

「すざく」衛星による Abell 2744 銀河団周辺のミッシングバリオン探査

服部 詩穂 (奈良女子大学大学院 人間文化研究科 物理科学専攻)

Abstract

宇宙を構成する成分のうち、その 4% はバリオン (通常の物質) であることがわかっているが、近傍宇宙では半分程度しか検出されていない。宇宙の構造形成シミュレーションから、これらの未検出のバリオンはガスの温度が $10^6 - 10^7$ K の中高温銀河間物質 (WHIM) として銀河団同士をつなぐフィラメントに沿って分布していると予測されている。WHIM の検出は観測と理論それぞれからのバリオン量の不一致を埋めてくれるだけでなく、その密度、温度分布がわかれば、宇宙論の理解を観測から進めていくことができる。これらは極紫外線や X 線のエネルギー範囲でイオン化された元素の輝線や吸収線による検出が期待されており、中でも酸素が最も検出可能な元素であると思われる。しかし、この領域のガス密度は非常に小さく、現在の観測機器の感度では検出が難しい。

本研究では宇宙の大規模構造のフィラメントへのつながりが発見されている Abell 2744 銀河団の北東領域周辺に注目し、X 線天文衛星「すざく」による解析を行った。フィラメント領域のスペクトルに対して、WHIM 成分を考慮したモデルフィットを行い赤方偏移した OVIII 輝線のフラックスの 2σ 上限値を求めた。また Gaussian 輝線モデルを加えたときの F 検定や輝線エネルギーの値から 0.5 keV 付近の放射はこの銀河団周辺からのものと考えて矛盾しないことがわかった。本講演ではこの結果と今後の展望について議論する。

1 ミッシングバリオン

1.1 ミッシングバリオンとは

宇宙を構成する要素は陽子、中性子などのバリオンが約 4%、ダークマターが約 23%、ダークエネルギーが約 73% であるが、このうちバリオンでさえも近傍宇宙では半分程度しか観測されていない (Fukugita et al. 1998)。このことをミッシングバリオン問題とよぶ。 Λ CDM モデルに基づく数値シミュレーションからこれらの未検出のバリオンは温度が $10^6 - 10^7$ K 程度の希薄な銀河間物質として存在していることが予想されており、中高温銀河間物質 (Warm-Hot Inter-galactic Medium; WHIM) とよばれる。そしてこれらの WHIM は宇宙の大規模構造フィラメントに沿って分布していると考えられている (Cen & Ostriker 1999)。

また、宇宙の平均水素密度 $\bar{n}_H$ に対する比である overdensity, $\delta \equiv n_H/\bar{n}_H$ は銀河団の $\delta = 200$ に対し、WHIM のあるフィラメント部分では $\delta = 10-30$ 程度、銀河団周辺では $\delta \geq 100$ と予想されている。

1.2 WHIM の探査方法

薄く広がったガスを検出するのは困難で様々な方法があげられている。その一つに電離した酸素やネオンなどのイオンの吸収線や輝線のエネルギーの観測がある。 $10^6 - 10^7$ K の温度の下で酸素は OVII、OVIII として存在し、これらの輝線の静止系でのエネルギーはそれぞれ 0.574 keV, 0.654 keV である。輝線の強度はガス密度の 2 乗に比例するので WHIM の密度が最も高い銀河団近傍を狙うのがよい。銀河団ガスは WHIM よりも 1 桁高い温度ガスを持つがその周辺部には WHIM が存在すると考えられるためである。

2 目的

WHIM を検出することは理論と観測それぞれからのバリオン量の不一致を埋めてくれるだけでなく、ダークマターの分布を知ることもつながる。そこで本研究では酸素輝線から WHIM の有無を探った。

3 すざく衛星と観測

今回の研究では X 線天文衛星「すざく」による観測データを用いた。すざく衛星は 4 つの X 線 CCD カメラ (XIS) を搭載しており、エネルギーバンドは 0.2–12.0 keV、視野の大きさは $17'.8 \times 17'.8$ 、典型的なエネルギー分解能は 130 eV である。特に XIS1 は低エネルギー側で感度がよい。

表 1 に Abell 2744 の基本的な観測情報を示す。この天体は赤方偏移 $z = 0.308$ に位置する衝突銀河団である。先行研究から北東方向に小型の銀河団が見つかっており、これがフィラメントから銀河団中心に降着してきているのではないかと予想されている。またこの方向には中心から半径 $4' - 7'$ の位置に電波レリックが確認されている。

表 1: すざく観測ログ

ターゲット	(RA, Dec)	観測時間
	[deg](J2000)	
A2744 NE	(3.72, -30.31)	8.28×10^4

4 解析と結果

4.1 解析方法の概要

WHIM を探るにあたり、まずは X 線スペクトル解析から銀河団ガスがどのような温度構造を持っているのか調べた (§4.2)。次に X 線表面輝度の半径分布から、銀河団とフィラメントの境を予測した (§4.3)。そしてその予測したフィラメントの領域に対し WHIM のモデルを仮定し、モデルフィットを行った (§4.4)。

以下に詳細と結果を示す。

4.2 温度分布

図 1 のように天体の北東領域をリング状に区切り、解析領域とバックグラウンド (BGD) 領域を定義した。XSPEC を用いて解析領域のスペクトルが $\text{phabs}^* \text{apec}$ で表されるとしてモデルフィットを行った。ここで phabs は光電吸収、 apec は熱制動放射と重元素からの輝線放射を表すモデルである。これよ

り求めた温度分布は図 2 のように電波レリックの前後で温度ジャンプを示した。

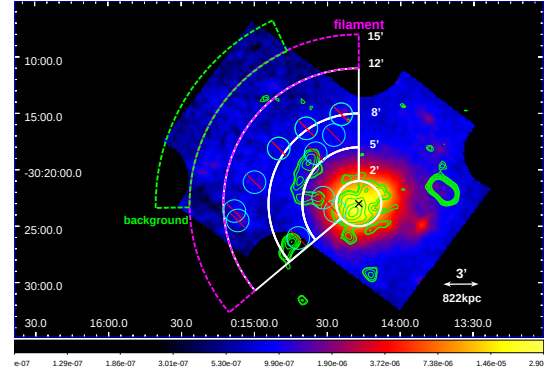


図 1: Abell 2744 銀河団の XIS イメージ (カラー)。NE 領域の領域定義を白の実線で示した。点源は半径 $1'$ で抜いてある。緑のコントアは電波観測 (Orrú, E. et al. 2007) から。 $1' = 274$ kpc に相当する。

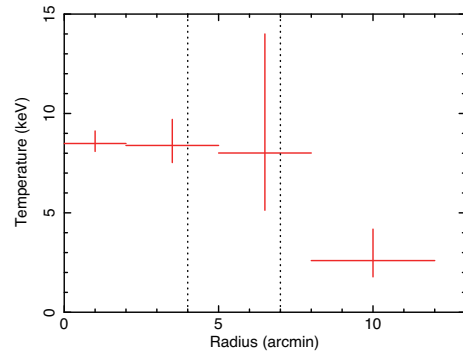


図 2: Abell 2744 北東領域のガス温度分布。横軸は中心からの距離 (arcmin)、縦軸は温度 (keV)、点線は電波レリックの範囲を示す。

4.3 輝度分布

次に銀河団の X 線表面輝度を CIAO を用いて計算した。表面輝度をモデルフィットする際には β モデルと const. モデルを使用した。ここで β モデルは銀河団の表面輝度の分布を示すモデル、 const. モデルはバックグラウンドが一定であるという仮定のもとにいった。この 2 つが交わる場所を銀河団とフィラメントの境とし、今回は銀河団中心から半径 $12' - 15'$

の領域 (図 1) をフィラメント領域と仮定して解析を行った。

4.4 WHIM のモデル化と酸素輝線フラックス

仮定したフィラメント領域に対しモデルフィットを行った。バックグラウンドモデルは Cosmic X-ray Background+Galactic X-ray Background を仮定し、phabs*(power-law+apec)+apec で再現した。これに WHIM の成分を吸収を受けた Gaussian 輝線モデルで加えた。このとき Gaussian 輝線モデルは赤方偏移した酸素輝線の値 ($\text{OVII}=0.442 \text{ keV}$, $\text{OVII I}=0.503 \text{ keV}$) で固定し、その幅 σ は 0.0 keV とした。エネルギー範囲は $0.4\text{--}7.0 \text{ keV}$ でフィットを行った。今回は低エネルギー側で感度の良い XIS1 のみを使用した。

WHIM 成分として Gaussian 輝線モデルを入れた場合と入れなかった場合で 0.5 keV 付近の残差を見てみると、WHIM 成分を入れたときの方が残差が小さくなり、F 検定からもフィットの改善性は 97% レベルで有意であった (図 3)。また OVIII のフラックスは $(3.89 \pm 1.99) \times 10^{-7} \text{ photons cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ arcmin}^{-2}$ と得られた。

5 議論

今回得られた §4.4 の結果に対し、バックグラウンドの不定性を 10% と見積もり OVIII からのフラックスの 2σ 上限値を求めると $8.23 \times 10^{-7} \text{ photons cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ arcmin}^{-2}$ となった。また、この結果を先行研究 (Takei et al. 2007; Finoguenov et al. 2003; Kaastra et al. 2003; McCammon et al. 2002; Lumb et al. 2002) と比べても大きな違いは見られず現在の観測の限界であると思われる。

さらに輝線エネルギーの値をフリーにしてフィットを行った結果、この輝線が $z \sim 0.3$ 付近からのものであることも確認できた。しかし、Solar wind charge exchange や、地球の大気からの中性酸素のもれこみ、エネルギー較正の不定性、XIS 検出器の Optical Blocking Filter の contamination の影響などを

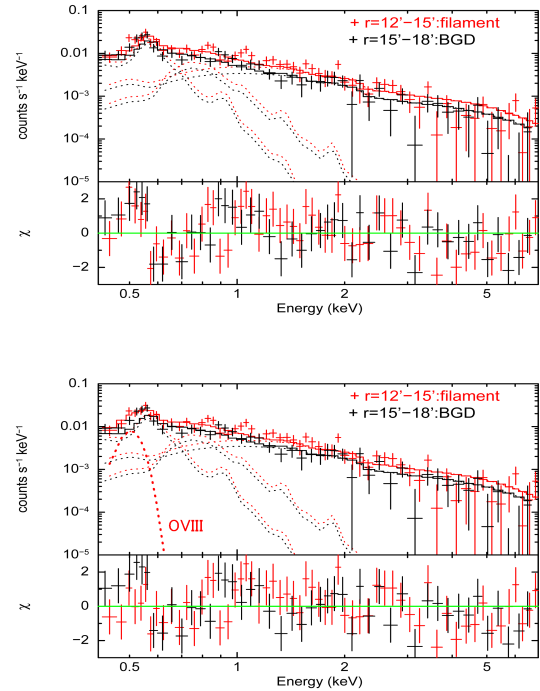


図 3: Abell 2744 外縁部の XIS1 におけるスペクトルに WHIM 成分として Gaussian モデルを入れたときの比較。上段:WHIM 成分なし、下段:WHIM 成分有り。横軸はエネルギー (keV)、上のパネルの縦軸は強度 ($\text{counts s}^{-1} \text{ keV}^{-1}$) を、下のパネルの縦軸はデータとモデルとの残差を表す。また、実線はモデルを、点線はモデルに含まれる各成分を表す。OVII は強度が弱くグラフ上では見えていない。

考えるとこの結果は有意であるとはいいがたく、中性酸素のもれこみを考慮すると有意性は 88% となった。さらに今回 BGD として抽出した領域もフィラメントの一部であると考えれば BGD 領域自体も検討する必要がある。

6 まとめ

今回北東方向にフィラメント構造がのびていると思われる Abell 2744 周辺のガスに対し、すざく衛星による観測データから解析を行ったところ、系統誤差 10% において 2σ 上限値で OVIII からのフラックスを $8.23 \times 10^{-7} \text{ photons cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ arcmin}^{-2}$ と得

た。さらにエネルギーの値からこの酸素が誤差の範囲で Abell 2744 由来であるという検証もできた。今回 WHIM があると仮定した領域は、WHIM の加熱が予測されているピリアル半径の 2 倍付近であり、フィラメント構造があると考えても妥当な領域であったといえるだろう。しかし、系統誤差や様々な可能性も含めると有意な検出ができたとはいえず、今後の観測技術の向上に期待したい。

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

- Boschin, W., Girardi, M., Spolaor, M., & Barrena, R. 2006, A&A, 449, 461
- Cen, R., & Ostriker, J.P. 1999, ApJ., 514:1-6
- Finoguenov, A., Briel, U. G., & Henry, J. P. 2003, A&A, 410, 777(FBH03)
- Fukugita, M., Hogan, C. J., & Peebles, P. J. E. 1998, ApJ, 503, 518
- Kaastra, J. S., Lieu, R., & Tamura, T., et al. 2003, A&A, 397, 445
- Lumb, D. H., Warwick, R. S., & Page, M., & De Luca, A. 2002, A&A, 389, 93
- McCammon, D., et al. 2002, ApJ, 576, 188
- Orrú, E., Murgia, M., Feretti, L., et al. 2007, A&A, 467, 943
- Owers, M. S., Randall, S.W., Nulsen, P. E. J., et al. 2011, ApJ, 728, 27
- Takei, Y., Ohashi T., Henry J. P., et al. 2007, PASJ, 59, S339-S349