 1、残りの 7 個は 1 : 0.03 から 1 : 0.2 の範囲でコア半径の大きな成分の方が小さかった。また、これらを、一成分の普通の β モデル (single β モデル) でフィットすると、コア半径として、前者の 2 個については、大きなコアの成分のコア半径が、後者の 7 個は小さなコアのコア半径が得られることがわかった。そこで、double β モデルが統計的には必要ないと結論された銀河団について、上記の平均的な性質を持つもう一つの β モデル成分を仮定し、その存在が統計的に許されるかどうかを検討した。その結果、もともとのコア半径が比較的小さいものについてはその外側に、比較的大きなものについてはその内側に、もう一つの成分がある可能性を、約 80% の銀河団について否定できないことがわかった。

次に、NFW profile を仮定したモデル関数、NFW-SSM (Navarro, Frenk, White-Suto, Sasaki, Makino) モデルにより、表面輝度分布のフィッティングを行った。その結果、NFW-SSM モデルによるパラメータと β model のパラメータの間にほぼ 1 対 1 の対応関係があることを確認した。

最後に、ASCA 衛星のスペクトルデータを解析し、銀河団ガスからの熱的な放射の銀河団の平均温度 T 、および、銀河団全体の X 線光度 L_X を決定した。

以上で求めた X 線パラメータおよび、それらから求めた銀河団を特徴づける物理量について、その redshift 依存性、パラメータ間の相関を検討した。その重要な結果は以下のようにまとめられる。

- X 線光度と平均温度の関係、いわゆる $L_X - T$ relation を、regular cluster と irregular cluster について分けて調べると、関係のべきは同じであるが、Normalization に有意な違いが見られる。しかし、regular cluster の中でもコア半径の大きなものは、irregular cluster と同じ相関を示しており、この違いは、コア半径の違いにより強く相関している。
- 温度 T 、 β 、コア半径 r_c 、および (X 線表面輝度と r_c, T, β から求められた) 銀河団中心での電子密度 n_{e0} には、明らかな redshift 依存性は見られない。(T と r_c には一見 redshift

依存性があるように見えたが、シミュレーションなどにより検討した結果、これらは遠方で暗い、または表面輝度の低い銀河団が検出できない、という一種の selection effect で説明できることがわかった。）

- Spherical Collapse model の考え方にたつて、ピリアル半径を、その内側での銀河団の平均密度が collapse 時の宇宙の critical density の 200 倍になる半径と定義して求め、その内側の銀河団質量、ガスの質量と銀河団の全質量の比 (gas mass fraction) などを求めた。collapse 時の redshift, z_{col} , は、観測された redshift z_{obs} に等しいという仮定で解析を行った。その結果、ピリアル半径 (および、ピリアル質量) に弱い redshift 依存性が見られた。
- 銀河団のパラメータの中で、 r_c は、1 桁以上の最も大きな銀河団ごとのばらつきを示す。その度数分布は、約 60kpc および 220kpc に二つのピークを持ち、100kpc 程度のコア半径を持つ銀河団が少ない。
- Fujita & Takahara (1999) による Fundamental plane の解析にならつて、($\log T, \log r_c, \log n_{e0}$) 空間内での銀河団の分布を調べると、銀河団はほぼ平面にそつて分布している。その面の方向と位置は、Fujita & Takahara (1999) による $z < 0.1$ の銀河団に対する値と一致していると考へて矛盾しない。

以上の結果に基づき、(1) redshift 依存性と銀河団が作られた時期、(2) コア半径の分布と銀河団の構造、(3) 宇宙の密度パラメータへの制限、の 3 つの観点から議論を行った。

1. redshift 依存性と銀河団が作られた時期

ピリアル半径の redshift 依存性は、仮定した宇宙の critical density の redshift 依存性が現れたものとして矛盾しない。もちろん、ピリアル半径が、このような redshift 依存性を持つために、その他の銀河団パラメータが強い redshift 依存性を持たないという可能性は否定できないが、むしろ、多くの銀河団について $z_{col} = z_{obs}$ という仮定が成り立っていないと考へる方が自然であろう。一方、銀河団の中心密度は必ずピリアル密度よりも高いことから、 z_{col} に制限をつけると、コア半径の大きな銀河団については $z_{col} < 2$ を得る。

2. コア半径の分布と銀河団の構造

コア半径の分布を、 $z < 0.1$ の Mohr et al. の結果も含めて検討した。その結果、 $z < 0.1$ のサンプルと $z > 0.1$ のサンプルは同様の r_c 分布を持つ。しかも single β モデルの銀河団は、約 60kpc と約 220kpc の二つの分布のピークを持ち、double β モデルの銀河団では、小さなコアと大きなコアはそれぞれ約 60kpc と約 260kpc にピークを持つことがわかつた (図 1)。

これは、(1) どの銀河団についても、X 線輝度がもともと double- β モデルで表わされるような性質を持っている、(2) 二つの成分の X 線の明るさの比が銀河団ごとに異なり、それによつて、 r_c の大きな single β 、double- β 、 r_c の小さな single β 銀河団に見える、と解釈すると、統一的に理解することができる。

r_c の小さな成分については radiative cooling の時間尺度は銀河団の年令よりも十分に短い。私は、このことから、次のような可能性を考へた。銀河団の重力ポテンシャルにもともと double β モデルで表現されるような構造がある。銀河団が生まれたころは、二つの成分は同じ程度の輝度を持ち r_c の大きな single β として認識される。しかし、内側で

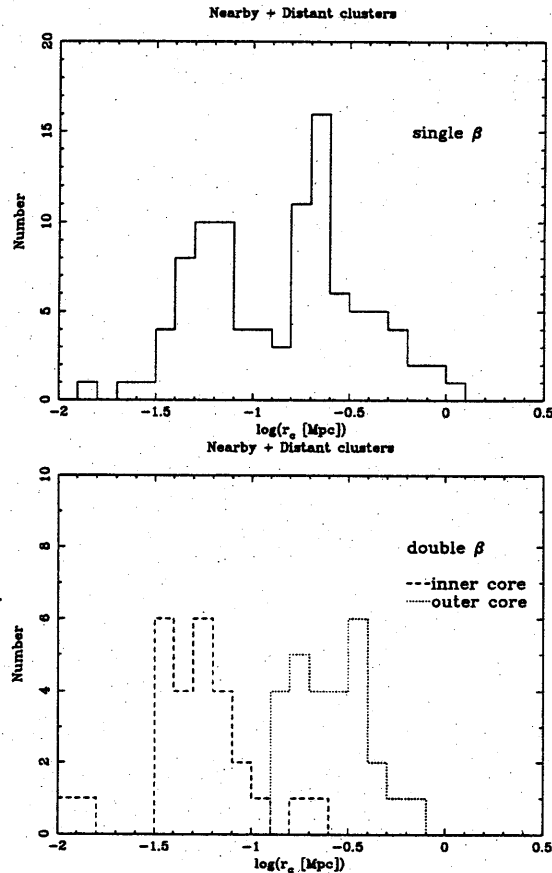


図 1: コア半径の分布。今回解析した遠方銀河団 (80 個、うち double β モデルが有意なもの 9 個) の結果に Mohr et al. の近傍銀河団の結果 (45 個、うち double β モデルが有意なもの 18 個) を足しあわせてある。上図は single β モデルの銀河団、下図は double β モデルの銀河団を示す。下図においては、double β モデルの内側のコアと外側のコアを、それぞれ破線と点線で示してある。

cooling が効きはじめると、cooling flow により内側の core の電子密度が高くなり、内側の成分の X 線放射が強まり、double β model、さらには、小さな core の single β として認識されるようになる。これは、観測された銀河の中心での電子密度が、 r_c の小さな銀河団の方が高いこととコンシステントである。

3. 宇宙の密度パラメータへの制限

ビリアル半径内の gas mass 比は、宇宙の平均的な gas mass 比を保存していると考えられるので、これから宇宙の密度パラメータに制限をつけることができる。その際、検出器の有効面積などの絶対的な校正の精度がシステムティック誤差として問題になる。これを検討した結果、gas mass 比に最大 25% で現れ得るという結果を得た。また、gas mass 比はビリアル半径の取り方によっても変化する。そこで、 $z_{col} = z_{obs}$ および、一様に $z_{col} = 1$ として virial 半径を決めた場合の両者を含む範囲を推定値として求めた。その結果は、 $\Omega_0 = 0.28 \pm 0.10$ であった。