

すざく衛星がとらえた銀河団外縁部ガスの特徴とその周辺の大規模構造との相関

川原田 円

〈宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 〒252-5210 相模原市中央区由野台 3-1-1〉

e-mail: kawahard@astro.isas.jaxa.jp

岡部 信広

〈Institute of Astronomy and Astrophysics, Academia Sinica, P.O. Box 23-141, Taipei 10617, Taiwan, R.O.C.〉

e-mail: okabe@asiaa.sinica.edu.tw

銀河団は、銀河が密集しているフィラメント構造と銀河がほとんど存在しないヴォイドが織りなす宇宙の大規模構造と接しています。すざく衛星による銀河団の外縁部からの淡い X 線放射の観測によって、フィラメント構造とヴォイドに接する外縁部ガスの温度がそれぞれ高温と低温になっており、その特徴が異なることが発見されました。これは、銀河団が周辺の大規模構造の影響を受けながら成長していることを示しています。また、ヴォイドと接する外縁部の低温領域では、ガスは静水圧平衡からずれており、重力レンズ観測から得られた質量を維持するだけの総圧力に対して熱的な圧力が足りないことがわかりました。この領域では、ガスの大局的な流れなどの非熱的な圧力が存在する可能性があります。本稿では「すざく」の観測結果、および私たちのアプローチである X 線・光学・重力レンズデータを組み合わせた統合解析による結果をご紹介します。

1. はじめに

銀河団は、数百から数千もの銀河が巨大な重力によって集まる宇宙で最大の天体です。その質量は太陽の 10 の 14 乗から 15 乗倍にも達します。宇宙の階層的構造形成モデルに基づくと、銀河団は小さな構造の衝突合体を繰り返してより大きな構造へと成長し、そして現在も進化し続けていると考えられています。銀河団がどのように成長・進化してきたかを明らかにすることは銀河団研究の最も重要なテーマの一つです。本稿では、X 線衛星「すざく」がとらえた、エイベル 1689 銀河団の成長の現場についてご紹介します。

銀河団の内部に広がる空間には、銀河団ガスと呼ばれる、希薄な高温プラズマが充満していま

す。銀河団ガスの温度は、中心領域でおよそ数千万度から 1 億度にもなり、その温度に対応する波長の X 線を放射しています。そのため、X 線衛星で銀河団を観測すると全体が輝いて見えます（図 1）。銀河団ガスは、2000 年以前は日本のあすか衛星やドイツのローサット衛星、2000 年以降はアメリカのチャンドラ、ヨーロッパのニュートン衛星によって、精力的に観測が行われてきました。「あすか」は、銀河団ガスに含まれる重元素組成¹⁾や温度構造²⁾について明らかにし、当時、世界における銀河団の研究をリードしました。後続のチャンドラやニュートン衛星は、高い空間分解能によって、それまで見えていなかった、銀河団ガスの複雑な構造を明らかにしてきました。例えば、活動銀河核のジェットと銀河団ガスの相互作用³⁾

や、異なるエントロピーのガスが接触しているコールドフロント⁴⁾、激しい銀河団衝突に関係する衝撃波⁵⁾などが挙げられます。しかしこれらのX線衛星では、自己重力系である銀河団の大きさを規定するヴィリアル半径から半分ほどの、中心領域しか観測することができませんでした。銀河団の外縁部からのX線放射は非常に淡く、観測が非常に困難なためです。銀河団の体積の約80%を占める外側の広大な領域は、X線では見ることができなかったのです。そのようななか、前人未達の外縁部のX線観測を可能にしたのが2005年に打ち上げられた日本のすざく衛星です。「すざく」は低くて安定した雑音レベルで感度良く天体からの信号をとらえるため、外縁部からの淡いX線放射を検出し、ガスの温度や密度を測定することができます。

X線観測の進歩と歩調を合わせるように、重力レンズの観測的研究が飛躍的に進展してきました。これは、銀河団などの強い重力をもつ天体(レンズ天体)によって遠方の銀河が発する光の経路が曲げられる現象を観測するもので、その曲がり方からレンズ天体の質量を知ることができます。重力レンズ信号の強弱によって、銀河団中心部で見られる弓状に変形した像などに代表される強い重力レンズと、重力レンズ信号は弱くとも、背景にある銀河の形状測定を統計的に扱うことで質量分布の情報を得る弱い重力レンズ現象に大別されますが、特に弱い重力レンズ解析の発展は目覚しく、すばる望遠鏡の主焦点カメラがその一翼を担っています⁶⁾。弱い重力レンズによって銀河団全体の質量を測定するには、ヴィリアル半径まで網羅することが重要になります。すばる望遠鏡・主焦点カメラは、短時間の積分時間で赤方偏移が0.15程度以上の銀河団のヴィリアル半径までを1ショットで撮像できる広い視野をもち、その高い撮像性能と相まって、世界最高の銀河団の弱い重力レンズ観測装置と言えます。また、ハッブル宇宙望遠鏡などの強い重力レンズデータとす

ばる望遠鏡による弱い重力レンズデータを組み合わせることで、銀河団中心部からヴィリアル半径にわたる質量プロファイルの測定が可能です⁷⁾。

このようななか、2007年の秋、山形蔵王で銀河団研究会「マクロでマイクロな銀河団研究会」⁸⁾が開催されました。プラズマのミクロスケールから宇宙論のマクロスケールまで多岐にわたる銀河団物理について、さまざまなフィールドの研究者が集まって議論や情報交換を行いました。そこで、日本のX線研究者と重力レンズ研究者が共同して銀河団観測を推進することで意見が一致し、すざく衛星とすばる望遠鏡のデータの統合解析を目指すこととなりました。今回のエイベル1689銀河団の観測結果は、そこから生まれた大きな成果の一つです。いまでは、このように重力レンズとX線を組み合わせて銀河団の物理状態の理解を目指す統合解析は、銀河団研究の主流の一つになりつつあります⁹⁾。

銀河団は、現在でもその巨大な重力によって外側から物質が降着し、成長していると考えられています。銀河団外縁部はこのような質量降着の現場ですので、その影響を強く受ける外縁部のガスの特徴を調べれば、銀河団の成長を知る重要な手がかりが得られるはずですが、銀河団よりも大きな空間スケールを見てみると、宇宙の中で物質は一樣に広がっているのではなく、密集しているフィラメント状の領域と、ヴォイドと呼ばれるほとんど存在していない領域に分かれます。フィラメント構造は互いに交差しあい、「宇宙の大規模構造」と呼ばれる巨大な網の目状の構造を形成しています。網の交差する場所では、銀河とガスが高い密度で集中して、銀河団が形成されます。宇宙の大規模構造は、実際にスローンデジタルスカイサーベイのような光学探査で、銀河の集合として観測されています。また、フィラメント構造には銀河だけでなく、数値シミュレーション¹⁰⁾などから、温度が10万から1,000万度の中高温銀河間物質(WHIM)が分布していると予想されていま

す。これはまだ実際には見つかっていませんが、宇宙の中の普通の物質（バリオン）の半分を占めると考えられており¹¹⁾、すざく衛星でも探査が進められている重要な課題の一つです。銀河団への質量降着において、フィラメント方向は絶えず銀河や WHIM が銀河団に降り注いでいるため、ヴォイド方向とは異なる成長をしているはずです。私たちは、大規模構造という宇宙論的な環境下で、銀河団がどのように進化しているのか、「すざく」を使って研究しようと考えました。

銀河団の質量は銀河団ガスや銀河だけでは説明できません。その質量の大半を担っているのが、暗黒物質と呼ばれる未知の物質です。ですから、銀河団の成長を知るには、外縁部の銀河団ガスだけでなく、暗黒物質の情報も必要になります。暗黒物質は光を発しないので、直接見ることはできませんが、重力の物理を使って質量の分布を測定することができます。それが、前述した重力レンズ解析です。暗黒物質が大半を占める銀河団の巨大な質量は、背景にある銀河の形状を歪ませる重力レンズ現象を引き起こします。この重力レンズ現象を観測することで、銀河団の質量分布が測定できるのです。実は X 線の観測でも、銀河団ガスが暗黒物質の重力による収縮と圧力勾配による膨張とが釣り合った静水圧平衡にあると仮定すれば、動径方向の質量プロファイルを測定することができます。しかし、銀河団ガスが必ずしも静水圧平衡にあるという保証はありません。もし銀河団ガスの中に巨視的な運動や乱流¹²⁾があって、非熱的圧力が存在すれば、質量を過小評価してしまいます^{13), 14)}。重力レンズ解析は銀河団ガスの物理状態によらず質量分布を測定できるので¹⁵⁾、X 線と重力レンズ解析は相補的な観測手法と言えるでしょう。両方の観測を用いると、銀河団の構成要素である銀河、銀河団ガス、そして暗黒物質の分布を比較することができます⁹⁾。また、ガスの静水圧平衡と重力レンズから求めた質量を比較することにより、ガスがどれくらい静水圧平衡からず

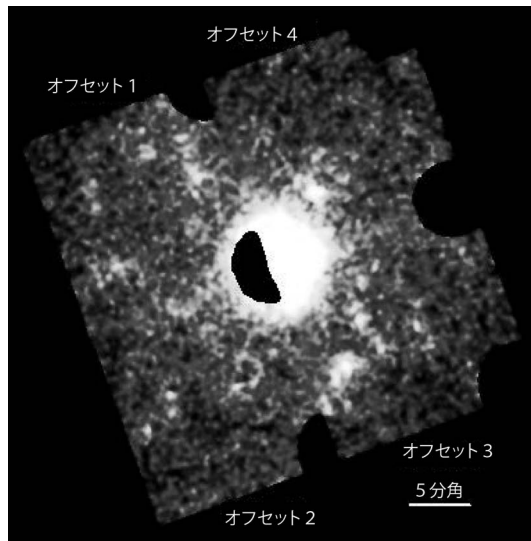


図1 すざく衛星による銀河団エイベル 1689 の X 線画像。オフセット 1-4 の四つのポインティング観測を行った。

れているのか、テストすることができます¹⁶⁾。私たちは、「すざく」による外縁部ガスの観測を最大限に生かすために、以上の 2 点、すなわち 1) 大規模構造の情報と 2) 重力レンズの情報を X 線解析と組み合わせるといふ工夫をしました。

2. すざく衛星によるエイベル 1689 外縁部の X 線観測

銀河団の外縁部を観測する際には、効率良く薄い X 線放射を受ける観測計画を立てる必要があります。X 線ミラーの光軸にあたる X 線 CCD の中心ほど、X 線の検出効率が高くなりますので、外縁部ができるだけ感度の良いところになるように適切なポインティングをしなければなりません。その際、重力レンズ解析で測定されたヴィリアル半径の情報が役立ちます。中心部だけを見ていた既存の X 線観測では、ヴィリアル半径を外挿から決定する必要がありますし、なによりガスが静水圧平衡からずれていた場合、誤ったヴィリアル半径を導出する可能性があります。そこで私たちが最初のターゲットとして選定したのが、強

弱重力レンズ解析により銀河団中心からヴィリアル半径までの質量プロファイルがよく決まっているエイベル 1689 です^{7), 17)}。エイベル 1689 の質量プロファイルは、数値シミュレーションから期待される普遍的動径プロファイル（以下、論文著者の名前にちなんで **NFW** プロファイル¹⁸⁾）が強く支持されています。NFW プロファイルでは、内側の傾きは動径方向の距離の -1 乗、外側の傾きは -3 乗になります。私たちの問題設定の一つは、このように **NFW** プロファイルが強く支持される典型的な銀河団で、ガスの温度・密度・圧力・エントロピーが銀河団の外側でどのようにしているかを調べることです。銀河団ガスのエントロピーは、 $(\text{ガスの温度})/(\text{ガスの密度})^{2/3}$ で定義され、ガスの状態がどれくらい乱雑かを表していません。

エイベル 1689 のすざく衛星による観測は、外縁部からの X 線放射を効率良く観測するため、四つのオフセットポインティング（図 1、表紙）で、2008 年の 7 月に約 4 日間にわたって行われました。観測後に私たちがまず最初に行ったのが、本当に外縁部からの淡い X 線放射を受けているかどうかの確認です。すざく衛星の低雑音をもってしても、この放射の検出は容易ではありません。私たちは細心の注意を払って、検出器由来の雑音と、天球上からやってくる宇宙 X 線背景放射の寄与を見積もりました。また、「すざく」は空間分解能が約 2 分角とさほど良くないため、点源や銀河団の内側からの X 線放射の漏れ込みも評価しました。その結果、あらゆる系統誤差を考慮に入れても、ヴィリアル半径（中心から 15.6 分角 = 2.9 Mpc）付近で、 4σ の有意度でエイベル 1689 からの X 線を検出することに成功したのです。

2.1 ガスの非等方性の発見

外縁部まで X 線の検出に成功したので、私たちは X 線のスペクトル情報から、ガスの温度・密度・エントロピーの空間分布を作成しました。図 2 はオフセット 1-4 と全領域のプロファイルで

す。温度は半径 10 分角以下では、誤差の範囲内で方向に関係なく一致しています。外縁部の 10-18 分角の領域では、北東方向にあるオフセット 1 のみ温度が約 6,000 万度と高く、中心部の温度と比べても半分程度なのに対して、その他のオフセット 2-4 の領域では、温度が約 2,000 万度と中心部の温度の 5 分の 1 程度になっています。ニュートン衛星による銀河団中心部の観測から統計的に得られた温度の平均的プロファイルを外縁部まで外挿すると、オフセット 1 領域の温度と一致し、その他の領域の温度は低い方に外れることがわかりました。

ガス密度に関しては、誤差の範囲でどの半径でもオフセットごとの違いはありません。ただし、外縁部でのガス密度プロファイルの傾きを調べると、レンズモデルで強く支持される **NFW** プロファイルの傾きの -3 乗に比べて、 -1.2 乗（誤差の上限値でも -1.8 乗）と緩やかになっていることがわかりました。このことから、ガスが質量プ

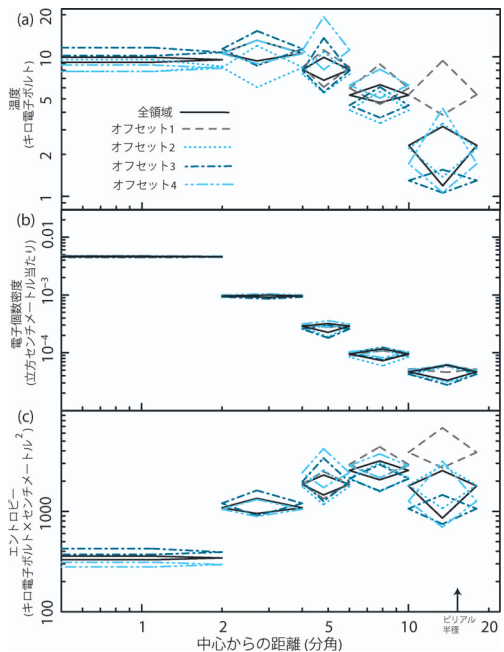


図 2 エイベル 1689 の中心部からヴィリアル半径までの温度・密度・エントロピープロファイル。

ロファイルに比べて広がっている可能性があります。

エントロピープロファイルは、オフセット1方向のみ、半径が大きくなるほど上昇していますが、その他の領域では外縁部で下がっています。理論モデルによると、落ちてきたガスの運動エネルギーが衝撃波によって熱エネルギーに変換される(熱化する)と考えられており¹⁹⁾、そのとき、ガスの「乱雑さ」が増して、エントロピーが増加します。理論から期待される典型的なエントロピー分布の傾きは、オフセット1方向では観測と一致しますが、その他の外縁部では期待される値よりも低くなり、一致しません。このことは、温度のプロファイルと合わせ、オフセット1方向以外の外縁部ガスは十分に熱化していないことを示唆しています。

エイベル 1689 銀河団の中心部からヴィリアル半径までの全領域を網羅し、銀河団ガスの物理量を測定した結果、外縁部ガスの温度とエントロピーに明らかな非等方性が発見されたのです。

2.2 何が銀河団外縁部ガスの非等方性と関係しているのか？

では、何が外縁部ガスの非等方性と関係しているのでしょうか？最初に述べたように、銀河団の外縁部は外部からの質量降着と密接に関係している可能性があります。そこで、私たちはスローンデジタルスカイサーヴェイの測光データを使い、エイベル 1689 の赤方偏移にある銀河団周辺の銀河の2次元分布を作成しました。図3は銀河団の3×3倍の広さで描いた銀河の2次元分布と、銀河団の温度分布を重ね合わせた図です。等高線は銀河の密度分布を表しています。これにより、銀河団外縁部におけるガスの温度構造は外側の大規模構造と明らかな相関があることが発見されたのです。北東方向(図3の左上方向)の外縁部にある高温のガス領域は、その外側にある銀河のフィラメント構造と直結しています。対照的に、その他の低温部分は銀河がほとんどいないヴォイドに面し

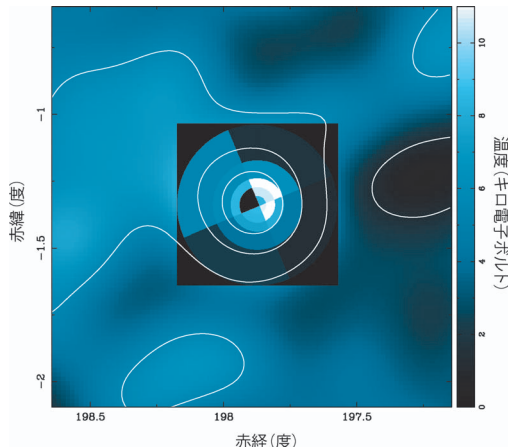


図3 銀河団の3×3倍の領域(一辺は約12メガパーセク)で見た銀河の個数分布の中心に、銀河団ガスの温度分布(黒の四角の中)を重ねたもの。銀河分布では、明るい青ほど、銀河の密度が高い。ガスの温度分布では、明るい青ほど、温度が高い。右のカラースケールはガス温度の高低を表している。図の左上が北東方向で、大規模構造と銀河団外縁部ガスの温度に明らかな相関が見られる。

ています。これは、フィラメント方向で銀河団ガスの熱化が早く進んでいることを示しています。

2.3 X線・重力レンズ統合解析

もう少し詳しく銀河団ガスの特徴を見ていきましょう。私たちは、外縁部で温度が高いオフセット1領域と、温度が低いその他の領域(オフセット234)、そして全領域のガスの特徴を調べました。まず、静水圧平衡の仮定の下、銀河団ガスの温度と密度から銀河団の総質量を計算しました。すると、ある半径の球の中に含まれる質量は、半径が増加するほど増えていくはずなのに、オフセット234と全領域では外縁部の温度が低いため、外縁部で質量が減少してしまうという結果が得られました。このことは、オフセット234領域では、銀河団ガスは静水圧平衡にないことを示唆しています。ほかに考えられるのは、ガスは静水圧平衡にはあるが、電子温度とイオン温度が異なるという可能性です。私たちがX線で観測している温度は電子の温度です。降着流に起因す

る運動エネルギーが熱エネルギーに変換される際に、粒子1個あたりがもっている運動エネルギーは、イオンのほうが電子に比べ約1,800倍大きいため、熱化したガスの温度はイオンのほうが高くなります。しかし、イオンと電子はクーロン衝突を通して4億年程度で熱的に緩和しますし、実際には衝撃波周辺のプラズマの運動論的不安定性が、プラズマ振動数 ($\sim 600(n_e/10^{-4} \text{ cm}^{-3})^{1/2} \text{ s}^{-1}$) の逆数で与えられるような短いタイムスケールで効いてきます。ここで n_e は電子の数密度です。これらは数十億年という銀河団の力学的な時間スケールに比べて十分に短いので、イオン温度と電子温度の差が見えている可能性は低いといえます。

次に、ガスの静水圧平衡を仮定して求めた質量と、重力レンズから求めた質量を比較してみましょう(図4)。静水圧平衡質量は、中心部(約7分以内)でだけ成り立っているため、両者の比較は中心部に限られます。質量モデルはNFWプロファイル、球対称モデル、三軸不等モデルを採用しました。ここで、球対称モデルはNFWプロファイルなどの特定のプロファイルを仮定しないモデルです。また三軸不等モデルは、銀河団の形状が球対称ではない場合を考えています。静水圧平衡質量はNFW・球対称モデルに比べて小さくなりますが、三軸不等モデルの場合、大きい誤差の範囲内で4-7分の領域で一致します。一方、半径2分よりも内側では、質量モデルに関係なく、静水圧平衡質量は重力レンズ質量に比べ低いことがわかります。このことは、銀河団の中心領域にあるガスが重力に釣り合うためには、ガスの温度と密度から決まる熱的なプラズマの圧力に加えて、圧力に寄与する別の成分が必要であることを示唆しています。

上記の質量の比較では、外縁部ではガスが静水圧平衡にないため、ガスから求めた質量と重力レンズ質量を比較することができませんでした。そこで私たちは、ガスの熱的な圧力と、ガスが球対称なレンズ質量を支えるのに必要な総圧力を比較

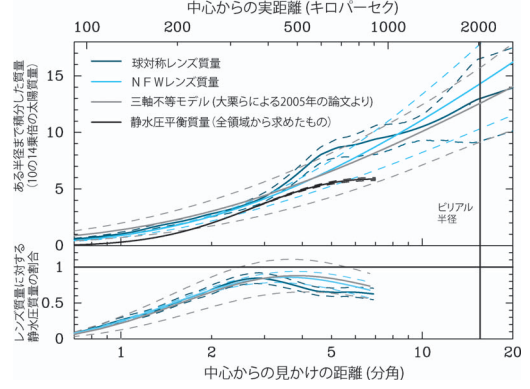


図4 重力レンズ質量と静水圧平衡質量の比較.

することにしました。総圧力は、私たちのもつ重力レンズの質量と銀河団ガスの密度データから、特別な理論モデルや仮定なしに計算できます。

図5のように、オフセット1方向の外縁部では熱的圧力は総圧力とほぼ等しいですが、オフセット234方向の外縁部の熱的圧力は総圧力の40%程度にすぎません。また中心の領域では50%程度になっていることがわかりました。これらの値は三軸不等モデルを考慮に入れていませんので、下限値ではありますが、中心部で示唆された、熱的圧力とは別の圧力成分が、外縁部でも存在していることを示しています。このように熱的圧力と総圧力の比を制限したのは今回が初めてです。他の圧力源として最も有力なのは、ガスの乱流や超音速で動くガスの巨視的な運動に起因する非熱的圧力です。特に、オフセット234方向の外縁部では、エントロピーも足りていないことから、外部からの物質の降着による衝撃波が弱くてガスの熱化が十分に進んでおらず、降着してきた物質の動的な圧力がその一端を担っている可能性が十分にあります。また、もし中心部などで、足りない圧力を乱流が担っているとすると、日本の次世代X線衛星ASTRO-H²⁰が搭載するX線カラーメーターで直接観測されることが期待されます。

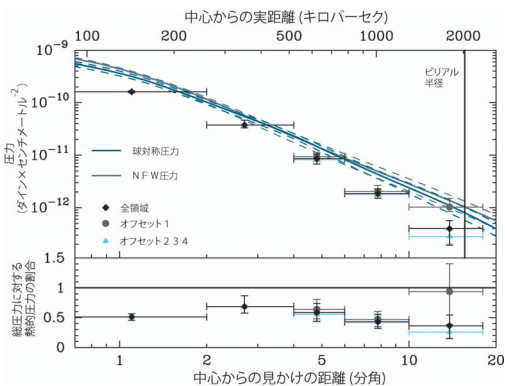


図5 熱的圧力と重力レンズ質量を維持するために必要な総圧力。

3. ま と め

私たちは、すざく衛星を使ってエイベル 1689 銀河団の観測を行い、中心からヴィリアル半径の全領域にわたる X 線観測を世界で初めて行いました。また、光学撮像データと重力レンズデータを組み合わせて解析することにより、銀河団ガスの特徴や質量との関係などを明らかにしました。特に外縁部ガスの特徴は銀河団周辺の宇宙論的環境に強く依存し、大規模構造のフィラメント方向とヴォイド方向とで外縁部ガスの温度やエントロピーが大きく異なることを発見しました。

- 1) フィラメント方向と接している銀河団外縁部ガスの温度は中心部温度の半分程度と高温であり、レンズ質量を維持するだけの熱的圧力をもっている。
- 2) ヴォイド方向と接している銀河団外縁部ガスの温度は中心部温度の 5 分の 1 程度と低く、静水圧平衡の状態にない。また、熱的圧力は総圧力に比べて低く、エントロピーも期待される値よりも低い。

これらは、宇宙論的な環境下で大規模構造の影響を受けて銀河団が成長・進化する姿を明らかにした、重要な発見であると私たちは考えています。特に、フィラメント方向とヴォイド方向でガスの熱化の進行度が違うことは、銀河団の進化を

理解するうえで重要な鍵となります。どうしてこのような違いが生じるのか、理論に基づく定量的な評価はまだ不十分ですが、今後は宇宙論的な数値シミュレーションから研究が進むものと期待されます。観測的にも、私たちのような観点・アプローチで行われた外縁部観測は、まだエイベル 1689 しかなく、とうていデータが十分にあるとは言えません。本当に大規模構造と銀河団外縁部の相関が、他の銀河団でも同様に観測されるのでしょうか、それとも銀河団ごとに個性が強く、エイベル 1689 のように相関が強く見られるものか、そうでないものがあるのでしょうか。現在多くのグループが「すざく」を使って銀河団外縁部の観測を行っており、その成果が期待されます。私たちのグループでも、すざく衛星とすばる望遠鏡などを組み合わせた、さらなる観測を推進中です。

私たちは今回、すざく衛星の高い感度のおかげで、銀河団の外縁部ガスと大規模構造との相互作用を発見することができました。このことは、かつてチャンドラ衛星が、その高い空間分解能で、中心部の銀河団ガスと活動中心核との相互作用を発見したときと同じような重要性と発展性を秘めているかもしれません。銀河団外縁部の X 線観測は「すざく」でしか到達できないフロンティアであり、すばる望遠鏡・主焦点カメラによる弱い重力レンズ解析との強力なコンビネーションによって、日本のコミュニティーが世界をリードする分野へと成長させたいと考えています。

多波長観測は、今後ますます銀河団研究の主流となると予想されます。今回ご紹介したような、X 線と光学、重力レンズだけでなく、宇宙マイクロ波背景放射を銀河団ガスが逆コンプトン散乱した影響を見るスニヤエフ・ゼルドビッチ効果の観測や、電波による相対論的電子からのシンクロトン放射の観測など、さまざまな波長のデータを使った統合解析が、新しい銀河団研究を切り開いていくことでしょう。さらに、すばる望遠鏡の次期観測装置であるハイパーシュプリームカムの時

代になると、多くの銀河団の質の良い光学データが得られるようになります。このような大量のサンプルを前に、銀河団の物理を理解していくためには、日本の X 線と光学のコミュニティーが一致協力して研究を進めていくことが今後ますます重要になってきます。そういった意味で、今回の私たちの研究協力が、次の時代へのさきがけとなったとすれば、これほど喜ばしいことはありません。

謝 辞

本論文の共著者である、梅津敬一氏、滝沢元和氏、松下恭子氏、深沢泰司氏、浜名 崇氏、宮崎聡氏、中澤知洋氏、大橋隆哉氏に感謝いたします。また、本プロジェクトのきっかけを作ってくださった研究会「マクロでマイクロな銀河団研究会」の SOC および LOC の皆様に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Fukazawa Y., et al., 1998, PASJ 50, 187
- 2) Makishima K., et al., 2001, PASJ 53, 401
- 3) Fabian A.C., et al., 2003, MNRAS 344, L43
- 4) Markevitch M., et al., 2000, ApJ 541, 542
- 5) Markevitch M., et al., 2002, ApJ 567, L27
- 6) Miyazaki S., et al., 2002, PASJ 54, 833
- 7) Broadhurst T., et al., 2005, ApJ 619, 143L
- 8) <http://ksirius.kj.yamagata-u.ac.jp/~zao2007/>
- 9) Okabe N., Umetsu K., 2008, PASJ 60, 345
- 10) Yoshikawa K., et al., 2001, ApJ 558, 520
- 11) Fukugita M., et al., 1998, ApJ 503, 518
- 12) Schuecker P., et al., 2004, A&A 426, 387
- 13) Evrard A. E., 1990, ApJ 363, 349
- 14) Nagai D., et al., 2007, ApJ 655, 98
- 15) Okabe N., et al., 2010, PASJ 62, 811
- 16) Zhang Y.-Y., et al., 2010, ApJ 711, 1033
- 17) Umetsu K., Broadhurst T., 2008, ApJ 684, 177

- 18) Navarro J. F., et al., 1997, ApJ 490, 493
- 19) Tozzi P., Norman C., 2001, ApJ 546, 63
- 20) Takahashi T., et al., 2008, Proc. SPIE 7732, 77320Z

Suzaku Observation of Abell 1689: Anisotropic Temperature and Entropy Distributions Associated with the Large-Scale Structure

Madoka KAWAHARADA

*Institute of Space and Astronautical Science,
Japan Aerospace Exploration Agency, Yoshinodai
3-1-1, Chuo-ku, Sagami-hara, Kanagawa 252-
5210, Japan*

Nobuhiro OKABE

*Institute of Astronomy and Astrophysics, Academia
Sinica, P.O. Box 23-141, Taipei 10617, Taiwan,
R.O.C.*

Abstract: The structure of the universe is made up of low density voids and overdense filamentary structures of galaxies, contacting with galaxy clusters. Our *Suzaku* X-ray observations, which detect faint X-ray emissions from the intracluster medium (ICM) in Abell 1689 out to the virial radius, unveiled the anisotropic temperature structure in the outskirts: regions in contact with the filamentary structures and voids apparently have high and low gas temperatures, respectively. It indicates that galaxy clusters evolve affected by the surrounding large-scale structure environments. Furthermore, we found that the thermal gas pressure in the outskirts contacting voids is much lower than the total pressure to balance fully the gravity of the spherical lensing mass. It indicates that the gas, deviating from hydrostatic equilibrium, requires the non-thermal pressure. In this article, we introduce the results based on our approach, joint analysis of galaxy clusters, incorporating X-ray, optical and lensing data.