



X線による銀河団の構造と進化の系統的な研究 —銀河団規模での二重構造の発見—

太田直美

〈東京都立大学大学院理学研究科宇宙物理理論研究室 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1〉

e-mail: naomi@phys.metro-u.ac.jp

X線天文衛星「あすか」および ROSAT を用いて、過去最大のサンプル数の遠方銀河団について統一的な解析を行い、温度と空間分布を決定しました。その結果から、銀河団のコア半径分布に特徴的な二つのピークが存在することを発見しました。また、銀河団の性質の赤方偏移依存性、および銀河団中のガス—質量比にもとづく宇宙の密度パラメータの推定についても紹介します。

1. はじめに

宇宙で最大の重力で束縛された系である銀河団は、宇宙の進化の歴史を最もよく保存している天体であると考えられています。銀河団は、1 Mpc 程度の空間に広がる数百個から数千個の銀河の集団ですが、X線で観測するとその全体を満たす約一億度の高温ガスが輝いて見えます。しかしその実体はむしろ、銀河とガスという見えている物質よりも、そのおよそ10倍におよぶ暗黒物質に支配された系ととらえるほうが適当です。そこでX線もちいて高温ガスを観測することでガスや銀河を閉じ込めている重力ポテンシャルを決定し、直接観測することのできない暗黒物質の分布を間接的に測定することができます。

これまでのX線観測から、近傍の銀河団の重力ポテンシャルに階層的な二重構造を持つものがあることが示唆されてきましたが^{1), 2)}、あすか衛星と ROSAT 衛星の観測データを組み合わせた多数の遠方銀河団の系統的な研究から、新たに多くの銀河団が同じような二重構造をもつことがわかってきました³⁾。またこれと関連して、銀河団ガスの空間分布の広がりの特徴的な二つのピークが存在し、それが様々な観測量と強い相関を示すことが明らかになってきました。このことは、銀河団の性質には、

その広がり的大小を表すコア半径を指標として、少なくとも二種類のものがあることを観測的に示唆しています。これらの結果は銀河団のポテンシャル構造のみならず、宇宙における構造形成のシナリオを議論するうえで重要な意味をもちえると考えています。では、かつてない多数のX線銀河団サンプルの系統的な解析を概説し、そこから得られた研究成果を紹介したいと思います。

2. あすか衛星と ROSAT 衛星による X線観測

すでにふれたように、X線は銀河団ポテンシャルの非常によいトレーサーです。代表的なポテンシャル測定法（銀河の運動、重力レンズ、X線観測）のうち、X線の利点はポテンシャルの深さと広がり制限を与えられる点にあります。ただし、そのためにはガスの温度と空間分布という二つの情報が不可欠となります。これを特に遠方の銀河団について得ることはそう簡単ではなく、1993年と1990年にそれぞれ打ち上げられたあすか衛星と ROSAT 衛星の組み合わせによって初めて可能になったと言えます。つまり、銀河団の温度数 ~ 10 keV を測るには高いエネルギーまでのびる高い感度での分光観測が必要であるし、かつ遠方銀河団の空間構造を精度よく測るには秒角の空間分解能で

の撮像が要求されます。前者を「あすか」が後者を ROSAT が実現します。なお現在、これらにかわる高性能な X 線衛星としてそれぞれ XMM-Newton 衛星と Chandra 衛星という組み合わせがありえますが、多数サンプルを蓄積するにはあと 5 年から 10 年を待たなければならないでしょう。

そこで、現時点で最善の「あすか」と ROSAT の観測データを用いて統一的な手法により解析を行いました。過去約 10 年の観測により、近傍から遠方まであわせると 100 個以上の銀河団データが蓄積されており、系統的な解析を行う好機でもあったわけです。では、この研究から得られた新しい成果について示していこうと思います。

2.1 遠方銀河団の系統的な解析

ここでいくつかの前提をまとめておきます。

* サンプル

解析サンプルは、ROSAT 衛星 HRI 検出器およびあすか衛星の両方で観測された赤方偏移が 0.1 から 1 までの遠方銀河団という条件で選びました。よってこれまでに両衛星で観測された遠方銀河団ほとんどすべてを網羅しています。全 80 個のサンプルのうち赤方偏移 0.4 以下の銀河団が約 9 割を占めており、それより遠方の銀河団は、空間分解能と感度の両面から観測が大きく制限されているのが現状です。このような観測的な制限や観測対象の銀河団の選び方によって、解析サンプルが必ずしも銀河団全体の特徴を表していない可能性については後でふれることにします。

* 空間分布とスペクトルの解析

次に解析サンプルすべてについて、次の二つの解析 (i) ROSAT HRI イメージから空間分布の決定、(ii) 「あすか」の X 線スペクトルからガス温度の決定を行います。(i) においては、X 線表面輝度分布の重心を中心として方位角方向に平均化した 1 次元強度分布をつくり、ベータモデル⁴⁾を仮定したフ

ィッティングを行います。ベータモデルには、中心の表面輝度が一定の領域の大きさをあらわすコア半径、外側の減衰の速さをあらわす冪のベータ、および中心の表面輝度という三つのパラメータがあります。

* 系統誤差の検討

コア半径とベータは、フィッティングを行うと互いに強く結合しあう傾向があることが知られています。そのため、例えばバックグラウンドの不定性がフィット結果に大きく影響し、両パラメータが正しく求められないという問題がおこります。このような理由から、これまでコア半径はあまり信頼のおけないパラメータであるととらえられることも多くありました。そこで本研究では、バックグラウンドの推定に加え、銀河団の中心決定の不定性、用いるイメージ領域の大きさなど、解析に影響するあらゆる系統誤差の検討を綿密に行いました。これより系統誤差の大きさを評価し、信頼のおける結果を導きました。また、最終的にシミュレーションを用いてパラメータの再現性を確認しました。

やや細かい話になりますが、X 線イメージには銀河団によって、対称性のよいものとそうでないものがあるため注意が必要です。中心決定の系統誤差を比べてみると、対称性の悪いものは光子統計による統計誤差以上に大きな系統誤差を示すのに対し、対称性がよいものは小さな系統誤差になります。この性質を利用して、銀河団を 35 個の不規則銀河団と 45 個の規則銀河団に分類しました。また、解析に用いるイメージ領域の大きさに対する依存性を調べるために、中心部分を取り除くという解析を行いました。この時、取り除く領域の大きさを次第に大きくしてゆくと、ある大きさのところでコア半径が急激に大きな値に変化するグループがあることもわかりました。このことは、銀河団が二つの長さ尺度を持つことを示唆します。実際、このグループの銀河団は中心領域にベータモデルを上回る放射の超過がみられました。よって二つの

1 a

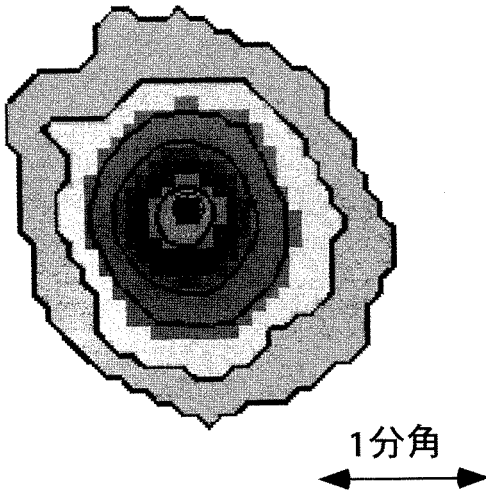
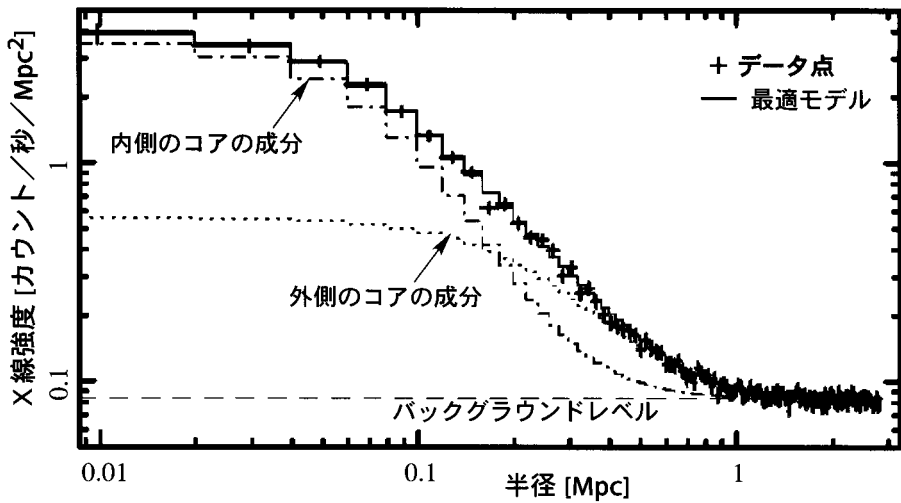


図1 銀河団の空間分布の解析の例
 (a) アーベル 1689 銀河団 (赤方偏移 0.18) の ROSAT 衛星 HRI 検出器イメージと (b) 一次元 X 線強度分布 (十字). 最適な二重ベータモデル (実線) とその二成分をそれぞれ一点鎖線と点線で示してあります.
 (本稿では, $H_0 = 50 \text{ km/s/Mpc}$, $\Omega_M = 1$ を仮定.)

1 b



ベータモデルの重ね合わせを用いると, 統計的に有意にフィッティングが改善し, かつ解析領域の大きさに結果が依存するような系統誤差は取り除かれることがわかりました. このように二重構造をもつ銀河団を, ベータモデル一成分の“単一ベータ銀河団”と区別して“二重ベータ銀河団”と呼ぶことにします (図1を参照). なお規則銀河団45個中20%がこの二重ベータ銀河団に該当するこ

とがわかりました.

(ii) においては, 「あすか」の SIS 検出器と GIS 検出器から銀河団中心のまわりにそれぞれ半径3分角, 6分角の円形領域を積分したスペクトルをつくり, 熱制動放射を仮定したフィッティングを行います. これにより X 線温度および全光度を決定します. やはり, スペクトル解析においても, 積分領域の大きさのとり方などによる系統誤差の

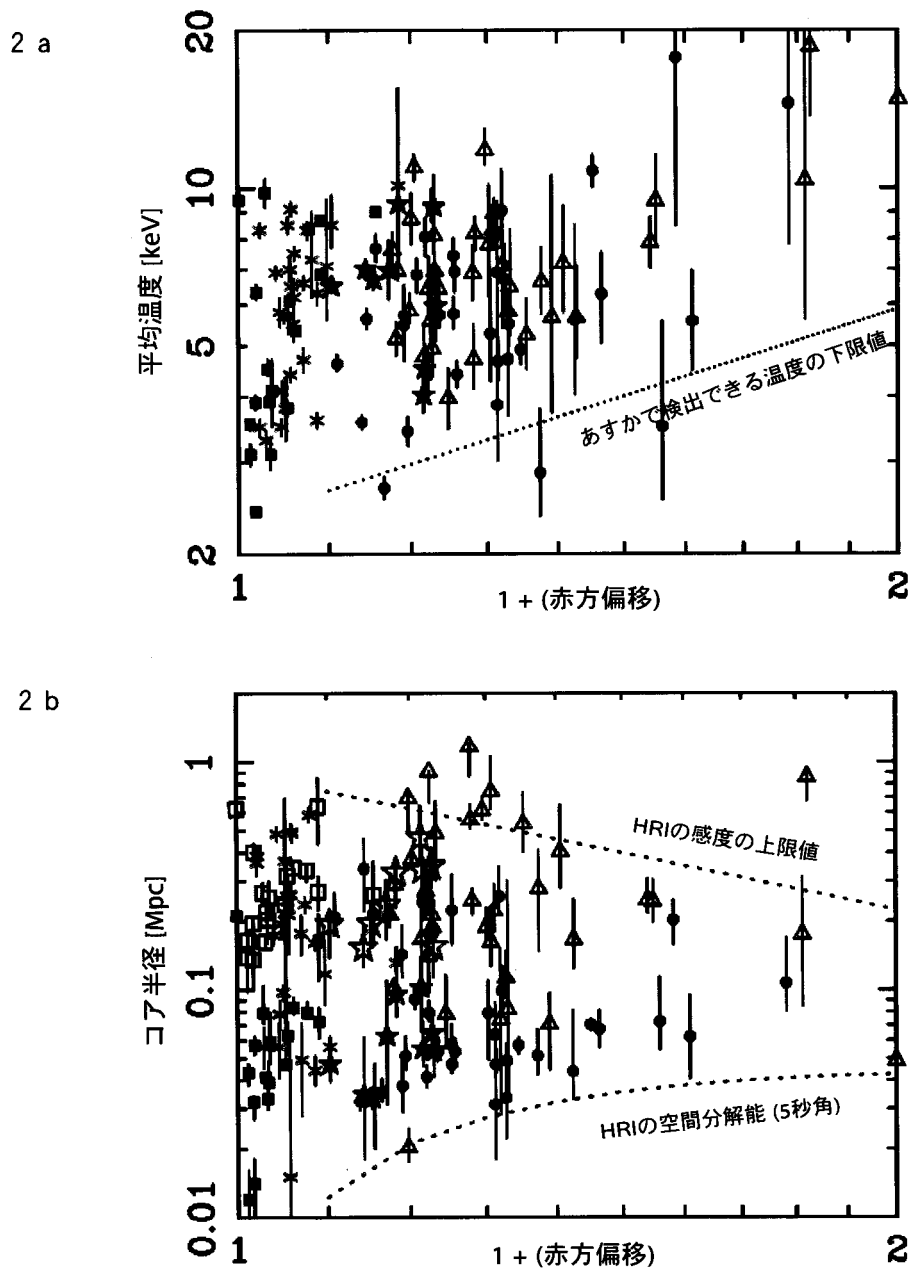


図2 銀河団のX線観測の赤方偏移依存性

(a) 平均温度と (b) コア半径の赤方偏移依存性。今回の解析から得られた赤方偏移 0.1 以上の 80 個の銀河団の結果を示してあります。なお、星印は二重ベータ銀河団、丸と三角は単一ベータ銀河団のうち規則銀河団と不規則銀河団を表します。一方、赤方偏移 0.1 以下については、Mohr らのサンプル⁵⁾を引用しました。なお、(a)において点線より低い温度は、「あすか」の観測装置の感度によって観測が制限されている領域です。(b)において、上下二本の点線の外側の領域はそれぞれ ROSAT HRI の感度 (X線光度 $\sim 1 \times 10^{45} \text{erg/s}$ を仮定した場合) と空間分解能 (5 秒角) によって観測が制限されていることを意味します。また、二重ベータ銀河団については、内側と外側のコア半径を別々に表示してあります。

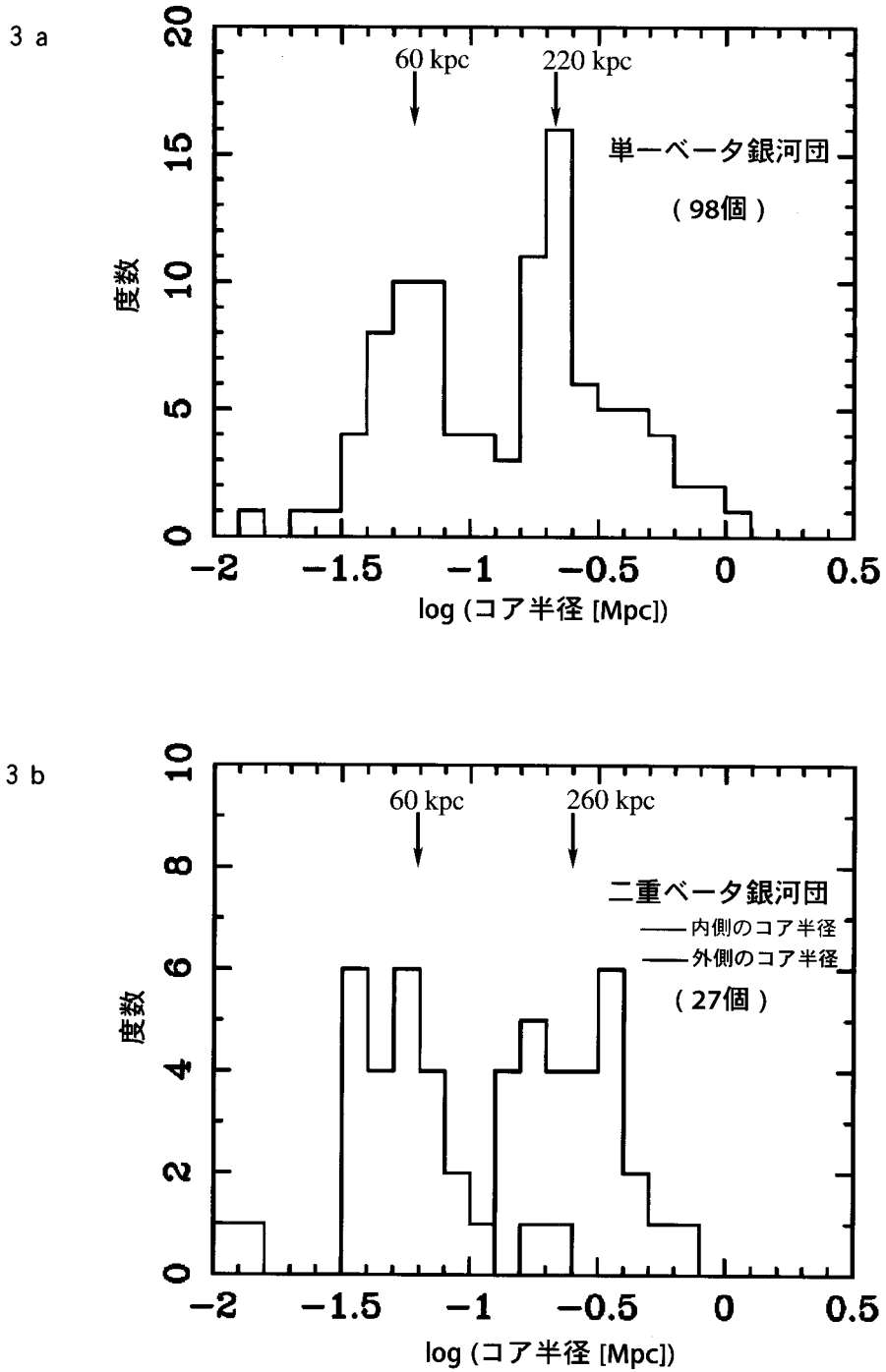


図3 コア半径の度数分布
(a) 単一ベータ銀河団と (b) 二重ベータ銀河団のコア半径分布。今回の遠方銀河団サンプル 80 個と近傍銀河団 45 個を足しあわせてあります。

検討を注意深く行い、それらが統計誤差にくらべて小さいことを確認しています。

以上のような解析から、すべての銀河団について空間分布を記述するベータモデルパラメータ（ベータ、コア半径、中心輝度）および平均温度が得られ、ついに遠方銀河団のX線データベースの完成をみました。

3. 結果

このデータベースを活用し、主に二つの観点“赤方偏移依存性”と“コア半径の度数分布”から結果を図2と図3に示します。

3.1 銀河団の性質の赤方偏移依存性

まず銀河団の進化を知る上で重要となる赤方偏移依存性について注目します。なお今回の遠方銀河団サンプルに対する比較サンプルとして、赤方偏移0.1以下の近傍銀河団についてはMohrらの結果⁵⁾を引用してあります。平均温度の図において赤方偏移が大きいところで平均的に高い温度を示す傾向があります。しかし、観測の感度の制限から、遠方になると5 keVを超えるような高温の銀河団しか観測されないことがわかります（ここで、銀河団でよく知られたX線光度と温度の相関、いわゆる光度温度関係を仮定しています）。よって、近傍の銀河団と比較しても、平均温度にはデータの分散以上の進化があるとはいえません。また、コア半径についても同様に、観測装置の感度と空間分解能によって観測が制限されている領域を図中に示してあります。これを考慮すると、やはりコア半径にはデータの分散以上の明らかな進化がみられないといえます。この他、ベータや電子密度についても同様の結果が得られています。このように、かなり広い赤方偏移の範囲で、観測された銀河団の性質に変化がないことは驚くべきことでありまた重要なことです。

3.2 コア半径分布

さて、コア半径において特筆すべきことは、第一にコア半径が他の観測量にくらべて一桁以上にもおよぶ最も大きなばらつきを示すということと、第二に0.1 Mpc程度の値をもつものが非常に少ないということです。約0.1 Mpcを境に、大きなコア半径と小さなコア半径を持つものがあり、その様子はどの赤方偏移の時点でも続いているように見えます。この特徴的な様子は、度数分布を作ることによってさらに明らかとなります。図3は、遠方銀河団80個と近傍銀河団45個のサンプルを足しあわせた結果ですが、はっきりと60 kpcと220 kpcに二つのピークが存在します。同時に、100 kpc周辺のギャップは統計的に 4σ という高い有意性があります。もちろん、検出器の性能の制限から分布の裾野が観測にかかりにくいことはすでに述べました。しかし、その影響は遠方ほど顕著であって、サンプルの9割を占める赤方偏移が0.4より小さいものに対しては影響は小さいとみなせます。また、100 kpcという大きさが観測的な問題で検出されにくい理由は存在しません。よって、コア半径分布にみられる二つのピークの構造は現実の銀河団の分布を反映していると考えべきです。

さらに、注目すべき結果として、二重ベータ銀河団と単一ベータ銀河団のコア半径分布の類似性があります。二重ベータ銀河団はもともと一つの銀河団内に二つのコア半径をあわせ持つわけですが、その内側と外側のコア半径それぞれが単一ベータ銀河団の二つのピークに非常によく一致しています。これも今回の系統的な解析から新たにわかった事実です。

以下、コア半径が特徴的な分布を有することに注目してその意義を探るために、他の観測量との相関関係を調べた結果を示します。またさらに、二重ベータ銀河団と単一ベータ銀河団の類似性について観測的に課すことのできる制限についても議論したいと思います。

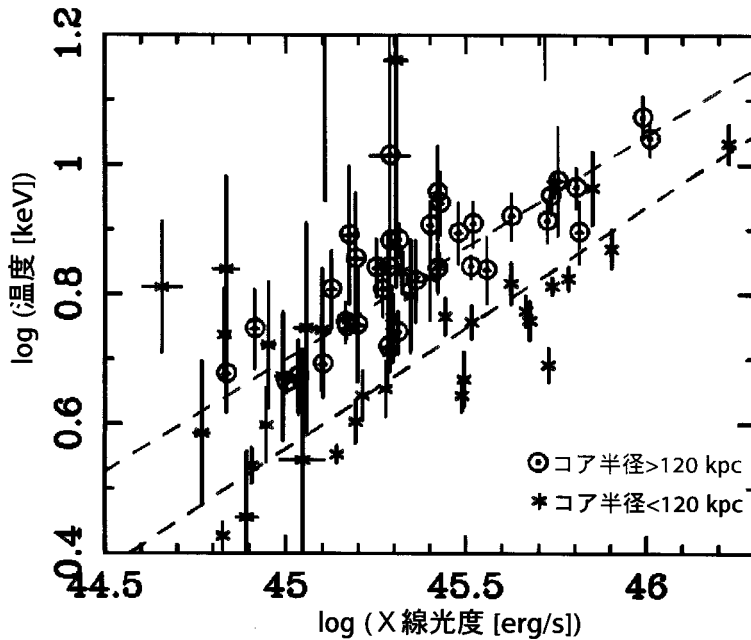


図4 光度温度関係とコア半径

コア半径の値が 120 kpc より大きい銀河団と小さい銀河団でグループわけしたときの、光度温度関係。横軸と縦軸は、「あすか」の X 線スペクトル解析から求められた全光度と平均温度を表します。それぞれのグループに対する最適な冪関数モデルを破線で示してあります。

3.3 コア半径と他の観測量との相関

ここでは、銀河団についての代表的な観測量である、Morphology（形態学）と光度温度関係を取りあげます。いづれにおいても、コア半径との強い相関がみられています。

* Morphology

まず X 線イメージの Morphology ですが、先述のとおり、HRI 検出器のイメージの対称性によって銀河団サンプルを規則銀河団と不規則銀河団とに分類しました。結果として、コア半径の小さい銀河団には規則銀河団の割合が多く、大きいものについては不規則銀河団の割合が多いということがわかりました。

さらに、可視光領域に目を向けてみます。銀河団中の銀河のなかにはときどき、銀河団ポテンシ

ヤルの中心に位置すると考えられる巨大な楕円銀河、すなわち cD 銀河が見られることがあります。Bautz-Morgan タイプにおいて cD 銀河を含む銀河団に分類されたサンプルは、どれも X 線で小さいコア半径をもつ単一ベータ銀河団であるか、二重ベータ銀河団のいずれかであることが判明しました。したがって、X 線の観測量がこのように他の波長の観測量とも相関を示すことは強調しておきたいことです。

* 光度温度関係

つづいて、光度温度関係を取りあげます。これは、X 線光度と温度の間にある冪乗の相関関係ですが、簡単な理論的予測との矛盾が議論されてきています⁶⁾。今回の系統的な研究から図 4 に示したように、コア半径の大小によってグループ分けすると、光度温度関係の冪は一致するが、その規格

化定数には明らかな違いがあることがわかりました。つまり、同じ温度の銀河団であれば、コア半径の小さい銀河団はより光度が大きい傾向があるということになります。これは、X線強度が熱制動放射、つまり密度の二乗に依存することを思えば、同程度の質量の銀河団でもコア半径の小さな系ではガスの中心密度が高いことが予想されます。実際に、コア半径と電子密度は強い逆相関を示すことが確かめられています。

以上のように、コア半径と他のいくつかの観測量の間には強い相関があり、コア半径の値によって銀河団の性質が大きく二分されているととらえることができます。この他、強い重力レンズ効果の観測から決定された銀河団の質量とX線観測から推定された質量の比に対して、はっきりとした違いがあることなどもわかっています。

4. クーリングフローか ポテンシャル構造か？

これまでにガス進化の代表的なモデルとして、クーリングフローモデルが提唱されてきました⁷⁾。これは、銀河団中心の密度の濃い領域でX線放射が効率よく行われるため中心領域の温度が下がり、そこにむかって内向きの流れが生じ、それにともなって中心領域に低温で高密度の領域が生じることを予言します。この低温成分が、小さいコアの成分を形成しX線の超過を生んでいるのではないかと、という可能性について考えてみます。

実際、二重ベータ銀河団あるいはコア半径の小さい単一ベータ銀河団では、中心の電子密度が高く、放射による冷却の時間尺度が宇宙年齢に比べて十分短くなっているため、放射冷却が効いていると期待されます。この意味で、クーリングフローの存在が支持されます。しかし、図4にかえてコア半径の小さい銀河団の温度分布をみると、コア半径の大きな銀河団と比較しても差はなく、最大温度 10 keV まで達しているものが存在します。これは、コア半径の小さい銀河団の温度が低

いわけではないことを示唆しています。また最近では、XMM-Newton 衛星によって近傍銀河団の温度分布が詳細にはかられており、その結果は中心の温度勾配がクーリングフローモデルから期待される程には大きくないことを示しています^{8), 9)}。よって、今回の結果もこの傾向に一致しているといえます。

ガスの温度勾配が小さいとすると、静水圧平衡の仮定のもとでガス分布は直接的にポテンシャル分布を反映するものと考えられます。つまり、今われわれが観測したコア半径分布および銀河団規模での二重構造は、むしろポテンシャル構造を反映したものであるわけです。

遠方銀河団サンプルが、単一ベータ銀河団と二重ベータ銀河団に大きく分類されること、および単一ベータ銀河団には 60 kpc 程度の小さなコア半径をもつものと 220 kpc 程度の大きなコア半径をもつものが存在することを述べました。さらに、二重ベータ銀河団がその二成分の強度比によって、内側の成分が卓越しているものと、外側の成分が卓越しているものの二種類に分類されることを加味すると、われわれは大きくわけて四種類の銀河団を観ていることになります。では、四種類の別々の性質をもつ銀河団が存在するのでしょうか。

私たちはそうではなく、かなりの割合の銀河団の中心領域が共通に二つの異なるコア半径で特徴づけられるような二重のポテンシャル構造をもって、その深さの程度により四種類にみえるのではないかと、という展望をいただいています。

5. 銀河団のガス—質量比と 密度パラメータの推定

少し話題をかえて、銀河団のガス—質量比の測定を利用した、宇宙の密度パラメータの推定についてふれておきたいと思います。密度パラメータ Ω_M は宇宙モデルを記述する基本的なパラメータの一つです。そこで、銀河団のビリアル半径内に含まれるガスと暗黒物質の比すなわちガス—質量

比が、宇宙のバリオンと暗黒物質の比を保存しているとすると、ガス—質量比とバリオン密度から密度パラメータを推定することができます¹⁰⁾。バリオン密度には、クエーサーにおける重水素の測定を利用して元素合成の理論から見積もられた結果¹¹⁾を用いることにします。

実際に遠方銀河団サンプルについてガス—質量比を求めた結果、 0.28 ± 0.10 という値が得られました。ここでパラメータに大きな誤差がついていますが、これは銀河団—銀河団の分散、さらにビリアル半径を定義するときの不確定性に起因するものです。また、ガス—質量比が赤方偏移に対して分散以上の進化を示さないことが実験的に確かめられたことは重要です。最終的に上記の値を用いることで $\Omega_M = 0.28 \pm 0.10$ と推定されました。これは、近傍銀河団で測定された値に加え、Ia型超新星¹²⁾、¹³⁾や宇宙マイクロ波背景放射のゆらぎ¹⁴⁾などを利用した、いくつかの独立な測定が $\Omega_M \sim 0.3$ を報告していることと一致しています。

6. おわりに

これまでにあすか衛星と ROSAT 衛星によって取得された豊富な X 線観測データを活用して、遠方銀河団の系統的な研究を行いました。その結果から、これまで知られていなかった銀河団の構造が見えてきました。一言で“銀河団規模での二重構造”と呼ぶことにすると、その様子は近傍銀河団から赤方偏移 ~ 0.5 の遠方までさかのぼってもほぼ不変的に続いているようです。現時点では、その起源についてはっきりとした答えはまだ得られていません。銀河団規模でそのような大胆な構造がどのようにして作られたかは大きな謎であり、既存の銀河団進化のモデルでは理解が難しいのが現状です。

今後 X 線にとどまらず、多波長での観測研究がぜひとも重要であると考えています。もちろん、理論的考察ともあわせて研究結果の物理的解釈を深めていきたいと思っています。

謝 辞

この研究は、マックスプランク研究所の ROSAT アーカイブおよび NASA ゴダード宇宙飛行センターの「あすか」アーカイブのデータを使用しています。また研究を進めるにあたっては、満田和久教授（宇宙科学研究所）に御指導いただきました。

参 考 文 献

- 1) Ikebe Y., et al., 1999, ApJ, 525, 58.
- 2) Xu H., et al., 1998, ApJ, 500, 738.
- 3) Ota N., 2001, PhD thesis (University of Tokyo)
- 4) Cavaliere A., Fusco-Femiano R., 1976, A&A, 49, 137.
- 5) Mohr J.J., Mathiesen, B., Evrard, A.E., 1999, ApJ, 413, 492.
- 6) Fujita Y., Takahara F., 1999, ApJ, 519, L51.
- 7) Fabian A.C., Nulsen P.E.J., Canizares C.R., 1984, Nature, 310, 733.
- 8) Tamura T., et al., 2001, A&A, 365, 87.
- 9) Bohringer H., et al., 2001, A&A, 365, L181.
- 10) White S. D. M., et al., 1993, Nature, 366, 429.
- 11) Burles S., Tytler D., 1998, ApJ, 499, 699.
- 12) Riess A.G., et al., 1998, AJ, 116, 1009.
- 13) Perlmutter S., et al., 1998, Nature, 391, 51.
- 14) Melchiorri A., et al., 2000, ApJ, 536, L63.

Systematic study of X-ray structure and evolution in a large number of distant clusters of galaxies — Discovery of the cluster-scale double structure —

Naomi Ota

Department of Physics, Tokyo Metropolitan University 1-1 Minami-Osawa, Hachioji, Tokyo 192-0397, Japan

Abstract: We have determined spatial distributions and temperatures of intracluster gas for eighty distant galaxy clusters with the ROSAT HRI and ASCA. We discovered that the histogram of the core radius parameter of the β -model exhibits distinct two peaks. We also present redshift dependence of the observed X-ray parameters, and constraints on the density parameter through observations of the gas-mass fractions in the clusters.