

A2163 銀河団におけるエントロピー分布の探求

伊東 雅史 (東京理科大学大学院 理学研究科)

Abstract

重力による加熱のみを考慮した数値シミュレーションでは、銀河団の加熱指標となるエントロピーは銀河団中心からの距離の 1.1 乗に比例して増加する。しかし X 線観測衛星「すざく」による観測結果によると、十数個の銀河団において、エントロピーは銀河団中心から r_{500} までしか上昇せず、銀河団外縁部でほぼ一定の値となることが確認された (e.g., Kawaharada et al. 2010)。一方、Eckert et al. (2013) は電波観測衛星「Planck」により観測された圧力と X 線観測衛星「ROSAT」により観測されたガス密度から求めたエントロピーは「すざく」の結果とは異なり銀河団外縁部でも上昇を続けると報告した。

今回我々は、「すざく」衛星による Abell2163 銀河団 ($\langle kT \rangle = 13.40\text{keV}$, $z = 0.203$) の公開データに 2015 年度春の我々の提案した観測を加え、6ヶ所、計 330 ks 以上の観測データの解析を行いヴィリアル半径までの X 線放射を検出した。Abell2163 銀河団のガス温度はヴィリアル半径近辺において $\sim 2\text{ keV}$ まで低下していた。また電波観測衛星「Planck」と「すざく」衛星のガス圧力を比較するとおおそ一致することがわかった。 r_{500} より外側では、エントロピーの上昇は見られず、理論予測より低い結果となった。

1 Introduction

銀河団は、数十から数千個もの銀河が重力的に束縛されている宇宙最大の天体である。銀河団内部には各々の銀河の他、数千万度の希薄な高温ガス (ICM) が存在し、X 線を放射している。銀河団は宇宙年齢をかけて成長する為、銀河団外縁部では宇宙の大規模構造からのガスや銀河などの質量降着によって、現在も銀河団の成長現場となっている。しかし、銀河団外縁部の ICM は密度が低くそこから放出される X 線強度は中心部に比べ小さい。そのため、X 線観測衛星で直接観測することは困難である。2005 年に打ち上げられた X 線観測衛星「すざく」では検出器のバックグラウンドが低く安定しており、 r_{500} (それより内側の平均密度が臨界密度の 500 倍となる半径) から銀河団の「端」となるヴィリアル半径 r_{vir} までのガス温度や密度分布を明らかにすることができる。また温度 T と電子数密度 n_e から銀河団の高温ガスの圧力分布 $P = kTn_e$ (k :ボルツマン定数) を求めることができ、その圧力勾配と重力が釣り合うという静水圧平衡状態を用いることにより銀河団全体の質量を求めることができる。

宇宙論的数値シミュレーションでは、銀河団の加熱の指標となるエントロピー $K \equiv kTn_e^{-2/3}$ は銀河団

中心から外縁部に向かうに従い増加する。銀河団に落ちてくるガスの運動エネルギーが全て衝撃波による加熱として用いられた場合、エントロピーは銀河団中心からの距離の 1.1 乗に比例して増加する (Voit et al. 2005)。しかし、X 線観測衛星「すざく」による銀河団外縁部までの観測によって、エントロピーは銀河団中心から r_{500} までしか上昇せず、銀河団外縁部でほぼ一定の値となることが確認された (e.g., Kawaharada et al. 2010; Ichikawa et al. 2013)。

電波観測による Sunyaev-Zel'dovich (SZ) 効果の研究は X 線による観測と相補的となる。なぜならば熱的は SZ 効果は熱的な圧力に強度が比例するからである。電波衛星「Planck」では SZ 効果を検出し銀河団の「端」まで調べることができる。Eckert et al. (2013) は、「Planck」の SZ 効果から観測される圧力と X 線観測衛星「ROSAT」によるガス密度から A2163 銀河団含む 18 個の銀河団の平均エントロピー分布を測定した。その結果、Eckert et al. (2013) は「Planck」による圧力と「ROSAT」によるガス密度からエントロピーは「すざく」の結果とは異なり銀河団外縁部でも上昇を続けると報告した。

今回我々は「すざく」衛星による Abell2163 銀河団 ($\langle kT \rangle = 13.40\text{ keV}$, $z = 0.203$, $r_{500} \sim 8.89'$; Planck

Collaboration 2011, $r_{\text{vir}} \sim r_{116} = 16.6'$; Okabe et al. 2011) の観測データの解析を行いヴィリアル半径までの X 線放射を検出した。この銀河団はもっとも高温の銀河団の一つであり、そのため SZ 効果のシグナルの誤差が小さく、「Planck」衛星によりもっとも精度のよい圧力分布が得られている。そのため「すざく」衛星の結果の信頼性を評価するのに最適の天体である。本研究では「すざく」衛星を用いて Abell2163 銀河団の圧力分布、ガス数密度分布及びエントロピーについて評価を行う。

今回の研究においてハッブル定数 $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ($h = H_0/100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1} = 0.7$, $h_{70} = H_0/70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1} = 1$) を用い、 $\Omega_m = 0.27$, $\Omega_\Lambda = 0.73$ の平坦な宇宙を仮定した。特に指定しない限り誤差は 90% の信頼区間を示す。

2 Methods/Instruments and Observations

「すざく」衛星による Abell2163 銀河団の公開データ (2008 年 8 月及び 2009 年 2 月に 1 領域ずつ) に 2015 年 2 月の我々の提案した観測を加え、6ヶ所、計 330 ks 以上の観測データの解析を行いヴィリアル半径までの X 線放射を検出した。「すざく」衛星による観測領域を図 1 に示す。「すざく」衛星による解析の際、検出器は xis0, xis1, xis3 を用いた。イベントファイルは 3×3 と 5×5 の 2 つの観測モードを足し合わせた cleaned event を使用し、スクリーニングとして $\text{COR2} > 8 \text{ GV}$ 及び $\text{ELV} > 10^\circ$ で制限を行った。また X 線点源を検出し、 $8 \times 10^{-14} \text{ ergs cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ より明るい点源の周囲の半径 $1.5'$ の領域は解析から取り除いた。

3 Analysis and Results

3.1 バックグラウンドのスペクトル解析

バックグラウンドを調べるために、ビリアル半径より外側の領域のスペクトル解析を行った。バックグラウンド領域は銀河団ガスによる放射 (ICM)、宇宙 X 線背景放射 (CXB)、天の川銀河からの放射 (MWH)、

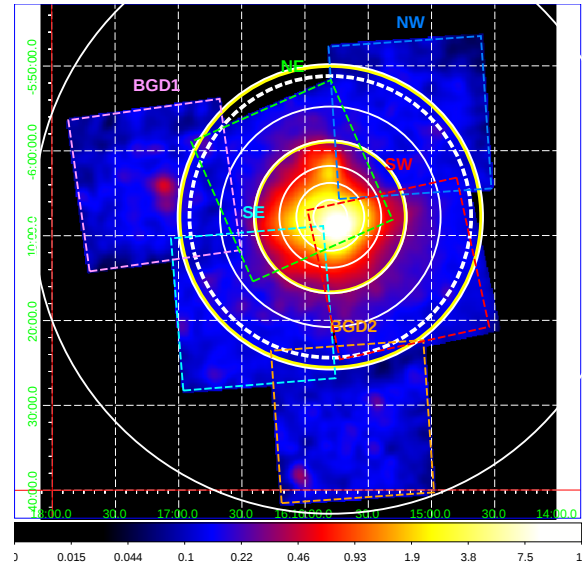


図 1: 「すざく」衛星による Abell 2163 銀河団の画像。エネルギー帯域は $0.5 - 5 \text{ keV}$ である。また、NXB は除くと共に exposure time は補正している。カラーバーは $\text{counts pixel}^{-1} \text{ Ms}^{-1}$ を示す。赤、緑、青、シアン、マゼンタ、橙の破線四角の領域が「すざく」衛星による観測領域である。マゼンタ及び橙の領域はバックグラウンド領域である。黄色の円は、 $r_{500}, 2r_{500}$ を示している。白の細い円は銀河団中心から半径であり、白の太い点線の円は r_{vir} を示す。

Local hot bubble 及び昼地球からの中性酸素の輝線による放射の計 5 つを仮定した。バックグラウンド領域に ICM もしくは我々の銀河系由来の成分を加えることによってフィットが有意に改善した。CXB のモデルはべき関数モデルを用いた。中性酸素の輝線はエネルギー 0.525 keV によるガウシアンモデルを用いた。他の X 線における放射 (ICM, MWH, LHB) は apec プラズマモデル (Smith et al. 2001) を用いた。その結果 CXB のフラックスは Kushino et al. (2014) の理論予測と誤差の範囲内で一致した。

3.2 温度分布及び電子数密度分布

我々は図 1 において領域を中心から $0' - 2', 2' - 4', 4' - 6', 6' - 9', 9' - 13', 13' - 18', 18' - 35'$ の円環に切ってスペクトルフィットを行い半径分布を求めた。図 2 にスペクトルフィットから得られた温度の

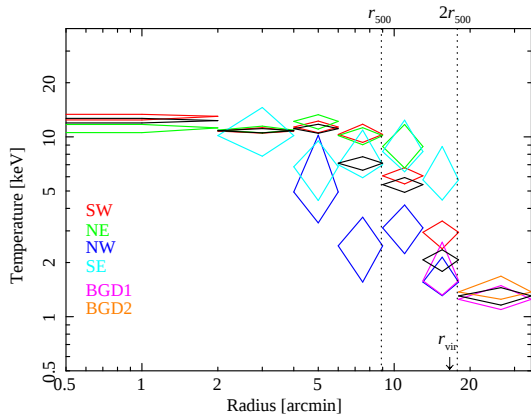


図 2: 「すざく」衛星により観測された Abell2163 銀河団における温度分布。赤、緑、青、シアン、マゼンタ、橙のダイヤは Abell2163 銀河団各々の南西、北東、北西、南東方向及びバックグラウンドにおける観測領域を示している。黒のダイヤは円環領域ごとの平均値である。また黒の点線は r_{500} , $2r_{500}$ を示している。

半径分布を示す。Abell2163 銀河団中心領域ではガス温度が 10 keV を超える結果となりピリアル半径近傍では平均として ~ 2 keV まで低下していることがわかった。また、温度の方向依存性を調べると NW 方向においては SW, NE, SE 方向に比べ全体的に温度が低くなっていることがわかった。

図 3 にスペクトルフィットから得られた電子数密度の半径分布を示す。電子数密度は銀河団外縁部に向かうに従い小さくなっていることがわかった。また NW 方向においては SW, NE, SE 方向に比べ全体的に電子数密度が低くなっていることがわかった。

3.3 エントロピー分布

図 4 に Abell2163 銀河団におけるエントロピー分布を記す。黒の点-破線は重力による加熱のみを考慮した数値シミュレーションの値である。中心領域を除き r_{500} より内側では数値シミュレーションの値と同じように上昇していくのに対し、 r_{500} より外側ではエントロピーの上昇は見られず、理論予測より低くなることがわかった。

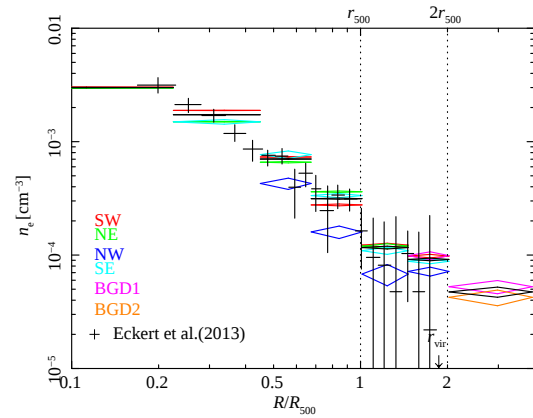


図 3: 「すざく」衛星により観測された Abell2163 銀河団における電子数密度分布。色の意味は図 2 と同じである。黒の十字は「ROSAT」衛星により観測された Abell2163 銀河団の電子数密度分布である (Eckert et al. 2013)。

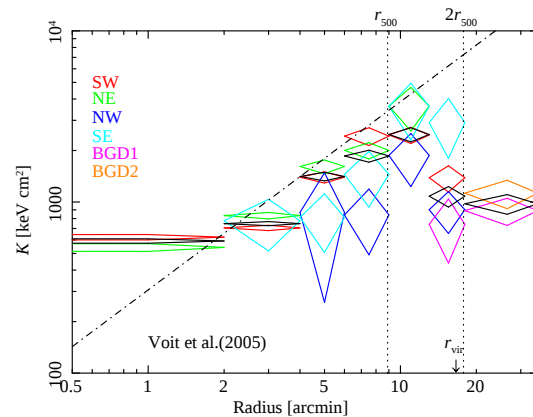


図 4: 「すざく」衛星により求められた Abell2163 銀河団におけるエントロピー分布。色の意味は図 2 と同じである。又、黒の点-破線は重力による加熱のみを考慮した数値シミュレーションによる予測値を示したものである。

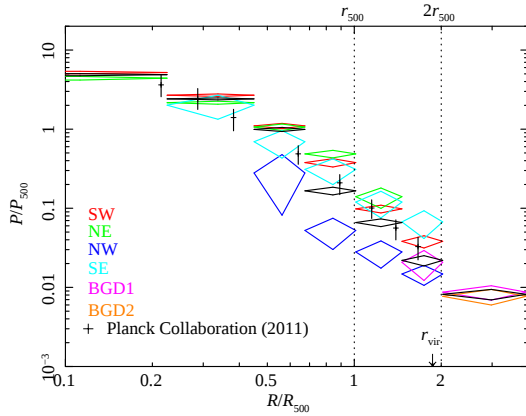


図 5: 「すざく」衛星により求められた Abell2163 銀河団における圧力分布。色の意味は図 2 と同じである。黒の十字は「Planck」衛星により観測された Abell2163 銀河団の圧力分布である。

4 Discussion

4.1 圧力分布と電子数密度分布による比較

図 5 に Abell2163 銀河団における圧力分布を記す。黒の十字線は「Planck」衛星により観測された Abell2163 銀河団の圧力分布である (Planck Collaboration 2011)。Eckert et al. (2013) は P_{500} を求める際 $\Omega_m = 0.3, \Omega_b = 0.05$ としているため、圧力分布を P_{500} で規格化する際は $\Omega_m = 0.3, \Omega_b = 0.05$ を用いている。図 3 では Abell2163 銀河団における電子数密度分布を記した。以上のことから圧力分布と電子数密度分布の比較において「すざく」衛星は「Planck」衛星及び「ROSAT」衛星と一致することがわかった。

4.2 エントロピー分布

section 4.1 より「すざく」衛星から求められた圧力及び電子数密度は「Planck」衛星及び「ROSAT」衛星の結果と一致している。特に、最も統計の良い SW のデータにおいても「Planck」衛星及び「ROSAT」衛星と一致している。また、Abell2163 銀河団のエントロピーの半径分布もこれまでの「すざく」衛星の

結果と同様に r_{500} より外側において上昇が見られないことがわかった。

5 Conclusion

私たちは Abell2163 銀河団について「すざく」衛星により観測された 6 領域の観測データの解析を行いヴィリアル半径までの X 線放射を検出した。その結果、ガス温度は銀河団中心 10 keV から銀河団外縁部において ~ 2 keV まで降下することがわかった。また「Planck」衛星による電波観測と「すざく」衛星による X 線観測のガス圧力及び、「ROSAT」衛星と「すざく」衛星による X 線観測のガス数密度の比較するとどちらも一致し、エントロピーの分布がこれまでの「すざく」衛星の結果とも一致することがわかった。

Acknowledgement

基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台からのご支援に感謝いたします。

Reference

- Eckert, D., Molendi, S., Vazza, F., et al. 2013, A&A, 551, A22
- Ichikawa, K., Matsushita, K., Okabe, N., et al. 2013, ApJ, 766, 90
- Kawaharada, M., Okabe, N., Umetsu, K., et al. 2010, ApJ, 714, 423-441
- Kushino, A., Ishisaki, Y., Morita, U., et al. 2014, PASJ, 1
- Okabe, N., Bourdin, H., Mazzotta, P., et al. 2011, ApJ, 741, 116
- Planck Collaboration 2011, A&A, 536, A11
- Smith, R. K., Brickhouse, N. S., Liedahl, D. A., & Raymond, J. C. 2001, ApJ, 556, L91
- Voit, G. M., Kay, S. T., & Bryan, G. L. 2005, MNRAS, 364, 909