

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 1 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25800112

研究課題名(和文) 宇宙の元素合成・拡散史解明に向けた高精度 X 線分光による銀河団プラズマの探査

研究課題名(英文) Study of the intra-cluster medium in galaxy clusters with a high resolution spectroscopy for investigating the chemical evolution in the universe

研究代表者

佐藤 浩介 (Sato, Kosuke)

東京理科大学・理学部・助教

研究者番号：50453840

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000 円

研究成果の概要(和文)：銀河の大集団である銀河団は宇宙で最大の天体であり、宇宙年齢をかけて進化してきたため、宇宙の力学的、化学的進化をさぐるよいプローブとなる。私は銀河団の観測的研究として、日本の X 線天文衛星「すざく」を用いて、銀河団内に存在する高温ガスの温度や密度から、熱的な進化の指標となるエントロピーを調べ、宇宙論的数値シミュレーションと比較した。また実験的研究として、将来の X 線天文衛星搭載を目指し、誘電体マイクロカロリメータ検出器の開発を行った。同時に2015年度打ち上げ予定の X 線天文衛星「ASTRO-H」搭載のカロリメータ検出器の試験にも貢献した。

研究成果の概要(英文)：Because galaxy clusters are the largest objects in the universe, the properties in the intra-cluster medium give us important clues for investigating the dynamical and chemical evolutions in the universe. As an observational study, we studied the entropy profile, which is a good indicator of the thermal evolution of galaxy clusters, derived from the ICM temperature and density, with the Japan-US astronomical satellite "SUZAKU" and compared our results with that from the cosmological numerical simulations. As an experimental study, we developed a dielectric micro calorimeter on board the next generation astronomical satellite. I am also a core member of the ASTRO-H SXS team, and have been active in the SXS test.

研究分野：X 線天文学

キーワード：X 線天文学 銀河団 カロリメータ

1. 研究開始当初の背景

銀河の大集団である銀河団は、宇宙で最大の天体であり宇宙年齢をかけて成長してきたため、宇宙の力学的、化学的進化をみるための「ショーケース」として用いることができる。銀河団の質量推定は宇宙論パラメータの決定にも制限をつけることが可能であるが、銀河団は今もなお宇宙の大規模構造からの質量降着を受け成長しており、銀河団全体での物理量を押さえることが重要である。また、銀河団はビッグバン以降に生成されたほぼ全ての元素を含んでいると考えられるため、どの元素がどのくらいあるのかを知ることができ、宇宙の元素生成、供給の過程をも知ることができる。銀河団内のガスは高温に加熱されており、X線を放射している。しかし、銀河団の明るい中心部を除く領域は非常に輝度が暗く、非常に観測が困難であり、日本の天文衛星「すざく」の登場以前はX線での観測は困難であった。一方、可視光での銀河の重力レンズ効果や、電波帯域でのスニヤエフーゼルドビッチ効果を用いた方法でも銀河団の質量やガスの圧力を求めることが可能であり、これらは相補的な観測量としても重要である。

「すざく」衛星に搭載されている現在主流のX線観測装置である CCD 検出器では、宇宙の化学進化の解明に重要である銀河団や宇宙の大規模構造に付随していると考えられている酸素の輝線を我々の銀河系内由来の酸素の輝線と区別することができず、大きな系統誤差がついてしまっているのが現状である。また銀河団の外縁部は、物質の降着により非平衡プラズマになっていると予想されており、元素の輝線の微細構造を調べることが重要であるが、CCD 検出器では分光能力が足りずに未解明のままである。この状況にブレークスルーをもたらす、宇宙の進化の解明に決定的な観測をするものこそ、X線カロリメータ検出器である。X線カロリメータは分光能力が $E/E > 2000$ 超えるため、 ~ 100 km/s のガスの運動も輝線のドップラーシフトから直接観測することが可能となるだけでなく、我々の銀河系内からの酸素の放射との区別も赤方偏移を用いて区別することが可能となるため、元素の決定精度が飛躍的に向上する。現在開発されているカロリメータ検出器の単素子での分光能力は実用化のための目標値に近づいているものの、銀河団のように空間的にも広がった天体の元素分布などを調べるためには、より広い視野と位置検出能力を持つ撮像分光性能が必要となる。よって、超高エネルギー分光性能と撮像性能を兼ね備えたX線カロリメータの実用投入こそが、宇宙の力学的、化学的進化の解明に大きなインパクトを与えることが期待できる。

2. 研究の目的

観測的研究としては、宇宙の力学的、及び化学的進化を解明するために、日本のX線天文

衛星「すざく」を用いて、自ら観測を提案したいくつかの銀河団の質量およびそこに含まれる元素量を測定し、銀河団の構成銀河質量(光度)の分布との比較により、銀河から銀河団にどのように元素が供給されたのかを探る。また同時に大規模構造からの質量降着によって銀河団外縁部のガスがどのような物理状態になっているのかを調べ、ガスとそこに含まれる元素にどのような影響があるのかを明らかにすることを目的とする。実験的研究としては、将来の宇宙応用をめざして、高エネルギー分光能力と撮像能力を実現する誘電体カロリメータの開発を行う。カロリメータとは、入射エネルギーを熱に換換、素子や吸収体の温度変化をみる「温度計」である。現在開発が行われているカロリメータは素子の抵抗変化を測る「抵抗温度計」であるが、カロリメータは極低温で動作させて初めて高い分光能力を実現できる。しかし冷凍機が寿命を制限する宇宙応用に関しては、熱的には必ずしも最適ではない。そこで、我々は素子の誘電率の変化を温度変化として捉える「非抵抗型温度計」である誘電体型カロリメータの開発を立ち上げ、性能実証を目的とする。

3. 研究の方法

観測的研究としては、X線天文衛星「すざく」で観測された銀河団データと地上望遠鏡で観測された赤外線、及び可視光観測データをもとに、銀河団の力学的、化学的進化の解明を目指す。

実験的研究では、誘電体X線カロリメータの性能実証のために、誘電体素子の製作から極低温環境下での性能実証を行う。

4. 研究成果

観測的研究

私は観測をX線天文衛星「すざく」に提案し、採択された天体 Abell 1246 銀河団の詳細なデータ解析を行った(図1)。

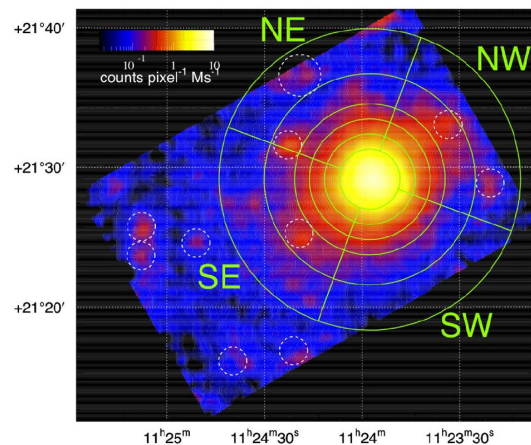


図 1. X線天文衛星「すざく」で観測した Abell 1246 銀河団のX線イメージ(主な発表論文)。

銀河団内に含まれる高温ガスの温度は中心で約 7000 万度であり、外側に行くほど低温になっていくことが確認され、銀河団の勢力

範囲であるピリアル半径での温度は約 3000 万度であった。銀河団は現在もなお宇宙の大規模構造からの質量降着を受け成長していると考えられているが、銀河団の熱的進化の指標として、「エントロピーパラメータ(温度×密度^{-2/3})」を用いて評価することができる。宇宙論的な数値シミュレーションでは、質量降着による重力加熱のみを受けて銀河団が成長してきたと考え、**「エントロピーパラメータ」は銀河団の中心からの半径の 1.1 乗に比例するはずである。**ところが、図 2 に示すように、Abell 1246 銀河団では、銀河団の外側に行くほど、数値シミュレーションで予測される値よりも小さいことが明らかになった。加えて、これまでに「すざく」衛星で観測された銀河団とも比較すると、観測されたほぼ全ての銀河団で同様の傾向を示すことが明らかになった。

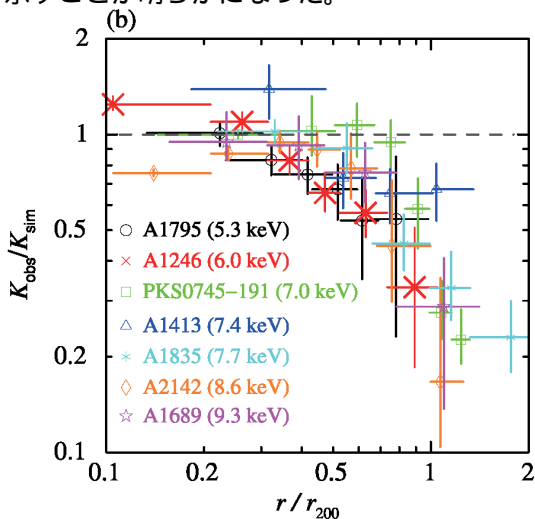


図 2: これまで「すざく」衛星で観測された各銀河団の高温ガスの「エントロピーパラメータ」と数値シミュレーション予測との比 (主な発表論文)。

この結果は、銀河団の外縁部では静水圧平衡が成り立っていないことを示唆する。X線観測では、温度と密度から静水圧平衡を仮定して銀河団質量を求めるが、弱い重力レンズ効果を用いた可視光観測からも銀河団質量を求めることができる(主な論文)。両者を比較すると、X線観測から静水圧平衡を仮定して求めた銀河団質量は、弱い重力レンズ効果を用いて求めた質量よりも銀河団質量を過小評価することが明らかになった。しかし、弱い重力レンズから求まる質量と、X線観測から直接求めることができる温度とガス密度を各銀河団で比較したところ、系の大きさをスケールするとどの銀河団も同様の傾向を示すことがわかった。これはどの銀河団も同じような熱的進化の過程を経て来たことを示唆するものである。

銀河団は宇宙年齢をかけて進化して来たため、ビッグバン以降生成された元素の多くを閉じ込めていると考えられる。もし、銀河単位質量(光度)あたりに生成される元素量が

同じであれば、質量(光度)で規格化された元素(鉄)と銀河質量(光度)の比は系の大きさによらず一定なはずである。ところが、これまで大きな銀河団の方が大きな比を持つという観測事実が知られていた。そこで我々は規模の違う銀河団の比と熱力学的な進化の指標である「エントロピーパラメータ」を系の平均温度で規格化することにより相関を調べた。その結果、大きな「エントロピーパラメータ」をもつ小規模な銀河団ほど、小さな元素量-銀河質量比を持つことがわかった。これは、重力加熱以外の非熱的なエネルギーの注入により、銀河団に含まれるガスと元素を銀河団に留めることができなかったことが原因と考えられる(主な発表論文)。

実験的研究

誘電体カロリメータの性能評価と技術立証を行った。誘電体素子として極低温における誘電率の温度依存性が大きいチタン酸ストロンチウム(SrTiO₃)を用いて素子の製作を行った。製作した素子の絶対温度 4/2 K における極低温下での誘電率の測定を行った。ここで、冷凍機としては 3He クライオスタットを用いて、室温から極低温ステージまで超伝導セミリジッドケーブルを用いて極低温実験環境を構築した。また、製作した誘電体素子をマイクロストリップラインに組み込み、LED 光を照射し性能実証試験を行った。読み出した信号は極低温ステージにおいたアンプで増幅し、室温部で IQ ミキサーを通して共振を検出した。図 3 が絶対温度 4/2 K で取得した共振信号であり、誘電体カロリメータがカロリメータシステムとして動作すること実証した。今後はアルファ線、X線信号の検出を目指していく。

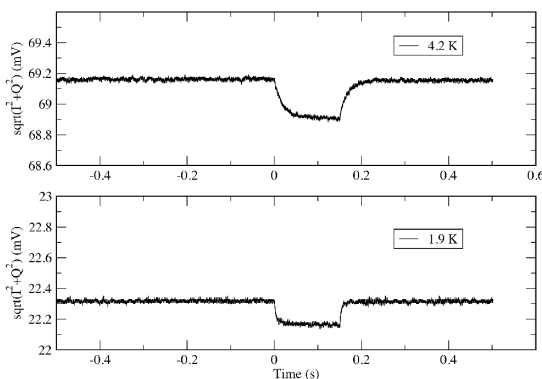


図 3: 製作した誘電体素子に絶対温度 4/2 K の環境下で LED 光を当てた時に得られた共振信号。

また、2015 年度に打ち上げ予定の X 線天文衛星「ASTRO-H」搭載軟 X 線分光器 SXS の中心メンバーとして飛翔体モデルの性能試験に参加し、特に冷凍機試験やデータ解析等を中心に貢献した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 8件)

K. Sato, K. Matsushita, N. Y. Yamasaki, S. Sasaki, T. Ohashi, “Temperature and entropy profiles to the virial radius of the Abell 1246 cluster observed with Suzaku”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読あり、vol.66., 88-1 – 88-15, 2014, 10.1093/pasj/psu061

N. Okabe, K. Umetsu, T. Tamura, Y. Fujita, M. Takizawa, Y-Y. Zhang, K. Matsushita, T. Hamana, Y. Fukazawa, T. Futamase, M. Kawaharada, S. Miyazaki, Y. Mochizuki, K. Nakazawa, T. Ohashi, N. Ota, T. Sasaki, K. Sato, S. Tam, “Universal profiles of the intracluster medium from Suzaku X-ray and Subaru weak-lensing observations”, Publications of the Astronomical Society of Japan, vol. 66, 99-1-99-14, 査読あり, 2014, 10.1093/pasj/psu075

T. Sasaki, K. Matsushita, K. Sato, “Metal Distributions out to $0.5 r_{180}$ in the Intracluster Medium of Four Galaxy Groups Observed with Suzaku”, The Astrophysical Journal, 査読あり, vol. 781, Issue 1, article id 36, 22pp, 2014, 10.1088/0004-637X/781/1/36

T. Tamura, N. Y. Yamasaki, R. Iizuka, Y. Fukazawa, K. Hayashida, S. Ueda, K. Matsushita, K. Sato, K. Nakazawa, N. Ota, M. Takizawa, “Gas Bulk Motion in the Perseus Cluster Measured with Suzaku”, The Astrophysical Journal, 査読あり, vol. 782, Issue 1, article id 38, 15pp. 2014, 10.1088/0004-637X/782/1/38

K. Ichikawa, K. Matsushita, N. Okabe, K. Sato, Y.-Y. Zhang, A. Finoguenov, Y. Fujita, Y. Fukazawa, M. Kawaharada, K. Nakazawa, T. Ohashi, N. Ota, M. Takizawa, T. Tamura, K. Umetsu, “Suzaku Observations of the Outskirts of A1835: Deviation from Hydrostatic Equilibrium”, The Astrophysical Journal, vol. 766, Issue 2, article id 90, 19 pp., 査読あり, 2013, 10.1088/0004-637X/766/2/90

J. Rutherford, D. Dewey, E. Figueroa-Feliciano, S. N. T. Heine, F. Bastien, K. Sato, C. R. Canizares, “A Decade-baseline Study of the Plasma States of Ejecta Knots in

Cassiopeia A”, The Astrophysical Journal, vol. 769, Issue 1, article id 64, 19 pp. 査読あり, 2013, 10.1088/0004-637X/769/1/64

Y. Shimoda, M. Kawaharada, K. Sato, T. Ohashi, Y. Ishisaki, I. Mitsuishi, H. Akamatsu, M. S. Tashiro, “Metals in the Intracluster Medium of MS 1512.4+3647 Observed with Suzaku: Implications for the Metal Enrichment History”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読あり, vol. 65, No. 5, Article No.111, 13 pp. 2013, 10.1093/pasj/65.5.111

Y. Fujita, N. Okabe, K. Sato, T. Tamura, S. Matsushita, H. Hirashita, M. Nakamura, K. Matsushita, K. Nakazawa, M. Takizawa, “Discovery of an Outstanding Disk in the cD Galaxy of the Hydra A Cluster”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読あり, vol 65, No. 6, Article No.L15, 5pp. 2013, 10.1093/pasj/65.6.L15

[学会発表](計 19件)

K. Sato, K. Matsushita, T. Sasaki, “Chemical evolution of galaxy clusters and groups observed with Suzaku”, Astroparticle view of Galaxy clusters, 招待講演, 2015年3月24-26日, 広島大学

横田佳奈、松下恭子、佐藤浩介、佐久間絵理、佐々木亨、阿部雄介、栗山翼、石崎欣尚、星野晶夫、「すざくによる大規模フィラメント上の銀河団 AWM7 の鉄質量-銀河光度比の方向依存性」、日本天文学会春季年会、2015年3月18-21日、大阪大学

佐々木亨、松下恭子、佐藤浩介、阿部雄介、横田佳奈、「すざくによる NGC1550 銀河群のピリアル半径付近までの鉄質量-銀河光度比とエントロピー分布」、日本天文学会春季年会、2015年3月18-21日、大阪大学

阿部雄介、松下恭子、佐藤浩介、佐々木亨、「すざく衛星を用いた銀河団外縁部でのアバングスの不定性の評価」、日本天文学会春季年会、2015年3月18-21日、大阪大学

伊藤由裕、松下恭子、佐藤浩介、峰崎岳夫、「活動銀河核の中性 Fe K 輝線幅の系統的解析による放射領域推定と時間変動性の発見」、日本天文学会、春季年会、2015年3月18-21日、大阪大学

辻本匡弘、他 29名(22番目佐藤浩介) ASTRO-H SXS チーム、「ASTRO-H 搭載精密軟 X 線分光装置 SXS の開発の現状 XIII」、日本天文学会春季年会、2015年3月18-21日、大阪大学

石崎欣尚、他 29 名(22 番目佐藤浩介)、ASTRO-H SXS チーム、「ASTRO-H 搭載精密軟 X 線分光装置 SXS の開発の現状(VI)、日本物理学会年次大会、2015 年 3 月 21-24 日、早稲田大学
栗山翼、佐藤浩介、松下恭子、赤松弘規、大橋隆哉、藤田裕、川原田円、田村隆幸、中澤知洋、岡部信広、太田直美、滝沢元和、「銀河団外縁部のエントロピー異常の原因の検証」、日本天文学会秋季年会、2014 年 9 月 11-13 日、山形大学
佐々木亨、松下恭子、佐藤浩介、岡部信広、「かみのけ座銀河団に見つかったサブハローのすざくによる観測」、日本天文学会秋季年会、2014 年 9 月 11-13 日、山形大学
菱右京、藤本龍一、小竹美里、佐藤浩介、「NGC4388 周辺の動圧はぎ取りによる広がった X 線放射」、日本天文学会秋季年会、2014 年 9 月 11-13 日、山形大学
長谷川俊介、松下恭子、佐藤浩介、小波さおり、高橋弘充、「すざく衛星によって観測された渦巻銀河 M31 中心部の重元素組成比」、日本天文学会秋季年会、2014 年 9 月 11-13 日、山形大学
山崎典子、他 29 名(22 番目佐藤浩介)、ASTRO-H SXS チーム、「ASTRO-H 搭載精密軟 X 線分光装置 SXS の開発の現状 XII」、日本天文学会秋季年会、2014 年 9 月 11-13 日、山形大学
佐々木亨、松下恭子、佐藤浩介、阿部雄介、横田佳奈、「巨大銀河団のピリアル半径までのガス質量、鉄質量と銀河光度の比」、日本天文学会春季年会、2014 年 3 月 19-22 日、国際基督教大学
竹井洋、他 29 名(22 番目佐藤浩介)、ASTRO-H SXS チーム、「ASTRO-H 搭載精密軟 X 線分光装置 SXS の開発の現状 XI」、日本天文学会春季年会、2014 年 3 月 19-22 日、国際基督教大学
澤田真理、山田真也、星野晶夫、佐藤浩介、他 12 名 ASTRO-H SXS チーム、「ASTRO-H 搭載 X 線マイクロカロリメータ SXS の分光性能に対する機械式冷凍機擾乱の影響と対策」、日本天文学会春季年会、2014 年 3 月 19-22 日、国際基督教大学
菊池貴大、関谷典央、満田和久、山崎典子、川崎繁雄、竹井洋、佐藤浩介、前畑京介、「誘電体 X 線マイクロカロリメータの GHz 帯読み出しの研究」、日本天文学会春季年会、2014 年 3 月 19-22 日、国際基督教大学
佐藤浩介、「銀河団の化学進化史」、研究環シンポジウム：宇宙の化学進化 2014、招待講演、2014 年 1 月 29-30 日、首都大学東京
横田佳奈、松下恭子、佐藤浩介、佐久間絵理、石崎欣尚、星野晶夫、「すざくで観測された AWM7 銀河団外縁部の方向依

存性と鉄の分布」、日本天文学会秋季年会、2013 年 9 月 10-12 日、東北大学
阿部雄介、松下恭子、佐藤浩介、佐々木亨、「すざく衛星によって観測されたケンタウルス座銀河団の重元素分布と鉄質量-銀河光度比」、日本天文学会秋季年会、2013 年 9 月 10-12 日、東北大学
飯島律子、三石郁之、大橋隆哉、松下恭子、佐藤浩介、「すざくによる M87 の重元素分布の観測(2)」、日本天文学会秋季年会、2013 年 9 月 10-12 日、東北大学

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者
佐藤 浩介 (SATO, Kosuke)
東京理科大学・理学部物理学科・助教
研究者番号：50453840

(2) 研究分担者
()

研究者番号：

(3) 連携研究者
()

研究者番号：