

銀河団外縁部のエントロピー異常の原因検証

栗山 翼 (東京理科大学大学院 理学研究科)

Abstract

銀河団は小さな構造から衝突合体を繰り返して成長してきたと考えられ、現在も大規模構造から質量降着を受けている。銀河団のエントロピーは質量降着時の衝撃波加熱だけの影響を考えると半径の 1.1 乗に比例して上昇すると考えられていた。しかし「すざく」衛星を用いて銀河団外縁部をピリアル半径まで観測した結果、エントロピーは $0.5 r_{200}$ までしか上昇せず、外側はほぼ一定の値となることが観測された (e.g., T. Sato et al. 2012)。この異常の原因として銀河団外縁部のガス塊による密度の過大評価が挙げられている (e.g., Simionescu et al. 2011)。そのため銀河団外縁部のガス塊を観測すればエントロピーが受ける影響を評価することが出来る。

我々は近傍の中規模銀河団である Abell 2199 銀河団の外縁部について「XMM-Newton」衛星と「すざく」衛星を用いて観測した。その結果「すざく」衛星で 146 個、「XMM-newton」衛星で 85 個の X 線源を検出した。これらの X 線源を用いて銀河団外縁部と明るい X 線天体のいない領域との X 線強度と個数密度の関係 ($\log N - \log S$ 関係) を比較したところ X 線源数の超過は確認されなかった。また「すざく」衛星で検出された X 線源について詳細なスペクトル解析を行いガス塊候補の X 線源を調査した結果、14 個がガス塊として有意なスペクトルを示し、そのうち 3 個では可視光との同定によって銀河団に所属している銀河が確認された。 $0.5-1 r_{200}$ の ICM の X 線光度 (0.5-2keV) に対して、ガス塊候補の X 線光度の合計は 2 割ほどであった。この結果から、実際に銀河団の密度が受ける影響は 1 割程度以下であるといえる。

1 はじめに

銀河団は力学的に束縛された宇宙最大の天体であり、可視光では個々の銀河しか見えないが X 線を用いて観測することで銀河団内のバリオンの質量の大半を占める高温ガスを調べることが出来る。宇宙の形成モデルである冷たいダークマターモデルによれば、銀河団は小さな構造から衝突合体を繰り返すことで大きな構造へと成長していき、現在も周囲の大規模構造から質量降着を受けていると考えられている。この質量降着時に銀河団外縁部の高温ガスは衝撃波加熱を受ける。衝撃波加熱の大きさは降着してきたガス塊の重力エネルギーに比例するため、銀河団自身の質量が大きいくほど強くなる。そのため最近質量降着を受けた外側ほど受けた衝撃波加熱が強いことが予想される。衝撃波加熱の指標であるエントロピー $K \equiv kTn_e^{-2/3}$ (k : ボルツマン定数、 T : 温度、 n_e : 電子密度) は重力エネルギーによる加熱のみを考えた数値シミュレーションによって $K \propto r^{1.1}$ (r : 銀河団中

心からの半径) と予測されていた (Voit et al. 2005)。しかし、最近の「すざく」衛星による銀河団外縁部までの観測によって、エントロピーは $0.5 r_{200}$ (r_{200} : ある半径内の銀河団の密度が宇宙密度の 200 倍になる半径 \equiv 銀河団の力学半径) 程度までしか上昇せず、以降はほぼ一定の値となることが確認された (T. Sato et al. 2012; Simionescu et al. 2011; Hoshino et al. 2010; Kawaharada et al. 2010; K. Sato et al. 2014 in Prep.; Bautz et al. 2009; Walker et al. 2012b; Akamatsu et al. 2011; Ichikawa et al. 2013)。このエントロピー異常の原因としては、

1. 銀河団外縁部のガス塊による密度の過大評価 (e.g., Simionescu et al. 2011)
2. 銀河団外縁部の高温ガスにおける静水圧平衡からの逸脱 (e.g., Kawaharada et al. 2010)
3. 観測される電子温度と実際に衝撃波加熱を受けるイオン温度との間のずれ (e.g., Hoshino et al. 2010)

などが挙げられている。本研究では 1 番目の仮説について検証する。

降着してきたガス塊が銀河団ガスと十分混ざっていない場合外縁部のガス密度にはむらが生じる。高温ガスからの X 線の光度は密度の 2 乗に比例するため、この密度むらのもつ高い密度の影響を受けて外縁部の平均密度は過大評価されると考えられる。そのためガス塊の存在を確認することが出来れば密度が受ける影響を評価し得る。ガス塊には周囲よりも明るい X 線源として検出出来るものも存在すると思われるため、銀河団外縁部の X 線源の探査を行った。銀河団外縁部にはガス塊以外にも銀河団内外に存在する活動銀河核などの多くの X 線源が存在するため、ガス塊とこれらの点源とを分けることが重要である。ガス塊とその他の X 線源を分類するために、X 線強度と個数密度の関係 ($\log N - \log S$ 関係) を比較することで点源数を評価し、また個々の X 線源に対する詳細なスペクトル解析を行うことで X 線源の種類を調査した。観測対象には近傍の典型的な中規模銀河団 Abell 2199 ($z = 0.03$, $kT = 4$ keV) を選んだ。この銀河団は「すざく」衛星 AO-6 の key project として 2011 年 8 月 10 月に銀河団外縁部の 16 領域が観測され、外縁部でエントロピーが一定となることが確認されている (K. Sato et al. 2014 in Prep.)。観測衛星としては「XMM-Newton」衛星と「すざく」衛星の 2 衛星を用いた。今回の研究ではハッブル定数 $H_0 = 70$ km/s/Mpc を用い、平坦な宇宙 ($\Omega_{m,0} = 0.27$, $\Omega_{\Delta,0} = 0.73$) を仮定した。指定しない限り誤差は全て信頼度 68% である。

2 観測、解析方法

2.1 「XMM-Newton」衛星による観測と解析

「XMM-Newton」衛星は比較的高い分解能を持つため、点源検出に有効な衛星である。この XMM-Newton 衛星で 2013 年 2 月に観測された 1 領域 (図 1、観測時間 40 ks) を解析した。XMM-Newton 衛星の解析には 3 つの X 線検出器 (MOS1、MOS2、pn) のデータを用いた。SAS "edetect_chain" tool¹ を用

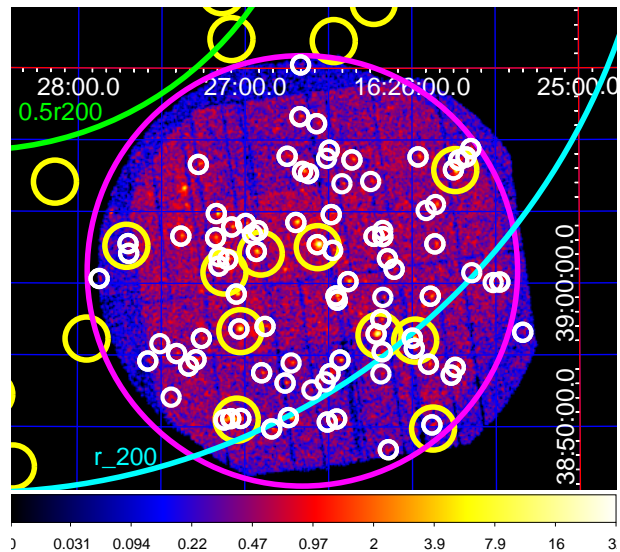


図 1: 「XMM-Newton」衛星の観測領域。エネルギー帯域は 0.3-10 keV である。緑と水色の円が中心からそれぞれ $0.5, 1 r_{200}$ を示している。紫色の円が XMM-Newton 衛星の視野であり、黄色の円がすざくで検出された X 線源の位置、白の円が XMM-Newton で検出された X 線源の位置を示している。

いて点源を検出し、点源の周囲をバックグラウンド領域と考慮して点源領域とバックグラウンド領域の差分に対してスペクトルフィットを行った。X 線源からの放射としては活動銀河核からの放射を仮定し、ベキ関数モデルを用いた。

2.2 「すざく」衛星による観測と解析

すざく衛星で観測された 24 領域 (2006 年 9 月に 5 領域、2010 年 9 月に 1 領域、2011 年 8 月 10 月に 16 領域、2014 年 1 月に 2 領域) による r_{200} までのマッピング観測のデータ (図 2、それぞれ 1 ks ずつ全 24 ks) を用いた。このうち、2006 年 9 月に観測された 5 領域は Abell 2199 銀河団の中心付近であるため、X 線源の検出は行っていない。すざく衛星の解析には 3 つの X 線検出器 (XIS0、1、3) のデータを用いた。X 線源の検出には CIAO の "wavdetect"² を用い、バックグラウンド領域として検出された X 線源が所属する観測領域を取った。バックグラウンド

¹http://xmm.esac.esa.int/sas/current/doc/edetect_chain.pdf ²<http://cxc.harvard.edu/ciao/ahelp/wavdetect.html>

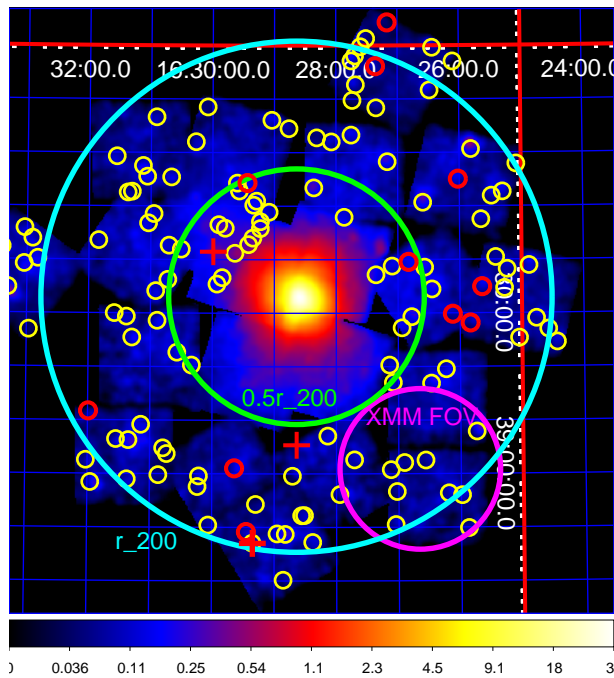


図 2: 「すざく」衛星の観測領域。エネルギー帯域は 0.5-2 keV である。緑と水色の円が中心からそれぞれ 0.5, 1 r_{200} を示している。紫色の円が XMM-Newton 衛星の視野であり、黄色の円がすざくで検出された X 線源の位置を示している。赤の円は有意に熱的な放射を持つ X 線源、赤の十字は有意に熱的な放射を持ち、且つ可視光同定によって銀河団所属の銀河が確認された X 線源である。

領域では銀河団ガスからの放射 (ICM)、宇宙 X 線背景放射 (CXB)、天の川銀河からの放射 (MWH)、太陽系を覆う超新星残骸からの放射 (LHB) の 4 つを仮定し、X 線源領域では X 線源からの放射が加えて検出されるとしてスペクトルフィットを行った。X 線源からの放射としては活動銀河核からの放射と、ガス塊や銀河などの光学的に薄い高温ガスからの放射の 2 種類を仮定した。活動銀河核からの放射を仮定したモデルとしては「XMM-Newton」衛星とおなじべき関数モデルを用いた。ガス塊や銀河などの光学的に薄い高温ガスからの放射を仮定したモデルとしては APEC (Smith et al. 2001) を用いた。

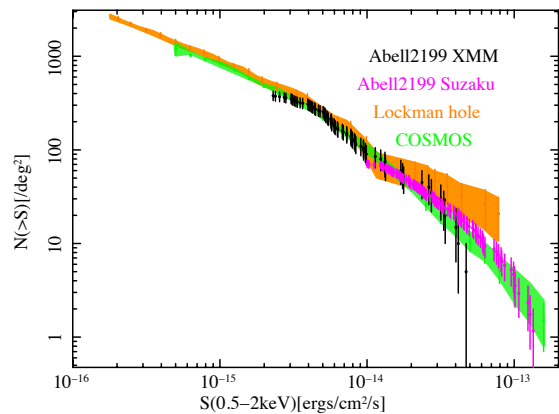


図 3: 0.5-2 keV のエネルギー帯での $\log N$ - $\log S$ 相関図。黒、マゼンダがそれぞれ XMM-Newton 衛星、すざく衛星で検出された Abell 2199 銀河団外縁部方向の X 線源。オレンジは Lockman hole 領域の点源 (Brunner et al. 2008)。緑は COSMOS 領域の点源 (Cappelluti et al. 2009)

3 結果、議論

図 1、図 2 でそれぞれ「XMM-newton」衛星、「すざく」衛星で検出した X 線源位置を示した。「XMM-Newton」衛星では 0.5-2 keV の範囲での X 線強度 2×10^{-15} ergs cm^{-2} s^{-1} 、あるいは 2-10 keV の範囲での X 線強度 7×10^{-15} ergs cm^{-2} s^{-1} をしきい値として X 線源を探索し、85 個の X 線源が検出された。「すざく」衛星では 0.5-2 keV の範囲での X 線強度 1×10^{-14} ergs cm^{-2} s^{-1} 、あるいは 2-10 keV の範囲での X 線強度 4×10^{-14} ergs cm^{-2} s^{-1} をしきい値として X 線源を探索し、146 個の X 線源が検出された。

3.1 X 線源数の比較

X 線源は明るいものほど数が少なく暗いものほど検出しにくいいため、そのままでは X 線源数を比較することは出来ない。そのため、X 線強度と個数密度の関係 ($\log N$ - $\log S$ 関係) の相関を用いて銀河団外縁部の X 線源数を比較する。比較対象には X 線で明るい天体のいない領域を選ぶ必要がある。Lockman hole 領域の XMM-Newton 衛星による観測 (Brunner

et al. 2008) と、COSMOS 領域の XMM-Newton による観測 (Cappelluti et al. 2009) を選んだ。比較結果については図 3 に纏めた。横軸が各点源の X 線強度 S 、縦軸がその点源よりも明るい点源数 N を示している。この結果から、銀河団外縁部方向と X 線で明るい天体のない領域との間で X 線源数の超過は見られなかった。

3.2 X 線源のスペクトル調査

X 線源の大半を占める活動銀河核とは異なり、ガス塊は 3 keV 以下の高温ガスによる熱的な X 線放射を行う。そのため「すざく」衛星で検出された全 X 線源をベキ関数モデルと APEC それぞれでフィットしたときの χ^2 の値を F 検定を用いて比較し、有意に 3 keV 以下の温度の高温ガスからの熱的なスペクトルを持つ X 線源をガス塊候補の X 線源とした。また、ガス塊候補の X 線源全てについて可視光で同定し、X 線源領域内に Abell 2199 銀河団に所属している銀河が存在するかどうか確かめた。図 2 の赤い円または十字がガス塊候補の X 線源である。ガス塊候補の X 線源は全 14 個、そのうち Abell 2199 銀河団に所属している銀河が可視光で発見された X 線源は 3 個存在した。これらの X 線源による影響を調べるために 0.5-1 r_{200} の範囲での ICM の X 線光度 (0.5-2 keV) とガス塊候補の X 線光度の総和を比較した。結果、ICM の X 線光度 2×10^{42} ergs/s に対して、ガス塊候補の X 線光度の総和は 4.2×10^{41} ergs/s となり、およそ 2 割ほどの値となった。X 線光度は密度の二乗であること、さらに銀河団外縁部の解析時に一定以上明るい X 線源は検出領域から取り除いていることを考えれば、実際に銀河団の密度が受ける影響は 1 割程度以下であるといえる。

4 まとめ

XMM-Newton 衛星で観測された 1 領域とすざく衛星で観測された 24 領域による r_{200} までのマッピング観測のデータについて、X 線源を探索した。log N -log S 関係の比較から、Abell 2199 銀河団の外縁部方

向は X 線で明るい天体のない領域である COSMOS 領域、Lockman hole 領域と比較しても X 線源数の超過はないことが分かった。また、詳細なスペクトル解析を行った結果、有意に 3 keV 以下の温度の高温ガスからの熱的なスペクトルを持つ X 線源は全 14 個検出された。そのうち、3 個は可視光で所属銀河と同定された。銀河団外縁部領域 (0.5-1 r_{200}) の ICM の X 線光度に対して、ガス塊候補の X 線光度はおよそ 2 割程度となった。この結果から、実際に銀河団の密度が受ける影響は 1 割程度以下であるといえる。

Reference

- Akamatsu, H., Hoshino, A., Ishisaki, Y., et al. 2011, PASJ, 63, 1019
 Bautz, M. W., Miller, E. D., Sanders, J. S., et al. 2009, PASJ, 61, 1117
 Brunner, H., Cappelluti, N., Hasinger, G., et al. 2008, A&A, 283, 300
 Cappelluti, N., Brusa, M., Hasinger, G., et al. 2009, A&A, 635, 648
 Hoshino, A., Henry, J. P., Sato, K., et al. 2010, PASJ, 59, 113
 Ichikawa, K., Matsushita, K., Okabe, N., et al. 2013, ApJ, 766, 90
 Kawaharada, M., Okabe, N., Umetsu, K., et al. 2010, ApJ, 714, 423
 Sato, K., Matsushita, K., Tamura, T., et al. 2014, in Prep.
 Sato, T., Sasaki, T., Matsushita, K., et al. 2012, PASJ, 64, 95
 Simionescu, A., Allen, S. W., Mantz, A., et al. 2011, Science, 331, 1576
 Smith, R. K., Brickhouse, N. S., Liedahl, D. A., & Raymond, J. C. 2001, ApJL, 556, L91
 Urban, O., Simionescu, A., Werner, N. 2014, MNRAS, 437, 3939
 Voit, G. M., Kay, S. T., & Bryan, G. L. 2005, MNRAS, 364, 909
 Walker, S. A., Fabian, A. C., Sanders, J. S., & George, M. R. 2012b, MNRAS, 424, 1826