

XMM-Newton 衛星による 低表面輝度銀河団 A2328 と A1631 のエントロピー測定

新郷 沙耶 (奈良女子大学大学院 人間文化研究科 物理科学専攻)

Abstract

銀河団は自己重力系としては宇宙で最大の天体である。一般に銀河団は大量のダークマターを含み、その重力ポテンシャルにガスが落ち込んで、次第に中心集中した分布になると考えられている。したがって銀河団は進化するにつれて X 線表面輝度が上昇し、かつガス加熱によってエントロピーが高くなると予想される。しかし、ROSAT 衛星や XMM-Newton 衛星の観測により、表面輝度が低い一方でエントロピーが高いという特異な銀河団が数個発見された。この過剰なエントロピーの原因は従来の加熱機構のみでは説明が難しく、詳細はまだ解明されていない。この原因を探るため、本研究では XMM-Newton 衛星を用いて低表面輝度銀河団 A2328($z = 0.1475$) と A1631($z = 0.0462$) の X 線スペクトル解析を行い、エントロピー分布を求めた。その結果、エントロピーは中心でそれぞれ $\sim 300 \text{ keVcm}^2$, $\sim 400 \text{ keVcm}^2$ と求められた。これは重力的な加熱を考えた理論予測値と比べて、およそ 2 倍大きい。また、どちらの銀河団もガス密度が低く不規則な形態をしていることから、これらの銀河団は進化の初期段階にあるのではないかと考えられる。このことからエントロピー過剰の原因として、ガスの加熱に対して中心集中が遅れている可能性がある。

1 銀河団と低表面輝度銀河団

1.1 銀河団とは

銀河団とは、数百から数千個の銀河が、数 Mpc 程の大きさの領域に密集している天体である。およそ $10^{14} \sim 10^{15} M_{\odot}$ の質量を持ち、重力的に束縛された天体としては宇宙で最大の天体となる。

銀河団は 2 % の銀河, 13 % の銀河, 85 % のダークマターで構成される。ガスの温度は $10^7 \sim 10^8 \text{ K}$ で、このガスが熱制動放射により X 線を放射している。我々はこの X 線を観測することで、銀河団の特性を探ることができる。また典型的な銀河団の場合、X 線光度は $10^{44} \sim 10^{45} \text{ erg s}^{-1}$ 、ガスの密度は $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ cm}^{-3}$ である。

X 線観測から求まる銀河団の進化の指標として、表面輝度とエントロピーがある。一般に銀河団ガスは、ダークマターの持つ重力ポテンシャルに落ち込み、中心に密度の高いコアとべき関数的に減少するエンベロープを持つ分布を形作る。銀河団の形成過程でガスは加熱されてエントロピーが増加し、ガスの密度が高くなるにつれて表面輝度が上昇する。また、銀河団の形態は不規則型からより対称性の良い

規則型へ進化する。

銀河団の進化のタイムスケールは $10^9 \sim 10^{10}$ 年であり、宇宙初期の条件を記憶している可能性が高い。ゆえに宇宙空間における物質進化の謎を探るためには、銀河団の進化過程を探ることが重要となる。

1.2 低表面輝度銀河団

ROSAT 衛星や XMM-Newton 衛星の観測により、表面輝度が非常に低いにも関わらずエントロピーが高いという銀河団が数個発見された。このような銀河団は低表面輝度 (Low Surface brightness; LSB) 銀河団と呼ばれる。

先行研究として、低表面輝度銀河団 A76($z = 0.0395$) の「すざく」衛星による観測がある。A76 は $\sim 2.0 \times 10^{-3} \text{ cts s}^{-1} \text{ arcmin}^{-2}$ という、ROSAT 衛星で観測されたサンプルのなかで最も低い X 線表面輝度を持つ銀河団である (Neumann&Arnaud 1999)。「すざく」衛星のスペクトル解析から A76 は中心領域において、ガス密度が $\sim 1.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-3}$ 、エントロピーが $\sim 400 \text{ keVcm}^2$ と報告された (Ota et al. 2013)。このエントロピーは他の銀河団に比べて高い

値である。さらに A76 は温度が高く (約 3.3 keV)、形態が不規則という特徴を持つこともわかっている。

このような結果から、低表面輝度銀河団は力学的には若いにも関わらず熱的進化が進んでいると考えられている。よって低表面輝度銀河団は、通常の銀河団とは異なる加熱機構を持つ可能性があるが、詳細を解明するにはさらに研究を行う必要がある。

2 目的

低表面輝度銀河団である A2328 と A1631 に注目して X 線スペクトル解析を行うことで、ガス密度とエントロピーを算出する。さらに、エントロピーを他の銀河団と比較し、低表面輝度銀河団の進化過程について考察する。

3 XMM-Newton 衛星と観測

今回の研究では、XMM-Newton(以下 XMM) 衛星による観測データを用いた。XMM 衛星は空間分解能と有効面積に優れた X 線天文衛星である。

解析には EPIC MOS 検出器によるデータを用いた。エネルギーバンドは 0.15 ~ 12.0 keV、視野の大きさは 30'、空間分解能は 14"、有効面積は 922 cm²@1 keV である。データ解析には、SAS version 12.0.1 を使用した。表 1 に A2328 と A1631 の基本的な観測情報を示す。

表 1: X 線観測の情報

	A2328	A1631
redshift	0.1475	0.0462
(RA,DEC) ¹	(312.0,-17.80)	(193.1,-15.40)
X 線フラックス ²	5.9×10^{-12}	3.4×10^{-12}
観測時間 ³	44.3	38.3

¹ [deg] (J2000)

² [erg s⁻¹ cm⁻²] 0.1 ~ 2.4 keV バンドの X 線フラックス

³ [ksec]

4 解析

4.1 手法

銀河団のガスは光学的に薄いプラズマであり、その放射は主に熱制動放射と重元素からの輝線放射で説明される。X 線スペクトルの形と強度 (normalization) から、ガスの温度や重元素量を求めることができる。

銀河団のエントロピーは、

$$S = \frac{kT}{n_e^{2/3}} \quad (1)$$

で定義される。 n_e は、normalization が $\propto n_e^2$ の依存性を持つことより計算できる。よってスペクトル解析を行って温度と n_e を求めることで、エントロピーを算出した。

またスペクトル解析を行う際、三次元でのガスの温度等を調べるために deprojection 解析を行った。観測される X 線放射は、視線方向に積分されて二次元に投影されたものである。これをガス分布が球対称であると仮定して三次元の情報へ変換する方法を、deprojection 解析という。その概略図を図 4.1 に示す。

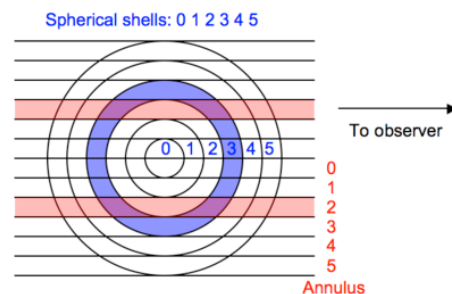


図 1: deprojection 解析の概略図 (CXC/Harvard より)

4.2 イメージ解析

銀河団の形状を確認し、スペクトル解析を行う領域を決定するため、イメージ解析を行った。図 2 に A2328 の X 線イメージを示す。イメージより、A2328 は不規則な形態をしていることがわかる。さらに表面輝度の半径分布を作成し、銀河団の放射の最大半径を見積もることで、スペクトル解析を行う領域を決定した。

実際の A2328 のスペクトル解析では、リングの幅を 1' とし、最大 5' までの 5 つの円環領域を使用した。A1631 ではリングの幅を 6' とし、最大 18' までの 3 つの円環領域を使用した。ただし A1631 からは、フォアグラウンドの銀河群 NGC4756 を半径 3' の円環領域として除外している。

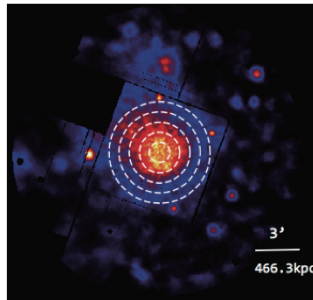


図 2: A2328 の X 線イメージ。(312.0, -17.80) を中心とし、幅 1' の 5 つのリングをスペクトル領域とした。

4.3 スペクトル解析

イメージ解析で決定した領域からスペクトルを抽出し、XSPEC version 12.8.0 を用いてモデルフィットを行った。各球殻のスペクトルは phabs*apec で表されると仮定し、deprojection を実行するために project モデルを使用した。ここで、phabs は光電吸収を再現するモデル、apec は熱制動放射を再現するモデルである。

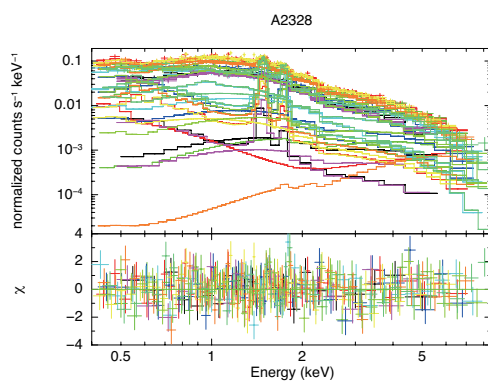


図 3: A2328 のスペクトル。MOS1 検出器: 0'-1'(黒), 1'-2'(赤), 2'-3'(緑), 3'-4'(青), 4'-5'(水色), MOS2 検出器: 0'-1'(桃), 1'-2'(黄), 2'-3'(橙), 3'-4'(黄緑), 4'-5'(青緑)。パネル上部は各球殻のスペクトルと最適モデル、下部はスペクトルと最適モデルとの残差を表している。

5 結果

モデルフィットで得られたガス温度の半径分布を図 4 に示す。半径に対して温度のばらつきが見られるが、平均するとガス温度は A2328, A1631 それぞれで 4.5 keV, 2.9 keV となった。半径はビリアル半径 r_{200} で規格化した。 r_{200} とは、臨界密度の 200 倍の密度となる半径のことで、今回は Arnaud et al.(2005) による経験則を用いた。ビリアル半径で規格化することで、規模の異なる他の銀河団との比較が容易となる。

また、スペクトル解析の結果からガス密度とエントロピーを算出した。求めた結果を図 5 に示す。破線は重力加熱のみを考えたときのエントロピーを表しており、6 節で詳細を述べる。

これらの結果から A2328, A1631 は、表面輝度が低いにも関わらずエントロピーが高く、かつ形態が不規則という A76 と同様の傾向を持つことがわかる。

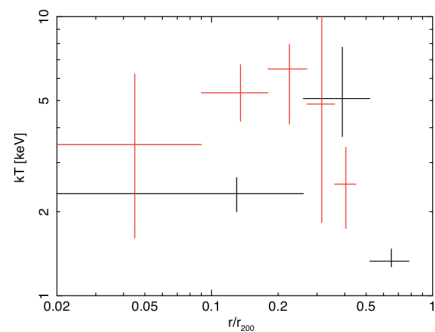


図 4: A2328(赤) と A1631(黒) の温度分布。

6 議論

以下では他の銀河団とエントロピーを比較し、過剰エントロピーの起源について議論する。

求めたエントロピーを REXCESS(The Representative XMM-Newton Cluster Structure Survey) サンプル (Pratt et al. 2010) と比較した。結果を図 6 に示す。これより、A2328, A1631 は他の天体と比べエントロピーが高いことがわかる。

過剰エントロピーがどの程度かを評価するために加熱機構が重力のみだと仮定すると、 $S \propto r^{1.1}$ が成

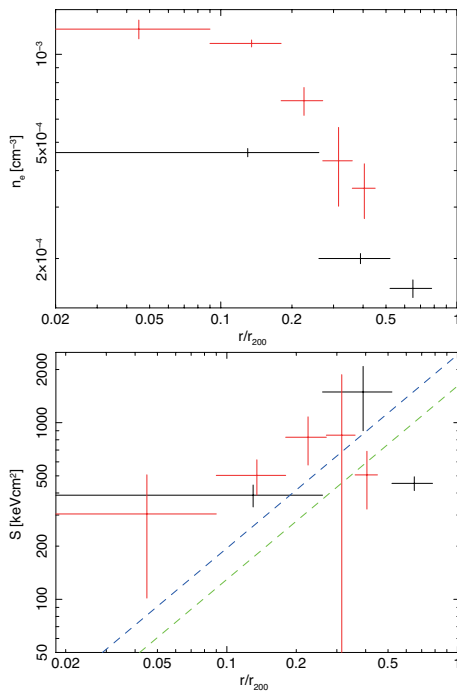


図 5: A2328(赤) と A1631(黒) の、(上) ガス密度と (下) エントロピー分布。破線は A2328(青) と A1631(緑) において、重力加熱のみを考えたときのエントロピーを表す。

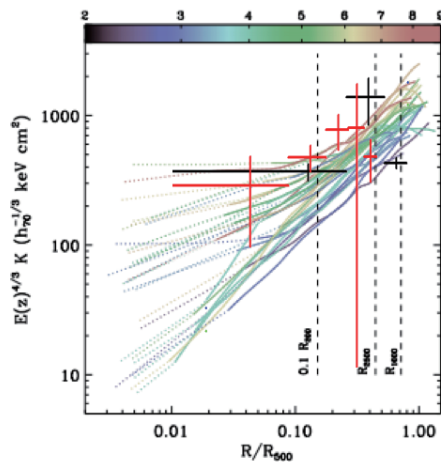


図 6: A2328(赤)、A1631(黒) のエントロピーと REXCESS サンプル (Pratt et al. 2010) との比較。

り立つ (Voit et al. 2005)。この理論予測と比べ、スペクトル解析から得たエントロピーはおおよそ 2 倍高い。このことから、重力以外の加熱機構が働いていると予測される。

重力以外の加熱機構について、ガスが銀河団のポ

テンシャルに落ち込む前に加熱されていたとするプレヒーティングと、AGN ジェットがガスの加熱に影響する AGN フィードバック (Wang 2011) とが考えられている。しかし、プレヒーティングで生成されるエントロピーは $\sim 140 \text{ keVcm}^2$ (Ponman et al. 2003)、A76 における AGN フィードバックの寄与は $\sim 1 \text{ keVcm}^2$ (Ota et al. 2013) であることから、これらの加熱機構だけでは説明が難しい。またガス密度が低く不規則な形態をしていることから、ガスの加熱は進んでいるが、それに対して中心集中が遅れている進化途中の銀河団だと考えられる。

7 まとめ

低表面輝度銀河団の起源を探るため、XMM 衛星を用いて A2328 と A1631 の X 線スペクトル解析を行い、3次元でのエントロピー分布を求めた。特に A1631 ではこのような解析が行われたのは初めてである。結果、エントロピーは中心でそれぞれ $\sim 300 \text{ keVcm}^2$, $\sim 400 \text{ keVcm}^2$ と他の銀河団と比べ高い値となった。さらにどちらの銀河団も不規則な形態をしており、低表面輝度銀河団 A76 と同様の特徴を持つ。

これらには従来の考え方とは異なる加熱機構が関連している可能性があり、またガス加熱に対し中心集中が遅れている若い銀河団であると考えられる。今後進化が進めば、通常の銀河団と同程度のエントロピー分布を持つと推察する。

参考文献

- [1] Arnaud, M., et al. 2005, A&A, 441, 893
- [2] Neumann, D.M., & Arnaud, M., 1999, AA, 348, 711
- [3] Ota, N., et al. 2013, A&A, accepted
- [4] Ponman, T.J., et al. 2003, MNRA, 343, 331
- [5] Pratt, G.W., et al. 2007, A&A, 461, 71
- [6] Pratt, G.W., et al. 2010, A&A, 511, A85
- [7] Trinchieri, G., et al. 2012, A&A, 545, A140
- [8] Voit, G.M., et al. 2005, MNRA, 364, 909
- [9] Wang, Yu. 2011, JAA, 32, 33