

「すざく」衛星による 近傍銀河団のガスバルク運動の測定

奈良女子大学 人間文化研究科 修士課程 1 年
吉田 浩子

Abstract

銀河団は宇宙の階層構造のトップに位置し、銀河・高温ガス・ダークマターから構成される巨大な天体である。その高温ガスは重力ポテンシャルに緩和し、静水圧平衡にあると考えられてきた。しかし銀河団同士の衝突合体が起きると、ガスが重力ポテンシャルに流れ込み、バルク運動や乱流などの複雑な運動状態が発生することが予言されている。

このような高温ガスの運動状態を測定することは、衝突合体による銀河団のダイナミックな進化を解明する手がかりとなる。また、もしガスがバルク運動や乱流運動を持つとすると、静水圧平衡の条件から推定した銀河団質量に無視できない系統誤差が含まれることになる。

そこで、本研究では銀河団の高温ガスのバルク運動を測定することを目的とし、X線スペクトルに現れる鉄輝線のドップラーシフトの測定を行う。バルク運動の有無が銀河団の形態の違いに関係するののかについて調べるため、「すざく」衛星で観測された不規則銀河団と規則銀河団の両方を対象とする。なお、1000km/sのガス運動から生じる鉄輝線エネルギーのずれはわずか22eVであるため、検出器のエネルギースケールの決定精度の検討も行った。本研究では、Abell3667とペルセウス座銀河団、2つの近傍銀河団のガス運動状態を測定した。

1 Introduction

銀河団とは、数百～数千の銀河の集団のことである。主に銀河・高温ガス・ダークマターの3つで構成されており、より小さい構造が衝突合体して進化していったと考えられている。X線のイメージでは、希薄な高温ガスに取り囲まれているのが確認でき、そのガスの温度は数千万度から1億度近い高温である。このガスは衝突合体に伴い、ガスが重力ポテンシャルに集団で流れ込むバルク運動や、渦を巻く乱流などの複雑な運動をすると予想されている。銀河団のガス運動のシミュレーション結果 (Figure 1) では、 $\sim 1000\text{km/s}$ の速度のバルク運動が $\sim 5\text{Gyr}$ 保たれることが予言されている。過去の観測では、「すざく」衛星やXMM-Newtonでガスのバルク運動 [1] や乱流探査 [6] が行われている。しかし、検出されたのはAbell2256の1例しかなく [3]、サンプル数を増やしてバルク運動を観測的に検証することが重要となってくる。

これらのことから、本研究の目的を輝線スペクトルのドップラーシフトから高温ガスのバルク運動の探査とした。バルク運動を探査することで、銀河団同士の衝突によるダイナミックな進化を解明する手がかりを得ることが出来る。また、音速を超えるバルク運動があるとすると、静水圧平衡の式に動圧を付け加える必要があり、ダークマター質量推定の影響が無視できなくなる。

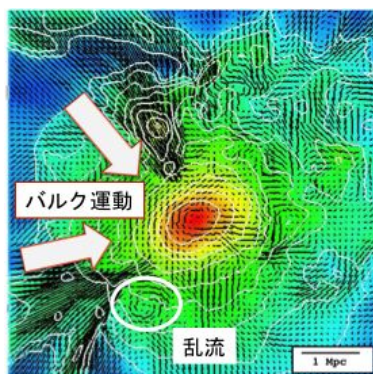


Figure 1: 銀河団のガス運動をシミュレーションした図。黒い線はガス速度をベクトルで表している。中心の赤くなっているところが銀河団の中心で、そこに集団でガスが落ちるバルク運動がおけると予想されている。[4]

2 Observation

本研究では、バルク運動の有無が銀河団の形態の違いに関係するのかわについて調べるため、「すざく」衛星で観測された不規則銀河団である Abell3667 と、規則銀河団であるペルセウス座銀河団という morphology が異なる 2 天体を対象とした。まず、不規則銀河団である Abell3667 は赤方偏移が 0.0566 で、衝突合体をしていると考えられている。その証拠としてコールドフロントが発見されている。また可視光では、銀河の速度分布が観測されている (Figure 2)。大きく北と中心の 2 つの構造があり、最大 2800km/s の速度勾配があることが分かっている。[2]

次に規則銀河団であるペルセウス座銀河団は赤方偏移が 0.0183 で、非常に明るい。この天体も可視光で観測されており、Figure 2 はペルセウス座銀河団の銀河の速度分布である。ペルセウス座銀河団の速度分散は 1000km/s で、顕著な速度分散はない。[5]

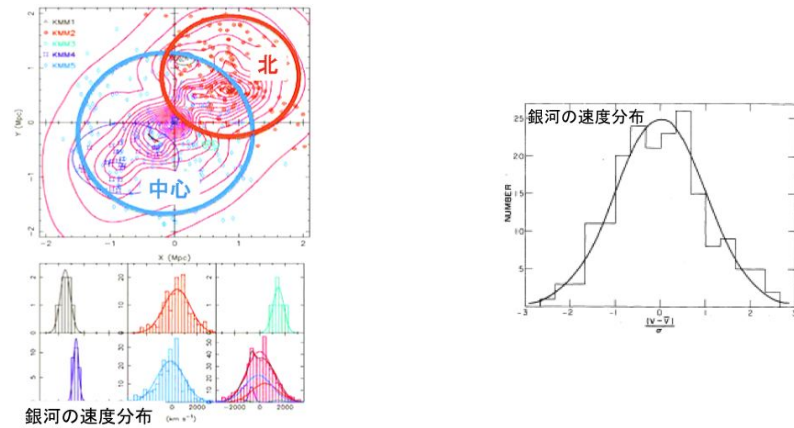


Figure 2: (左図)Abell3667 の可視光で観測された銀河の速度分布。大きく北と中心の2つの構造がある。(右図)ペルセウス座銀河団の可視光で観測された銀河の速度分布。Abell3667のような顕著な速度分散はない。

3 Analysis

バルク運動を調べるためには、X線スペクトル上に現れる6.7keVの鉄輝線のドップラーシフトを用いる。銀河団中でガスが視線速度1000km/sの運動をしていると、ドップラー効果で鉄輝線エネルギーが22eVだけずれる。このわずかなずれを測るためには、輝線エネルギーを正確に測定する必要があるが、これは「すざく」衛星のCCDで実行が可能である。

次に解析方法であるが、まずAbell3667については「すざく」で5回観測されており、その中心を小スケール(1セル=250kpc)に分割した。また、北・中心・南と大スケール(1辺=1Mpc)で3つの領域をとった(Figure 3)。この領域ごとに鉄輝線エネルギーを調べた。次にペルセウス座銀河団はAbell3667と同様に、中心を小スケール(1セル=100kpc)に分割した。

鉄輝線の解析は5-10keVの範囲でモデルフィットを行った。モデルは熱制動放射+3つのガウス関数を用いた。主に3つの成分から成っており、このうちのHe-like Fe-K α 線を調べる(Figure 3)。領域ごとにスペクトルフィットを行い、赤方偏移を求めた。最後に、検出器のエネルギースケールの決定精度の検討も行った。

4 Result

まずAbell3667の小スケール(1セル=250kpc)の結果Figure 4からは、高温ガスの赤方偏移は機器誤差 $\pm 0.1\%$ の範囲を超えることはないことが分かる。またAbell3667大スケール(1辺=1Mpc)の結果Figure 5では、高温ガ

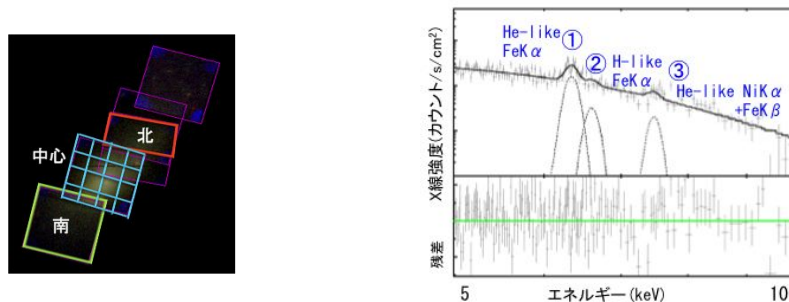


Figure 3: (左図)Abell3667の「すざく」衛星での観測領域。中心を小スケールに16分割、北・中心・南の領域を大スケールとする。(右図)鉄輝線をモデルフィットしたX線スペクトル。横軸はエネルギー (keV)。上のグラフの縦軸は、各エネルギーあたりのX線強度、下はモデルとデータの残差である。データを誤差棒付きの十字で示す。主に3つの成分から構成されており、このうちの①He-like Fe-K α 線を調べる。

スの赤方偏移は機器誤差 $\pm 0.1\%$ の範囲を超えることはないことが分かり、北側、中心の可視光の赤方偏移とよく一致している。つぎにペルセウス座銀河団の小スケール (1セル = 100kpc) の結果 Figure 6 からは、機器誤差 $\pm 0.1\%$ の範囲に高温ガスの赤方偏移は入っている。

検出器のエネルギースケールの決定精度の見積もりは、較正線源から放射される Mn-K α 線のエネルギーのずれから、XIS 検出器のエネルギースケールの機器誤差を調べた。それにより Mn-K α 線のエネルギーのずれは $\pm 0.1\%$ だと確認できた。これを天体の赤方偏移や後退速度のずれに換算すると、Table 1 の値になった。

結果をまとめると、Abell3667 は大小スケールともに、高温ガスの赤方偏移は可視光のものとは比べて機器誤差 $\pm 0.1\%$ の範囲を超えるはずはなかった。また中心、北側の可視光のいずれの領域も、高温ガスの赤方偏移は可視光とよく一致していた。有意なバルク運動は検出されなかったが、バルク運動速度の90%上限値を得ることができた。統計誤差、機器誤差を含めて計算すると、 $|v| < 2600$ km/s と求まった。次にペルセウス座銀河団は高温ガスの赤方偏移は機器誤差 $\pm 0.1\%$ の範囲に入っていた。有意なバルク運動は検出されず、バルク運動速度の90%上限値は $|v| < 1000$ km/s と求まった。

5 Discussion and Conclusion

結果より両天体とも有意なバルク運動は検出されなかったが、バルク運動の厳しい上限値を得ることが出来た。ガスが音速を超える大きな速度を持つ場合には、それに伴う非熱的圧力の影響が無視できなくなり、静水圧平衡を仮

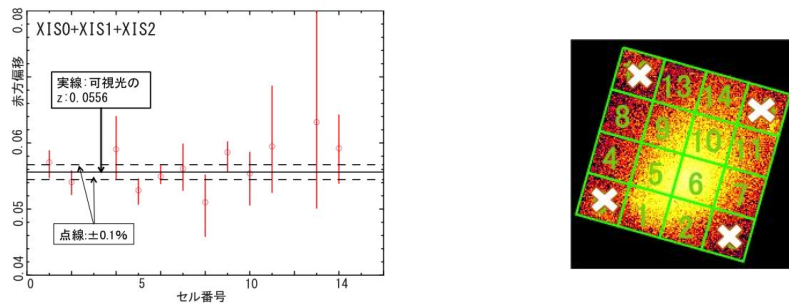


Figure 4: (左図)Abell3667 の小スケール (250kpc) の結果。横軸はセル番号、縦軸は赤方偏移。黒の実線は可視光の赤方偏移で、黒の点線は機器誤差 $\pm 0.1\%$ である。データは XIS0,1,2 を足しあわせている。(右図) 中心を小スケールに分割した。セル番号 0,3,12,15 は較正線源の位置と重なっているため除外した。

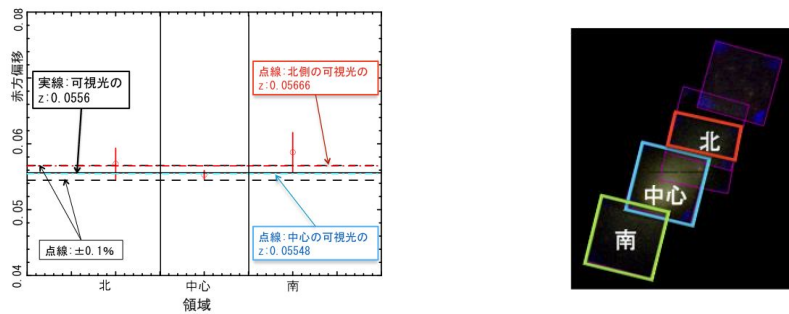


Figure 5: (左図)Abell3667 の大スケール (1Mpc) の結果。横軸は領域、縦軸は赤方偏移。黒の実線は可視光の赤方偏移で、黒の点線は機器誤差 $\pm 0.1\%$ である。赤の点線は北側の可視光の赤方偏移、青の点線は中心の可視光の赤方偏移。(右図)Abell3667 を大スケールでとった 3 領域。

定した質量推定に数倍の修正が必要となってくる。そのため、天体ごとのバルク運動の 90% 上限値と音速を比較する。天体ごとのバルク運動の 90% 上限値と音速は Table 2 に示す。まず Abell3667 は、バルク運動の 90% 上限値が音速よりも大きい、光子統計が悪い領域があったり、機器誤差の改善など誤差が大きいという問題がある。そのためさらなる検証が必要となる。次にペルセウス座銀河団は、音速を超える運動がないことから、ガスは重力ポテンシャルに緩和していると考えられる。

以上のことをまとめると、銀河団のダイナミックな進化を探るため、「すざく」衛星を用いて鉄輝線のドップラーシフトから Abell3667 とペルセウス座銀河団のガスバルク運動を測定した。まず Abell3667 は大スケール、小スケールで有意な速度差は得られなかった。ただ誤差が大きいため、さらなる検

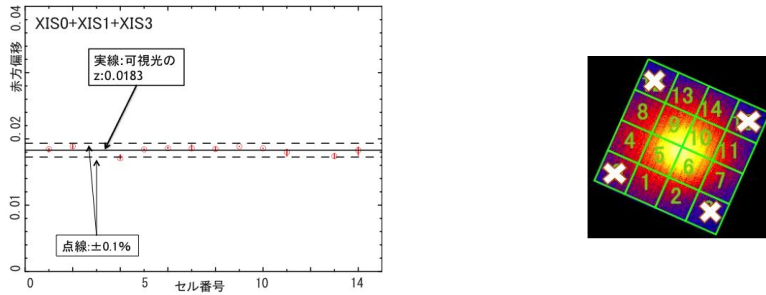


Figure 6: (左図) ペルセウス座銀河団の小スケール (100kpc) の結果。横軸はセル番号、縦軸は赤方偏移。黒の実線は可視光の赤方偏移で、黒の点線は機器誤差 $\pm 0.1\%$ である。データは XIS0,1,3 を足しあわせている。(右図) 中心を小スケールに 16 分割した。セル番号 0,3,12,15 は較正線源の位置と重なっているため除外した。

天体	$z_{cluster}$	後退速度 v
Abell3667	0.0011	336 km/s
ペルセウス座銀河団	0.0010	311 km/s

Table 1: 天体ごとの赤方偏移や後退速度のずれ

証が必要である。次にペルセウス座銀河団は、ガスは重力ポテンシャルに緩和していると考えられる。今後の課題としてはまず、解析する天体数、つまりサンプル数を増やすことが挙げられる。つぎにスペクトル領域の分割の仕方を工夫することだ。今回の解析では、光子統計が悪く統計誤差が大きい領域があったため、光子数を増やせるような分割の仕方を考える。最後に、2014年打ち上げ予定の ASTRO-H は「すざく」衛星よりも高い感度、20倍も高いエネルギー分解能を実現する。この ASTRO-H による観測により、より詳細な銀河団のガス運動状態の解明を期待する。

天体	バルク運動の 90% 上限値	音速
Abell3667	2600 km/s	1400 km/s
ペルセウス座銀河団	1000 km/s	1100 km/s

Table 2: 天体ごとのバルク運動の 90% 上限値と音速

Bibliography

- [1] Ota, N., *et al.*, 2007, PASJ, 59, S35
- [2] Owers, M.,*et al.*, 2009, ApJ, 693, 901
- [3] Tamura, T., *et al.*, 2011,PASJ, 63, S10
- [4] M L. Norman, G L. Bryan , 1998, ApJ
- [5] S M.Kent., W. L. W. Sargent., 1983, AJ, 88, 6
- [6] J. S. Sanders., 2010, MNRAS, 402, L11