

令和 3 年 6 月 24 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K05393

研究課題名(和文)高精度X線分光を用いたプラズマ診断から探る銀河団ガスのダイナミクス

研究課題名(英文) Study of gas dynamics of the intra-cluster medium with high spectral energy resolution

研究代表者

佐藤 浩介 (SATO, Kosuke)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：50453840

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：銀河団とは、数千個の銀河が集まった宇宙で最大の重力的に束縛された天体である。銀河団は宇宙年齢をかけて成長してきたため、銀河団内の通常物質バリオンやダークマターの比は宇宙の組成比をよく再現していると考えられており、宇宙論パラメータを決めるにも重要な天体である。我々は、銀河団内を満ちる温度数千万度のプラズマのX線観測、銀河団を構成する銀河の可視光観測などの多波長にわたる観測から、銀河団のバリオン/ダークマター組成比を明らかにした。並行して、将来衛星搭載を目指し、高いエネルギー分光能力で銀河団の観測を実現するX線マイクロカロリメータの開発を行なった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

銀河団は、現在の宇宙の進化モデルである冷たいダークマターシナリオによると、衝突合体を宇宙年齢をかけて成長してきた天体である。我々は、銀河団のダークマター、通常物質であるバリオンの組成比をX線、可視光、電波観測を組み合わせ統合的にデータ解析を行なった。多波長による銀河団成長の検討は世界でも報告例は少なく、非常に重要な研究と言える。同時に、将来衛星搭載を目的としたX線マイクロカロリメータの開発を行なった。将来衛星は多ピクセル化とその読み出し技術の開発が鍵となるが、我々は世界に先駆けて高周波帯を用いた読み出し技術の開発を行なって、基礎技術の開発に成功した。

研究成果の概要(英文)：Clusters of galaxies which consist of several thousands of galaxies, are the largest virtualized system in the Universe and filled with the intra-cluster medium of a few times 10 K plasma. The clusters are good probe for investigating the evolution of the Universe because the baryon fraction reflects that of the Universe. We found that the baryon fraction of clusters are consistent with that of the Universe with the X-ray, optical, and radio observations. On the other hand, we also developed X-ray micro-calorimeters on board future satellite, which realize high spectral energy resolution to observe the diffuse sources such as clusters.

研究分野：X線天文学

キーワード：銀河団 X線マイクロカロリメータ

1. 研究開始当初の背景

銀河の大集団である銀河団は、重力的に束縛された宇宙最大の天体である。現在の宇宙をよく再現している標準的なモデルであるコールドダークマターモデルでは、小さい天体から生成され、衝突合体を繰り返して、銀河団は今もなお成長を続けていると考えられている。銀河団は、温度数千万度の高温プラズマで満たされており、この高温プラズマの X 線観測は、プラズマの温度や密度、元素含有量などの情報をもたらす。明るい銀河団の中心部では、放射冷却によりプラズマがエネルギーを失い、中心領域の圧力低下とともに周囲のガスが中心部に流れる冷却流が存在すると考えられてきたが、近年の観測により、中心部のプラズマの温度は予測と反して下げ止まっていることが示されてきた。中心部の冷却を止めている機構として、銀河団中心にある活動銀河中心核からのエネルギーインプットが提唱されていた。その結果、銀河団中心部にはプラズマの乱流があることが予測されており、その中心部の X 線による直接のガス速度測定が期待されていた。銀河団中心部に大きなガスの乱流があるとすると、静水圧平衡を仮定して X 線観測から導出される銀河団質量の推定にも影響を及ぼす可能性がある。銀河団質量は宇宙論パラメータにも大きな影響を及ぼすので、中心部でのプラズマの物理状態の解明は宇宙物理学上、大きな意味をもつ。

2016年2月に打ち上げられた日本の X 線天文衛星「ASTRO-H (ひとみ)」は、姿勢系の不具合により約 1 ヶ月の運用でミッションを終了したが、短い観測期間ながら非常に高いエネルギー分光能力を実現する X 線マイクロカロリメータ検出器 SXS の実力を示した。SXS で観測されたペルセウス座銀河団中心部は、それまでの銀河団像を一変させ、中心部での穏やかな高温プラズマ環境にあることを示した(Hitomi collaboration 2016)。しかし、初期観測の成果では軌道上での詳細なキャリブレーション結果や物理現象、プラズマモデリングが十分でない部分もあり、詳細なデータ解析結果を行う必要があった。「ASTRO-H(ひとみ)」衛星に搭載された X 線マイクロカロリメータによる観測は宇宙物理学上の問題に対しても大きなブレイクスルーをもたらすことが証明されたが、SXS 検出器の視野は 3 分角と小さく、銀河の大集団である銀河団全体や銀河団をもとりまく宇宙の大規模構造の力学的、化学的進化を解明するためには、高いエネルギー分光能力と広い視野を撮像可能な、将来カロリメータの開発が必要であると考えられていた。マイクロカロリメータは極低温で動作させ、はじめて非常に高いエネルギー分光能力を発揮する。よって、マイクロカロリメータの多画素化は、極低温ステージにたくさんのセンサー素子を配置するため、発熱による動作環境の構築が困難になるという問題点がある。よって、センサー素子自身の発熱を少なくする、読み出しに用いる配線を少なくして極低温ステージへの熱流入を少なくするなどのカロリメータシステムの技術開発が必要であると認識され始めていた。

2. 研究の目的

約 1 ヶ月間ながら、「ASTRO-H (ひとみ)」衛星で観測された初期データは Nature 紙(Hitomi collaboration 2016)に掲載されるなど、大きな注目を集めた。その後、軌道上でのキャリブレーションの影響やプラズマモデリングを反映させて、銀河団中心部のプラズマの物理状態を明らかにするために本研究を行なった。並行して、「ASTRO-H(ひとみ)」衛星は、X 線マイクロカロリメータの非常に高い分光性能で大きな成果をもたらしたものの、その視野は 3 分角と小さく、観測は明るい銀河団の中心部に限られた。銀河団のような視直径で数度にも渡る大きな天体の全体像を明らかにするためには、高い分光能力を維持しつつ、広視野を実現する X 線マイクロカロリメータ実現のため、共振回路を用いた読み出し方法の構築を目的として、検出器開発を行なった。

3. 研究の方法

「ASTRO-H(ひとみ)」衛星が打ち上げ直後の性能評価期間に観測したペルセウス座銀河団は全天で最も X 線で明るい銀河団である。銀河団を満たす温度数千万度の高温プラズマは熱制動放射により X 線を放射しており、エネルギースペクトル中で連続成分として観測される。一方で、銀河団の高温プラズマには宇宙年齢をかけて銀河団内で合成された元素のほとんどが含まれており、どのような元素がどのくらい作られたのかという化学進化を探ることができる。これら高温プラズマに豊富に含まれた元素は、プラズマ中で高階電離したイオンとして存在しており、特性 X 線(輝線)を放射する。この輝線から元素量を測定することができる。一般的に、銀河団を満たす高温プラズマは光学的に薄く、高温プラズマとイオンからの X 線放射は自らに対して透明であり、我々観測者に対してまっすぐに届く。一方で、高階電離したイオンからの共鳴線は強度が強い場合には光学的厚さが大きくなり、共鳴散乱することが知られている。もし、共鳴散乱が起こっているとすると、イオンはある特定のエネルギーの光子を吸収して、すぐにランダ

ムな方向に同じエネルギーの光子を再放出する。よって、ある特定のイオンの共鳴線の強度は、共鳴散乱によって歪められているため、共鳴散乱を起こしているイオンの元素量を調べる時には非常に注意が必要である。共鳴散乱の起こりやすさは、特定の遷移状態を持つイオンの光学的厚さで決まり、その光学的厚さは、イオンの振動子強度やそのプラズマ温度でのイオンの存在確率に依存する。ペルセウス座銀河団の中心部では、24階電離した鉄の共鳴線の光学的厚さが1を越え、共鳴散乱を起こしていることが示唆されていた。一方で、24階電離した鉄の禁制線は共鳴散乱の影響を受けないため、共鳴線と禁制線の比を同じ温度の典型的なプラズマからの放射と比較することで共鳴散乱の有無を明らかにすることが可能である。この研究のためには、24階電離した鉄の輝線領域(6.7 keV)で $E/dE=1000$ 程度のエネルギー分光能力が必要であり、1990年代からの X 線観測の主力検出器である X 線 CCD 検出器では実現することができず、これは「ASTRO-H (ひとみ)」衛星搭載の SXS 検出器で初めて共鳴線と禁制線の分離達成することができた(図 1)。ただし、銀河団中心部のプラズマに乱流運動があると、ドップラーシフトによって輝線の幅が広がり、光学的厚さが小さくなり、共鳴散乱の効果を打ち消す方向に働く。よって、共鳴散乱の速度とプラズマの乱流速度測定はお互いに相互依存関係にあり、両者の測定を同時に満足するようなプラズマ運動の力学状態の解釈が必要である。私は、この共鳴線と禁制線の比の直接観測の結果とモンテカルロシミュレーションを用いた銀河団中心部のモデル化を用いて、銀河団中心部の共鳴散乱効果について、詳細な研究を行なった。同時にプラズマの速度場の研究や元素組成などの研究にも大きな役割を果たした。

並行して、将来衛星搭載への実用に向けた、X 線マイクロカロリメータの開発を行なった。現在将来衛星搭載を予定されているマイクロカロリメータは「TES」型マイクロカロリメータであるが、抵抗を温度として読み出す抵抗温度計であるため、誘電体を用いた共振回路を利用する非抵抗型マイクロカロリメータとその読み出し回路の開発を JAXA 宇宙科学研究所と共同で行なった。実際には、誘電体素子を高周波 LC 回路の中に組み込み、誘電率の変化による共振周波数の変化を測定する。我々は高周波(GHz 帯)LC 共振回路を用いて信号伝送回路の電力透過特性の変化から共振周波数を読み出す方法の開発を行なった。同時に将来衛星に求められるカロリメータ技術や極低温環境の構築など、幅広く行なった。

4. 研究成果

観測的研究として、「ASTRO-H(ひとみ)」衛星搭載 SXS で観測されたペルセウス座銀河団の観測データにおいて、データのゲインや応答関数の見直しを行い、精密なデータ解析を行なった。また、光学的に薄いプラズマモデルも実際に観測されたデータと比較し、イテレーションを行なった。特に共鳴散乱解析では、共鳴線と禁制線の輝線強度比の比較が重要となるため、連続成分と輝線成分を独立に決定できるようなモデリングを独自に行なった。その結果、図 1 に示すように、ペルセウス座銀河団の中心部のスペクトルをよく再現することができた。また、共鳴線と禁制線の比は銀河団中心から外側に向かうに従って優位に変化することがわかった。この共鳴線と禁制線の比が典型的なプラズマモデルからどのようにずれているのかどうなのかを調べるために、我々はモンテカルロシミュレーションを用いてペルセウス座銀河団のプラズマの温度、密度、アバンドランスの三次元半径分布を仮定して共鳴散乱の強度を計算した。シミュレータで計算された光子リストに「ASTRO-H(ひとみ)」SXS の応答関数を考慮して、実際の観測を模擬して比較を行なった。SXS で共鳴線を除く輝線の線幅から測定された乱流速度を仮定すると、SXS で観測されたスペクトルから得られた共鳴線と禁制線の比はシミュレーションで得られた結果とよく一致した(図 1)。我々は、さらにプラズマの乱流速度の分布の違いによる輝線比の変化も議論した。また、観測事実として、共鳴線だけ他の輝線幅よりも有意に広いことも明らかにした。よって、我々は共鳴線と禁制線の輝線比と共鳴線だけに見られる輝線幅の広がりと同時に説明するためには、銀河団中心部での共鳴散乱が必要であると結論づけた(Hitomi collaboration 2018)。我々は共鳴散乱論文の他にも、プラズマ運動、アバンドランス比、プラズマモデリングの

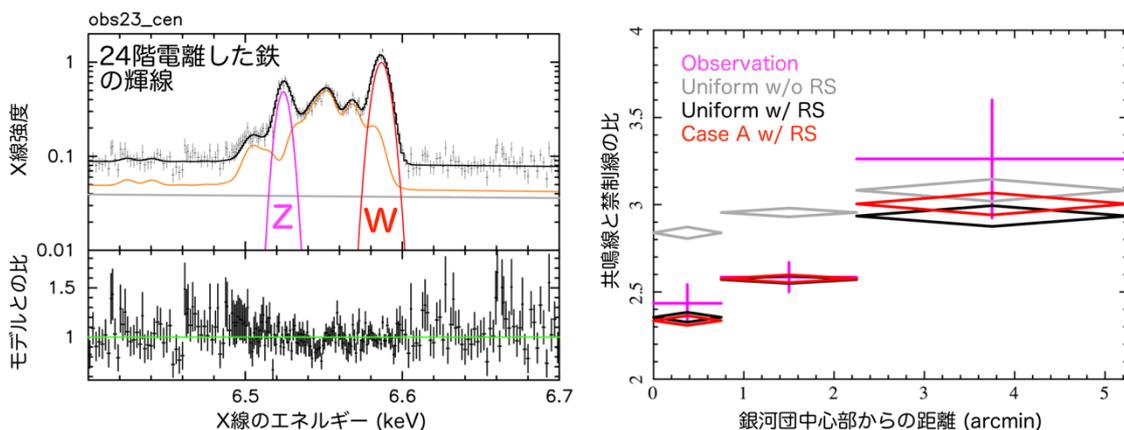


図 1: (左)SXS で観測されたペルセウス座銀河団中心のスペクトル。(右)観測とシミュレーションで得られた共鳴線と禁制線の比の半径分布。(Hitomi collaboration 2018)

論文の作成を牽引して多数の論文を出版した(一連の Hitomi collaboration 2018 論文等)。

実験的研究としては、宇宙科学研究所と共同研究を行い高周波共振回路の作成を行なった。実験を行うにあたり、産業総合研究所のグループとも研究を行い、我々が当初目指していた誘電体を用いた共振回路を TES 型マイクロカロリメータの多画素化に応用することによって、将来衛星に搭載するカロリメータの基礎技術となりえるという知見を得た。現在は、この手法を用いて多画素読み出しシステムの構築を目指している。同時に、埼玉大学においても極低温カロリメータ動作環境を構築している。温度 200 mK という極低温環境の自作構築に成功し、独自の TES センサーの評価システムを確立した。また、TES カロリメータはセンサー素子と垂直にかかる磁場により性能劣化が起こるためカロリメータ動作環境での磁場遮蔽システムのシミュレーション等も行なった。

我々は、銀河団解析とマイクロカロリメータシステムを通じた研究をもとに、将来の宇宙のバリオンの定量化を目指した、衛星計画の検討も行なった。これらの科学目的の基本コンセプトは佐藤が研究主査として、JAXA 宇宙科学研究所のリサーチグループとして 2020 年 3 月に承認された (https://www.isas.jaxa.jp/home/rigaku/open_wg.html)。今回の研究業績により、将来衛星実現に向けたカロリメータ技術の開発と宇宙のバリオンの定量化に向けての観測的研究の基礎がかたまっていると考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計21件（うち査読付論文 19件／うち国際共著 20件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Katsuda S, Ohno M., Mori K., Beppu T., Kanemaru Y., Tashiro M. S., Terada Y., Sato K., Morita K., Sagara H., Ogawa F., Takahashi H., Murakami H., Nobukawa M., Tsunemi H., Hayashida K., Matsumoto H., Noda H., Nakajima H., Ezoe Y., Tsuboi Y., Maeda Y., Yokoyama T., Narukage N.	4. 巻 891
2. 論文標題 Inverse First Ionization Potential Effects in Giant Solar Flares Found from Earth X-Ray Albedo with Suzaku/XIS	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 126 ~ 126
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab7207	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 A. Simionescu, S. Nakashima, H. Yamaguchi, K. Matsushita, F. Mernier, N. Werner, T. Tamura, K. Nomoto, J. de Plaa, S. C. Leung, 以下25名アルファベット順 K. Sato	4. 巻 483
2. 論文標題 Constraints on the chemical enrichment history of the Perseus Cluster of galaxies from high-resolution X-ray spectroscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1701-1721
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty3220	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tamura, Takayuki; Fabian, Andrew C.; Gandhi, Poshak; Gu, Liyi; Kamada, Ayuki; Kitayama, Tetsu; Loewenstein, Michael; Maeda, Yoshitomo; Matsushita, Kyoko; McCammon, Dan; Mitsuda, Kazuhisa; Nakashima, Shinya; Porter, Scott; Pinto, Ciro; Sato, Kosuke; Tombesi, Francesco; Yamasaki, Noriko Y.	4. 巻 71
2. 論文標題 An X-ray spectroscopic search for dark matter and unidentified line signatures in the Perseus cluster with Hitomi	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 50 (1-20)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz023	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Ohashi, T.; Ishisaki, Y.; Ezoe, Y.; Yamada, S.; Hayakawa, R.; Nunomura, K.; Sato, K.; Tawara, Y.; Mitsuishi, I.; Ohtsuka, K.; Mitsuda, K.; Yamasaki, N. Y.; Kikuchi, T.; Hayashi, T.; Muramatsu, H.; Nakashima, Y.; Ota, N.; Osato, K.; Ichinohe, Y.; Eckart, M. E.; Bandler, S. R.; Kelley, R. L.; Kilbourne, C. A.	4. 巻 10699
2. 論文標題 Super DIOS: future x-ray spectroscopic mission to search for dark baryons	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the SPIE	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2313122	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hitomi collaboration incl. Kosuke Sato	4. 巻 837
2. 論文標題 Hitomi Constraints on the 3.5 keV Line in the Perseus Galaxy Cluster	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L15 ~ L15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/aa61fa	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Akamatsu H., Fujita Y., Akahori T., Ishisaki Y., Hayashida K., Hoshino A., Mernier F., Yoshikawa K., Sato K., Kaastra J. S.	4. 巻 606
2. 論文標題 Properties of the cosmological filament between two clusters: A possible detection of a large-scale accretion shock by Suzaku	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A1 ~ A1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201730497	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hitomi collaboration incl. Kosuke Sato	4. 巻 551
2. 論文標題 Solar abundance ratios of the iron-peak elements in the Perseus cluster	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 478-480
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/nature24301	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Ezoe Yuichiro, DiPirro Michael, Fujimoto Ryuichi, Ishikawa Kumi, Ishisaki Yoshitaka, Kanao Kenichi, Kimball Mark, Mitsuda Kazuhisa, Mitsuishi Ikuyuki, Murakami Masahide, Noda Hirofumi, Ohashi Takaya, Okamoto Atsushi, Satoh Yohichi	4. 巻 4
2. 論文標題 Porous plug phase separator and superfluid film flow suppression system for the soft x-ray spectrometer onboard Hitomi	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems	6. 最初と最後の頁 1~1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/1.JATIS.4.1.011203	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tsujiimoto Masahiro, Mitsuda Kazuhisa, Kelley Richard L., den Herder Jan-Willem, Bialas Thomas G., Boyce Kevin R., Chiao Meng P., de Vries Cor P.	4. 巻 4
2. 論文標題 In-orbit operation of the soft x-ray spectrometer onboard the Hitomi satellite	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems	6. 最初と最後の頁 1~1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/1.JATIS.4.1.011205	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Porter Frederick S., Boyce Kevin R., Chiao Meng P., Eckart Megan E., Fujimoto Ryuichi, Ishisaki Yoshitaka, Kilbourne Caroline Anne, Leutenegger Maurice A., McCammon Daniel	4. 巻 4
2. 論文標題 In-flight performance of the soft x-ray spectrometer detector system on Astro-H	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems	6. 最初と最後の頁 1~1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/1.JATIS.4.1.011218	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hitomi collaboration incl. Kosuke Sato	4. 巻 4
2. 論文標題 Performance of the helium dewar and the cryocoolers of the Hitomi soft x-ray spectrometer	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems	6. 最初と最後の頁 1~1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/1.JATIS.4.1.011208	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hitomi collaboration incl. Kosuke Sato	4. 巻 70
2. 論文標題 Atmospheric gas dynamics in the Perseus cluster observed with Hitomi*	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx138	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hitomi collaboration incl. Kosuke Sato as the top corresponding author	4. 巻 70
2. 論文標題 Measurements of resonant scattering in the Perseus Cluster core with Hitomi SXS*	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx127	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hitomi collaboration incl. Kosuke Sato	4. 巻 70
2. 論文標題 Temperature structure in the Perseus cluster core observed with Hitomi*	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hitomi collaboration incl. Kosuke Sato	4. 巻 70
2. 論文標題 Atomic data and spectral modeling constraints from high-resolution X-ray observations of the Perseus cluster with Hitomi*	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx156	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hitomi collaboration incl. Kosuke Sato	4. 巻 70
2. 論文標題 Hitomi observation of radio galaxy NGC 1275: The first X-ray microcalorimeter spectroscopy of Fe-K line emission from an active galactic nucleus*	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx147	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hitomi collaboration incl. Kosuke Sato	4. 巻 70
2. 論文標題 Search for thermal X-ray features from the Crab nebula with the Hitomi soft X-ray spectrometer*	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx072	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hitomi collaboration incl. Kosuke Sato	4. 巻 70
2. 論文標題 Hitomi X-ray studies of giant radio pulses from the Crab pulsar*	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx083	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hitomi collaboration incl. Kosuke Sato	4. 巻 70
2. 論文標題 Hitomi observations of the LMC SNR N 132 D: Highly redshifted X-ray emission from iron ejecta*	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx151	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hitomi collaboration incl. Kosuke Sato	4. 巻 70
2. 論文標題 Glimpse of the highly obscured HMXB IGR J16318-4848 with Hitomi*	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx154	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tsujiimoto Masahiro, Okajima Takashi, Eckart Megan E, Hayashi Takayuki, Hoshino Akio, Iizuka Ryo, Kelley Richard L, Kilbourne Caroline A, Leutenegger Maurice A, Maeda Yoshitomo, Mori Hideyuki, Porter Frederick S, Sato Kosuke, Sato Toshiki, Serlemitsos Peter J, Szymkowiak Andrew, Yaqoob Tahir	4. 巻 70
2. 論文標題 In-flight calibration of Hitomi Soft X-ray Spectrometer. (3) Effective area	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計27件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 佐藤浩介、大橋隆哉、石崎欣尚、江副祐一郎、山田真也、山崎典子、中島裕貴、満田和久、石田学、前田良知、三石郁之、田原謙、藤本龍一、鶴剛、太田直美、大里健、中島真也、藤田裕、永井大輔、吉川耕司、河合誠之
2. 発表標題 ダークバリオン探査ミッションSuper DIOSの開発へ向けた検討 IV
3. 学会等名 日本天文学会2019秋季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Ishisaki, R.L. Kelley, H. Akamatsu, H. Awaki, T.G. Bialas, G.V. Brown, M.P. Chiao, E. Costantini, J.-W. den Herder, M.J. Dipirro, M.E. Eckart, Y. Ezoe, C. Ferrigno, R. Fujimoto, A. Furuzawa, S.M. Graham, M. Grim, T. Hayashi, T. Horiuchi, 以下 K. Sato, を含む34名
2. 発表標題 X線分光撮像衛星 XRISM 搭載 Resolve の開発の現状 IV
3. 学会等名 日本天文学会2019秋季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 杉山剣人、松下恭子、小林翔悟、佐藤浩介
2. 発表標題 銀河団外縁部の観測に対する前景放射の影響の評価 II
3. 学会等名 日本天文学会2019秋季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上田将暉, 松下恭子, 小林翔悟, 佐藤浩介
2. 発表標題 銀河団外縁部に存在するガス塊の探査
3. 学会等名 日本天文学会2019秋季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤浩介、内田悠介、大橋隆哉、石崎欣尚、江副祐一郎、山田真也、山崎典子、中島裕貴、満田和久、石田学、前田良知、三石郁之、田原譲、藤本龍一、鶴剛、太田直美、大里健、中島真也、藤田裕、永井大輔、吉川耕司、河合誠之、松下恭子、一戸悠人
2. 発表標題 ダークバリオン探査ミッションSuper DIOSの開発へ向けた検討V
3. 学会等名 日本天文学会2020春季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 杉山剣人, 松下恭子, 小林翔悟, 佐藤浩介
2. 発表標題 銀河団外縁部の観測に対する前景放射の影響の評価 III
3. 学会等名 日本天文学会2020春季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上田将暉, 松下恭子, 小林翔悟, 佐藤浩介
2. 発表標題 A2199 銀河団の外縁部に存在するガス塊の探査
3. 学会等名 日本天文学会2020春季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤浩介
2. 発表標題 ダークバリオン探査計画: Super DIOS の現状
3. 学会等名 高エネルギー宇宙連絡会, 第 19 回高宇連研究会「高宇連博士論文発表会・研究会」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤浩介、大橋隆哉、石崎欣尚、江副祐一郎、山田真也、山崎典子、中島裕貴、満田和久、石田学、前田良知、三石郁之、田原謙、藤本龍一、鶴剛、太田直美、大里健、中島真也、藤田裕、永井大輔、吉川耕司、河合誠之、松下恭子、一戸悠人、内田悠介
2. 発表標題 Dark Baryon 探査衛星: Super DIOS の検討
3. 学会等名 第 20 回宇宙科学シンポジウム、宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤浩介
2. 発表標題 ダークバリオン探査ミッション: Super DIOSの検討
3. 学会等名 第 18 回高宇連研究会「高エネルギー宇宙物理学の最前線と2020/30年代のロードマップ」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤浩介、他19名
2. 発表標題 ダークバリオン探査ミッション Super DIOSの開発へ向けた検討III
3. 学会等名 日本天文学会春季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤浩介、他19名
2. 発表標題 Dark baryon 探査衛星: Super DIOSの検討
3. 学会等名 第19回宇宙科学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Sato
2. 発表標題 Suzaku results on WHIM
3. 学会等名 HUBS 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤浩介、他15名
2. 発表標題 ダークバリオン探査ミッション Super DIOSの開発へ向けた検討II
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Sato and T. Ohashi
2. 発表標題 Instrumentation for Super DIOS
3. 学会等名 XXX IAU General Assembly (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Sato
2. 発表標題 Super DIOS: future X-ray spectroscopic mission to search for dark baryons
3. 学会等名 Alabama WHIM 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古川愛生, 松下恭子, 平井真一, 佐藤浩介
2. 発表標題 銀河団における高温ガスの乱流による共鳴散乱の影響の定量化
3. 学会等名 日本天文学会2018年春季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大橋隆哉、石崎欣尚、江副祐一郎、山田真也、一戸悠人、山崎典子、満田和久、田原 謙、三石郁之、大里 健、太田直美、佐藤浩介
2. 発表標題 ダークバリオン探査ミッションSuper DIOSの開発へ向けた検討II
3. 学会等名 日本天文学会2018年春季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Ishisaki, R.L. Kelley, 他アルファベット順、K. Sato
2. 発表標題 X線天文衛星代替機 XARM 搭載 Resolve の開発の現状
3. 学会等名 日本天文学会2018年春季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤浩介、古川愛生、松下恭子、大野雅功、深沢泰司、F. Paerels、I. Zhuravleva
2. 発表標題 「ひとみ(ASTRO-H)」SXSによる ペルセウス座銀河団中心部の共鳴散乱
3. 学会等名 第17回高宇連研究会「ひとみ衛星の成果と将来への展望」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Sato, T. Ohashi, R. Kelley
2. 発表標題 Super DIOS
3. 学会等名 第17回高宇連研究会「ひとみ衛星の成果と将来への展望」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤浩介、古川愛生、松下恭子、大野雅功、深沢泰司、F. Paerels、I. Zhuravleva、「ひとみ」コラボレーション
2. 発表標題 「ひとみ (ASTRO-H)」SXS によるペルセウス座銀河団中心部の共鳴散乱 III
3. 学会等名 日本天文学会2017年秋季年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中島真也、松下恭子、佐藤浩介、田村隆幸、Aurora Simionescu、Marshall W. Bautz、ひとみコラボレーション
2. 発表標題 X線天文衛星「ひとみ」によるペルセウス座銀河団の温度構造解析 II
3. 学会等名 日本天文学会2017年秋季年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 古川愛生, 松下恭子, 佐藤浩介, 深沢泰司, 大野雅功, 挽谷政弥
2. 発表標題 ペルセウス座銀河団における高温ガスの乱流による共鳴散乱の評価 II
3. 学会等名 日本天文学会2017年秋季年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 天海公志, 松下恭子, 佐藤浩介
2. 発表標題 z~1までの銀河団ガスの鉄元素分布の進化
3. 学会等名 日本天文学会2017年秋季年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大橋隆哉, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 山田真也, 山崎典子, 満田和久, 田原 謙, 三石郁之, 太田直美, 佐藤浩介, IODIOS ワーキンググループ
2. 発表標題 ダークバリオン探査ミッションSuper DIOSの開発へ向けた検討II
3. 学会等名 日本天文学会2017年秋季年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Sato, M. Furukawa, K. Matsushita, I. Zhuravleva, A. Ogorzalek, S. Allen, F. Paerels, M. Ohno, Y. Fukazawa, and Hitomi collaborations
2. 発表標題 Measurements of resonant scattering in the Perseus cluster core with Hitomi SXS
3. 学会等名 European Space Agency, Xray Universe 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

本研究課題での成果および得た知見をもとにして、JAXA宇宙科学研究所のリサーチグループ「コズミックネットワークを巡るエネルギーと物質の探査 RG」(研究主査: 佐藤浩介)として申請し、2020年3月に承認された(https://www.isas.jaxa.jp/home/rigaku/open_wg.html)。

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------