

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14524

研究課題名（和文）X線精密分光観測と微細構造の系統探査で探る銀河団プラズマの物理量

研究課題名（英文）Investigating the physical properties of the intracluster medium through high-resolution X-ray spectroscopy and high-resolution X-ray imaging

研究代表者

一戸 悠人 (Ichinohe, Yuto)

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・研究員

研究者番号：30792519

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究結果によって、画像上の微細構造を用いた手法においては実際にICM実効粘性に制限をつけることに成功したほか、新たな手法を複数開発できた。高精度X線分光を用いた手法においては、深層学習を利用した新たなデータ解析手法を開発できた。また、打ち上げが大幅に遅れたにも関わらず、Resolveを用いて銀河団プラズマの観測データが続々と得られるようになってきており、銀河団プラズマの物理的理解が大幅に進む下地は整った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

銀河団プラズマの乱流・磁場などの物理状態は、宇宙物理学的にも宇宙論的にも重要であるが、理解がほとんど進んでいない。これらの問題は根本的に、これら基礎物理や実効的な物理パラメータを直接観測的に理解することによってのみ解決される。本研究により、銀河団のミクロな物理量を探るための重要な二つのプローブが大幅に進歩したと言える。物理を探る下地を整えたことで、来るXRISMの時代に向けて万全の体制で銀河団プラズマの物理状態を探ることができるようになる。

研究成果の概要（英文）：We have succeeded in actually putting a constraint on the ICM effective viscosity for the method using fine structures on images, and have also developed several new methods. For the method using high-precision X-ray spectroscopy, we were able to develop a new data analysis method using deep learning. In addition, despite the significant delay in the launch of Resolve, observation data of galaxy clusters have been obtained one after another using Resolve, and the groundwork has been laid for significant progress in understanding the physics of the intracluster medium.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：銀河団 X線分光

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙に存在する観測可能な物質のほとんどは、宇宙最大の重力束縛構造である銀河団の中に、X線で輝く高温プラズマ (intracluster medium; ICM) の状態で存在する。銀河団は衝突により成長するが、衝突の莫大な運動エネルギーがどのように散逸するのかは、銀河団プラズマの実効的な粘性や熱伝導率などのミクロな物性や、磁場・乱流・バルク運動・粒子加速による非熱的な効果などの様々な不確定性のため、理解がほとんど進んでいない。また、銀河団の質量を X線観測によって見積もることは、他の様々な手法とともに現代の観測的宇宙論における要石であるが、乱流・磁場などの ICM 物性の不確かさがバイアスとなる。これらの問題は根本的に、銀河団プラズマの基礎物理や実効的な物理パラメータを観測的に理解することによってのみ解決される。

ひとみ衛星には従来よりエネルギー分解能が二桁高い軟 X線撮像分光器 (Soft X-ray Spectrometer, SXS) が搭載された。ひとみ衛星は打ち上げ後約一ヶ月で通信途絶したが、それまでに観測された天体の一つが、ペルセウス座銀河団である。SXS を用いた運動状態の解析により、銀河団における乱流の構造とその起源についての重要なヒントが提示された。その一方で、ひとみ衛星の代替機 XRISM の打ち上げが 2021 年度末に予定されていた (研究開始当初)。XRISM もメイン観測装置としてカロリメータを搭載し、依然として銀河団は初期観測フェーズにおける主要なターゲットであるため、今後さらに ICM の物理に関する情報が集積されていく予定であった。

高精度分光と相補的になる手法が、高角度分解能撮像観測である。Chandra 衛星は 1999 年に打ち上げられ、秒角に達する撮像性能で銀河団の様々な姿を明らかにしてきた。近年になり、これまでに発見されてきたブラックホールからのバブルや衝撃波、プラズマ境界面に位置する cold front などの比較的大きな構造だけでなく、それらに付随する Kelvin-Helmholtz 不安定性や、ガス運動により局所的に強められた磁場を原因とする plasma depletion layer など、サブ構造というべき小さな構造が、ICM 物理のプロープとして急速に注目されはじめた。

## 2. 研究の目的

本研究の当初の目的は、XRISM による高角度分解能撮像観測データと、Chandra による高エネルギー分解能分光観測データを組み合わせ、謎に包まれている ICM の物理状態について、観測から制限を加えることである。本研究では、プラズマの微細空間構造に着目し、それに基づいて戦略的な Resolve の初期観測を狙うというこれまでにない創造的な組み合わせの計画に基づき、Chandra 衛星のアーカイブデータを利用した大規模な調査と Resolve 観測計画の立案、それに向けた Resolve 性能の最適化、そして実際に得られた Resolve の詳細なデータ解析を行う。

## 3. 研究の方法

### (1) Chandra 衛星のアーカイブデータの解析による、微細空間構造の探索

Chandra 衛星の利用可能なアーカイブデータを均一な手法で解析し、微細構造を探索する。カタログを元に明るさが上位である銀河団から順にアーカイブデータを解析し、微細構造の発見、および現状のデータで可能な範囲で ICM 物理量へ制限をつけることを目指す。また、この結果を受け、XRISM の初期観測期間に観測すべきターゲットを選出し、観測提案を作成する。

### (2) Resolve 検出器の性能の最適化

軌道上でカロリメータを用いて天体を観測した例は未だひとみ衛星による数例のみである。従って、バックグラウンド環境や装置の応答、実際に達成できるパフォーマンスとその安定性など、理解が不十分な点が多い。XRISM のカロリメータチームに所属することで、XRISM 衛星の打ち上げ前のフライトモデルを用いた試験や地上試験のデータ解析を通して装置の理解を深める。

## 4. 研究成果

(1) 明るい銀河団のアーカイブを系統的に解析した結果、Abell 2319 銀河団にこれまで報告されていなかった多数の興味深い構造が見られることを発見した。中でも銀河団プラズマ境界面における流体不安定性の発現と考えられる構造を発見し、流体不安定性解析の手法と組み合わせることにより、境界面付近での銀河団プラズマの実効粘性に制限をつけることができた。この

ほかに、これまであまり見られていなかった銀河団プラズマ境界面の分裂や、境界面上での不安定性による境界面自体の侵食を示唆する結果、また境界面における磁場の漏れ込みを示唆する結果などが得られた。これらの結果は論文として出版された。

(2) XRISM打ち上げが当初の予定より大幅に遅れることとなったことを受け、銀河団のみならず、超新星残骸など非分散型カロリメータで初めて高精度分解能が本格的に実現される天体についての解析などに着手し、高エネルギー分解能分光データ解析と相補的になる、高角度分解能画像データ解析において、医療画像解析に用いられる free-form image registration という異分野手法を導入することで、従来は難しかった変形する天体の各部分についての時間的な特徴付けを初めて実現し、論文を出版した。

(3) コールドフロントと呼ばれる銀河団プラズマの接触不連続面や衝撃波といった構造の近傍でのガス運動を測定することで、銀河団プラズマの粘性や磁場といったミクロな物理量に対する制限をつけられると考えられる。こうした解析を念頭におき、高角度分解能をもつ Chandra 衛星のアーカイブデータ解析という観点で、コールドフロントや衝撃波を統一的に扱い解析できるような手法を開発した。いくつかの天体中の構造に実際に適用し、新たな結果を得た。

(4) カロリメータからのデータ処理における最適フィルタ処理において、クロストークなどの原因により波形が劣化することで、エネルギー分解能が悪化することが知られている。深層学習などのデータサイエンス的手法を波形処理に応用することで自動的に波形弁別を行う研究を行い、国際低温検出器学会で発表を行った他、同原理実証の論文が受理された。

(5) Resolve カロリメータと類似の原理で動作する TES カロリメータを用いた、J-PARC や SPring-8 などの加速器施設での地上実験にも参加し、ソフトウェアの開発などを行うことで、カロリメータ検出器の理解を深めた。これら実験の結果は複数論文として出版された。

(6) 検出器チームとして宇宙科学研究所でのフライトモデル試験に参加したほか、実機データのノイズ解析などを行った。また、2023年9月7日に XRISM が打ち上がった直後には、銀河団研究の見解を生かし、Resolve 検出器の軌道上光軸較正を行った。

(7) 打ち上げ前のサイエンスチームの活動として、打ち上げ直後の performance verification (PV) フェーズにおける初期観測天体の観測戦略の議論や、Modulated X-ray Source によるバックグラウンドの観測への影響の議論などを行なった。Chandra 解析の結果を受けて、PV フェーズにおける観測計画を複数提出した。また、韓国で行われた国際天文学連合総会において、XRISM 開発の現状、および期待される科学成果などについて招待講演を行なった。さらに、XRISM 観測とシナジーが予想される天体の他装置による観測プロポーザルなどを提出した。

(8) 打ち上げ後 XRISM サイエンスチームとしての活動として、性能評価フェーズに取得された銀河団データの解析を精力的に行なっている。Hitomi 衛星データ解析をリードした経験を活かし、速度構造の直接測定のサブチームをリードしている。また、銀河団プラズマの物理量を探るのに最適な天体を実際に Resolve を用いて観測することを目指し、前述の Chandra アーカイブデータ研究結果も踏まえ、一般観測フェーズに向けたプロポーザルを執筆した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 17件／うち国際共著 15件／うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Sato K., Yamasaki N. Y., Ishida M., Maeda Y., Mitsuda K., Ishisaki Y., Fujita Y., Ezoe Y., Mitsuishi I., Tawara Y., Osato K., Kawai N., Matsushita K., Nagai D., Yoshikawa K., Fujimoto R., Tsuru T. G., Ota N., Yamada S., Ichinohe Y., Uchida Y., Nakashima Y.	4. 巻 209
2. 論文標題 Super DIOS Project for Exploring “Dark Baryon”	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 971～979
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10909-022-02910-w	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 Li Wenshuai, Yamada Shinya, Hashimoto Tadashi, Okumura Takuma, Hayakawa Ryota, Nitta Kiyofumi, Sekizawa Oki, Suga Hiroki, Uruga Tomoya, Ichinohe Yuto, Sato Toshiki, Toyama Yuichi, Noda Hirofumi et al.	4. 巻 1240
2. 論文標題 High-sensitive XANES analysis at Ce L2-edge for Ce in bauxites using transition-edge sensors: Implications for Ti-rich geological samples	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Analytica Chimica Acta	6. 最初と最後の頁 340755～340755
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.aca.2022.340755	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 Kitayama Tetsu, Ueda Shutaro, Okabe Nobuhiro, Akahori Takuya, Hilton Matt, Hughes John P, Ichinohe Yuto, Kohno Kotaro, Komatsu Eiichiro, Lin Yen-Ting, Miyatake Hironao, Oguri Masamune, Sifon Cristobal, Takakuwa Shigehisa, Takizawa Motokazu, Tsutsumi Takahiro, van Marrewijk Joshiwa, Wollack Edward J	4. 巻 75
2. 論文標題 Galaxy clusters at $z \sim 1$ imaged by ALMA with the Sunyaev-Zel'dovich effect	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 311～337
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/pasj/psac110	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Ichinohe Yuto, Sato Toshiki	4. 巻 946
2. 論文標題 Spatiotemporal Characterization of Cassiopeia A	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 87～87
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/acafe0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Ichinohe Y., Yamada S., Hayakawa R., Okada S., Hashimoto T., Tatsuno H., Suda H., Okumura T.	4. 巻 -
2. 論文標題 Application of Deep Learning to the Evaluation of Goodness in the Waveform Processing of Transition-Edge Sensor Calorimeters	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	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) 10.1007/s10909-022-02719-7	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 Hashimoto T., Aikawa S., Akaishi T., Asano H., Bazzi M., Bennett D.A., Berger M., Bosnar D., Butt A.D., Curceanu C., Doriese W.B., Durkin M.S., Ezoë Y., Fowler J.W., Fujioka H., Gard J.D., Guaraldo C., Gustafsson F.P., Han C., Hayakawa R., Hayano R.S., Hayashi T., Ichinohe Y., et al. J-PARC E62 Collaboration	4. 巻 128
2. 論文標題 Measurements of Strong-Interaction Effects in Kaonic-Helium Isotopes at Sub-eV Precision with X-Ray Microcalorimeters	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	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) 10.1103/PhysRevLett.128.112503	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 Hayakawa Ryota, Yamada Shinya, Suda Hirotaka, Ichinohe Yuto, Higurashi Ryota, Sakemi Haruka, Machida Mami, Ohmura Takumi, Katsuda Satoru, Uchiyama Hideki, Sato Toshiki, Akamatsu Hiroki, Axelsson Magnus	4. 巻 -
2. 論文標題 X-ray hot spots in the eastern ear of the supernova remnant W50 and the microquasar SS433 system	5. 発行年 2022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/psac011	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 Zhang X., Simionescu A., Stuardi C., van Weeren R. J., Intema H. T., Akamatsu H., de Plaa J., Kaastra J. S., Bonafede A., Bruggen M., ZuHone J., Ichinohe Y.	4. 巻 656
2. 論文標題 Deep Chandra observations of merging galaxy cluster ZwCl 2341+0000	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A59 ~ A59
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202141540	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 Okumura T., Azuma T., Bennett D.A., Caradonna P., Chiu I., Doriese W.B., Durkin M.S., Fowler J.W., Gard J.D., Hashimoto T., Hayakawa R., Hilton G.C., Ichinohe Y., Indelicato P., Isobe T., Kanda S., Kato D., Katsuragawa M., Kawamura N., Kino Y., Kubo M.K., Mine K., Miyake Y., Morgan K.M., Ninomiya K., Noda H., et al.	4. 巻 127
2. 論文標題 Deexcitation Dynamics of Muonic Atoms Revealed by High-Precision Spectroscopy of Electronic K X Rays	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	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) 10.1103/PhysRevLett.127.053001	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 Okumura Takuma, Azuma Toshiyuki, Bennett Douglas A., Caradonna Pietro, Chiu I-Huan, Doriese W. Bertrand, Durkin Malcolm S., Fowler Joseph W., Gard Johnathon D., Hashimoto Tadashi, Hayakawa Ryota, Hilton Gene C., Ichinohe Yuto, Indelicato Paul, Isobe Tadaaki, Kanda Sohtaro, Katsuragawa Miho, Kawamura Naritoshi, et al.	4. 巻 31
2. 論文標題 Dynamical Response of Transition-Edge Sensor Microcalorimeters to a Pulsed Charged-Particle Beam	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2021.3067793	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 Ueda Shutaro, Ichinohe Yuto, Molnar Sandor M., Umetsu Keiichi, Kitayama Tetsu	4. 巻 892
2. 論文標題 Gas Density Perturbations in the Cool Cores of CLASH Galaxy Clusters	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 100 ~ 100
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab7bdc	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 Yamada S., and the HEATES collaboration, Hayakawa R., Tatsuno H., Fowler J. W., Swetz D. S., Bennett D. A., Durkin M., O'Neil G. C., Ullom J. N., Doriese W. B., Reintsema C. D., Gard J. D., Okada S., Hashimoto T., Ichinohe Y., Noda H., Hayashi T.	4. 巻 200
2. 論文標題 High Energy Background Event Identification Using Local Group Trigger in a 240-pixel X-ray TES Array	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 392 ~ 399
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-020-02468-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hayakawa R., the HEATES collaboration, Yamada S., Tatsuno H., Fowler J. W., Swetz D. S., Bennett D. A., Durkin M., O'Neil G. C., Ullom J. N., Doriese W. B., Reintsema C. D., Gard J. D., Okada S., Hashimoto T., Ichinohe Y., Noda H., Hayashi T.	4. 巻 200
2. 論文標題 Waveform Analysis of a 240-Pixel TES Array for X-Rays and Charged Particles Using a Function of Triggering Neighboring Pixels	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 269 ~ 276
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-020-02449-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Okada S., Azuma T., Bennett D. A., Caradonna P., Doriese W. B., Durkin M. S., Fowler J. W., Gard J. D., Hashimoto T., Hayakawa R., Hilton G. C., Ichinohe Y. et al.	4. 巻 200
2. 論文標題 X-ray Spectroscopy of Muonic Atoms Isolated in Vacuum with Transition Edge Sensors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 445 ~ 451
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-020-02476-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Tatsuno H., the J-PARC E62 Collaboration, Bennett D. A., Doriese W. B., Durkin M. S., Fowler J. W., Gard J. D., Hashimoto T., Hayakawa R., Hayashi T., Hilton G. C., Ichinohe Y., Noda H., O'Neil G. C., Okada S., Reintsema C. D., Schmidt D. R., Swetz D. S., Ullom J. N., Yamada S.	4. 巻 200
2. 論文標題 Mitigating the Effects of Charged Particle Strikes on TES Arrays for Exotic Atom X-ray Experiments	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 247 ~ 254
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-020-02484-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Yamada Shinya, Ichinohe Yuto, Tatsuno Hideyuki, Hayakawa Ryota, Suda Hirotaka, Ohashi Takaya, Ishisaki Yoshitaka, Uruga Tomoya, Sekizawa Oki, Nitta Kiyofumi, Takahashi Yoshio, Itai Takaaki, Suga Hiroki, Nagasawa Makoto, Tanaka Masato, Kurisu Minako, Hashimoto Tadashi, et al.	4. 巻 92
2. 論文標題 Broadband high-energy resolution hard x-ray spectroscopy using transition edge sensors at SPring-8	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 013103 ~ 013103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0020642	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 Ichinohe Y, Simionescu A, Werner N, Markevitch M, Wang Q H S	4. 巻 -
2. 論文標題 Substructures in the core of Abell 2319	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	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/mnras/stab1060	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1件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Yuto Ichinohe
2. 発表標題 XRISM observation of galaxy clusters
3. 学会等名 Dynamics of the ICM: Radio and X-ray Observations and Theory, IAUGA 2022 FM6 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>最先端超伝導検出器で探るミュオン原子形成過程の全貌  <a href="https://www.rikkyo.ac.jp/news/2021/07/mknpps000001oo10.html">https://www.rikkyo.ac.jp/news/2021/07/mknpps000001oo10.html</a>  大強度加速器×超高精度“温度計”で原子核を作る力に迫る  <a href="https://www.rikkyo.ac.jp/news/2022/03/mknpps000001wdb7.html">https://www.rikkyo.ac.jp/news/2022/03/mknpps000001wdb7.html</a>  超伝導転移端検出器TESを用いた蛍光XAFS分析に成功  <a href="https://www.rikkyo.ac.jp/news/2021/01/mknpps000001dxgp.html">https://www.rikkyo.ac.jp/news/2021/01/mknpps000001dxgp.html</a></p>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

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
---------	---------