

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17610

研究課題名（和文）多波長観測による銀河団同士の衝突が引き起こす電波放射の起源と質量進化の解明

研究課題名（英文）Multi-wavelength study of evolution of galaxy clusters, thermodynamics of intracluster medium, and origin of diffuse radio emission

研究代表者

上田 周太朗（UEDA, Shutaro）

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・宇宙航空プロジェクト研究員

研究者番号：40748258

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、X線・可視光・電波を用いた多波長観測により銀河団の質量成長の解明を目指した。本研究において、力学的に緩和した銀河団の典型と考えられてきた銀河団から衝突の痕跡を示す運動を発見し、銀河団ははまだ質量成長中であることを示唆した。また、ペルセウス座銀河団のX線天文衛星「ひとみ」の観測データを詳細解析し、銀河団ガスの速度場の空間分布を初測定した。X線天文衛星チャンドラや電波望遠鏡ALMA、ハッブル望遠鏡を駆使して、衝突により変化した銀河団ガスの特性や幾何学を解明した。

研究成果の概要（英文）：This research focused on merging galaxy clusters to understand the evolution of large-scale structure through multi-wavelength observations done by X-ray, optical, and radio. In this research, we found a 100-kpc-scale gas motion in the well-known dynamically relaxed galaxy clusters. This indicates that the mass growth continuously takes place even though galaxy cluster seems to be relaxed. We furthermore succeeded in measuring a velocity field of the intracluster medium in the entire core of the X-ray brightest cluster, the Perseus cluster, using Hitomi X-ray Observatory for the first time. In addition, we analyzed the data taken by Chandra, Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA), and Hubble Space Telescope for the well-known merging clusters and revealed the thermodynamical properties of intracluster medium and geometry of mergers.

研究分野：銀河団の観測的研究

キーワード：銀河団 X線天文学 X線天文衛星ひとみ 多波長観測 銀河団ガス

### 1. 研究開始当初の背景

これまで X 線観測で容易に衝突銀河団を同定でき、シンクロトロン放射も検出され、衝突を裏付けていた。しかし 2014 年に従来モデルでは説明できない、広がった電波放射を持ちながらも X 線観測で衝突を見いだせない銀河団が発見された。その銀河団は、10 例ほどしか発見されていない、クールコアを持ち、最大輝度銀河にクエーサーを持つ特異な銀河団でもあった。

### 2. 研究の目的

衝突銀河団を X 線・重力レンズ・電波の多波長で観測し、銀河団の質量進化や銀河団ガスの熱力学的性質の変化を解明する。さらにクールコアを持つ銀河団の最大輝度銀河中のクエーサーと衝突の関係を明らかにし、超巨大質量ブラックホールの質量成長を解明する。

### 3. 研究の方法

本研究は銀河団を X 線、可視光、電波の多波長で観測し、銀河団ガスと暗黒物質の分布の測定から銀河団の質量進化を解明する。本研究で重視するのが、X 線帯域における高角度分解能観測と精密分光観測である。前者はチャンドラ衛星、後者は「ひとみ」衛星を用いて実施する。

銀河団の質量の大部分は暗黒物質が担っているため、重力レンズ観測による暗黒物質の総量や分布は銀河団の進化を解明するうえで重要である。銀河団の大局的な質量分布はすばる望遠鏡による弱重力レンズ観測で、中心領域の詳細な質量分布はハッブル望遠鏡による強い重力レンズ観測で測定する。

銀河団ガスの観測において X 線観測と相補的になるのが電波観測、とくにスニヤエフ・ゼルドビッチ効果の観測である。ALMA 望遠鏡を用いて高角度分解能観測でこの効果を捉える。また衝突などに付随する非熱的成分の検出のために ATCA 望遠鏡を活用する。

X 線高角度分解能観測から、X 線表面輝度に存在する微小な構造を捉え、銀河団が衝突中にあるかどうか明らかにする。そのような銀河団に対しさらに電波・可視光観測を行うことで、衝突によって銀河団ガスの性質がどのように変化するのか明らかにする。衝突銀河団と相補的となる、クールコアを持つ銀河団についても同様の観測、解析を行う。また超巨大質量ブラックホールの成長を解明すべく、精密分光観測によりクールコアを持つ銀河団の中心領域に存在する銀河団ガスの速度場を測定する。また、低温ガスから強く放射される重元素の輝線の測定を行う。もし銀河団ガスが X 線放射によって冷却され、最大輝度銀河への質量降着が起きていれば、銀河団ガスの速度場は中心集中の傾向を示すこ

とが予想され、冷却が起きているかどうかは低温ガスの有無から明らかにできる。クエーサーの活動の源となるガスの起源を解明し、それらが銀河団の進化とどのような関係があるのか調査する。

### 4. 研究成果

(1) 本研究により、長年衝突を経験していないと考えられてきたクールコアを持つ銀河団から衝突の痕跡となる渦巻構造を X 線表面輝度分布の画像解析から明らかにした (図 1)。

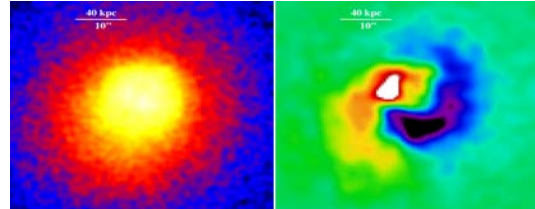


図 1. 長年衝突を経験していないと考えられてきた A1835 銀河団の X 線表面輝度分布 (左図) と、X 線表面輝度分布の平均成分を差し引いた後の差分画像 (右図)。青色は平均成分に対し不足している領域、赤色は平均に対し超過していることを示す。超過・不足領域が渦を巻くようにして銀河団中心に存在していることが判る。(Ueda et al. 2017)

この成果は、クールコアを持つ力学的に安定した銀河団であっても質量成長が継続していることを示唆する。X 線表面輝度分布をかき乱すような激しい衝突だけに着目するだけでは質量成長のモデルに見落としがある危険性を指摘する。A1835 銀河団は広がった電波放射を持つことでも知られており、このような規模の小さい衝突がシンクロトロン放射を生み出している可能性も考えられる。

(2) 最も近傍の銀河団の 1 つで、最大輝度銀河に明るい活動銀河核があるペルセウス座銀河団を「ひとみ」衛星で観測し、初めて 100kpc までの銀河団ガスの速度場の測定に成功した。最大輝度銀河をゼロ点としたせん断流的運動と、100km/s 程度の一様な視線方向速度分散を検出した。一方、活動銀河核と銀河団ガスが相互作用していると思われる領域では、2 倍程度大きい 200km/s 程度の視線方向速度分散があることが判った (図 2)。

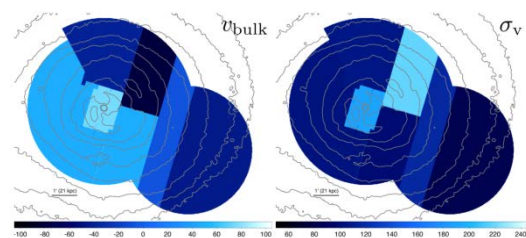


図 2. ペルセウス座銀河団の 100kpc 以内の銀河団ガスの速度場。左図がバルク運動の大きさ、右図が視線方向速度分散の大きさを示す。(Hitomi Collaboration 2018, 研究代表者が corresponding author)

視線方向速度分散の起源が乱流だと考えた場合、従来の銀河団ガスの活動銀河核による加熱モデルでは説明が難しく、冷却を食い止めるために新しいモデルが必要なことを示唆する。非常に低温な銀河団ガスの成分は検出されず、活動銀河核の活動源のガスの起源に迫ることはできなかったが、長年にわたり論争が続いている銀河団ガスの冷却問題に革新的進歩をもたらした。

(3) RXJ1347.5-1145 銀河団の X 線、可視光、電波の高角度分解能観測データを駆使して、衝突銀河団の幾何学と衝突により変化した銀河団ガスの性質を明らかにした。この銀河団がら、X 線表面輝度分布をかき乱すような激しい衝突の他に、中心領域に微小な攪乱を引き起こす程度の小さな衝突の痕跡を見つけた。激しい衝突は長年指摘され続けてきたが、それが衝突間もない事象であり、落下中の銀河団は動圧によるガスの剥ぎ取りを受け、さらに剥ぎ取られたガスが超高温に加熱されていることを明らかにした。高角度分解能のスニヤエフ・ゼルドヴィッチ効果の観測により、中心領域の攪乱は音速に比べて十分小さい速度で起きている直接証拠を掴んだ。これらは X 線表面輝度分布の中の揺らぎがどのような物理現象で生じるかを示す革新的な観測証拠である。

## 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 23 件)

①Hitomi Collaboearion, Aharonian Felix, Akamatsu Hiroki, Akimoto Fumie, Allen Steven W., Angelini Lorella, Audard Marc, Awaki Hisamitsu, Axelsson Magnus, Ueda Shutaro, 他, “Hitomi X-ray observation of the pulsar wind nebula G21.5-0.9”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 印刷中, 査読有, <https://doi.org/10.1093/pasj/psy027>

②Hitomi Collaboearion, Aharonian Felix, Akamatsu Hiroki, Akimoto Fumie, Allen Steven W., Angelini Lorella, Audard Marc, Awaki Hisamitsu, Axelsson Magnus, Ueda Shutaro, 他, “Atmospheric gas dynamics in the Perseus cluster observed with Hitomi”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 70, 1, 2018, 査読有, <https://doi.org/10.1093/pasj/psx138>

③Hitomi Collaboearion, Aharonian Felix, Akamatsu Hiroki, Akimoto Fumie, Allen Steven W., Angelini Lorella, Audard Marc, Awaki Hisamitsu, Axelsson Magnus, Ueda Shutaro, 他, “Search for thermal X-ray features from the Crab nebula with the Hitomi soft X-ray spectrometer”,

Publications of the Astronomical Society of Japan, 70, 1, 2018, 査読有, <https://doi.org/10.1093/pasj/psx072>

④Hitomi Collaboearion, Aharonian Felix, Akamatsu Hiroki, Akimoto Fumie, Allen Steven W., Angelini Lorella, Audard Marc, Awaki Hisamitsu, Axelsson Magnus, Ueda Shutaro, 他, “Hitomi X-ray studies of giant radio pulses from the Crab pulsar”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 70, 1, 2018, 査読有, <https://doi.org/10.1093/pasj/psx083>

⑤Hitomi Collaboearion, Aharonian Felix, Akamatsu Hiroki, Akimoto Fumie, Allen Steven W., Angelini Lorella, Audard Marc, Awaki Hisamitsu, Axelsson Magnus, Ueda Shutaro, 他, “Measurements of resonant scattering in the Perseus Cluster core with Hitomi SXS”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 70, 1, 2018, 査読有, <https://doi.org/10.1093/pasj/psx127>

⑥Hitomi Collaboearion, Aharonian Felix, Akamatsu Hiroki, Akimoto Fumie, Allen Steven W., Angelini Lorella, Audard Marc, Awaki Hisamitsu, Axelsson Magnus, Ueda Shutaro, 他, “Hitomi observation of radio galaxy NGC 1275: The first X-ray microcalorimeter spectroscopy of Fe-K $\alpha$  line emission from an active galactic nucleus”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 70, 1, 2018, 査読有, <https://doi.org/10.1093/pasj/psx147>

⑦Hitomi Collaboearion, Aharonian Felix, Akamatsu Hiroki, Akimoto Fumie, Allen Steven W., Angelini Lorella, Audard Marc, Awaki Hisamitsu, Axelsson Magnus, Ueda Shutaro, 他, “Glimpse of the highly obscured HMXB IGR J16318-4848 with Hitomi”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 70, 1, 2018, 査読有, <https://doi.org/10.1093/pasj/psx154>

⑧Hitomi Collaboearion, Aharonian Felix, Akamatsu Hiroki, Akimoto Fumie, Allen Steven W., Angelini Lorella, Audard Marc, Awaki Hisamitsu, Axelsson Magnus, Ueda Shutaro, 他, “Hitomi observations of the LMC SNR N132D: Highly redshifted X-ray emission from iron ejecta”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 70, 1, 2018, 査読有, <https://doi.org/10.1093/pasj/psx151>

⑨Hitomi Collaboearion, Aharonian Felix, Akamatsu Hiroki, Akimoto Fumie, Allen Steven W., Angelini Lorella, Audard Marc, Awaki Hisamitsu, Axelsson Magnus, Ueda Shutaro, 他, “Atomic data and spectral modeling constraints from high-resolution X-ray observations of the Perseus cluster with Hitomi”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 70, 1, 2018,

査読有, <https://doi.org/10.1093/pasj/psx156>

⑩Hitomi Collaboration, Aharonian Felix, Akamatsu Hiroki, Akimoto Fumie, Allen Steven W., Angelini Lorella, Audard Marc, Awaki Hisamitsu, Axelsson Magnus, Ueda Shutaro, 他, “Temperature structure in the Perseus cluster core observed with Hitomi”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 70, 1, 2018, 査読有, <https://doi.org/10.1093/pasj/psy004>

⑪Takahashi Tadayuki, Kokubun Motohide, Mitsuda Kazuhisa, Kelley Richard L., Ohashi Takaya, Aharonian Felix, Akamatsu Hiroki, Akimoto Fumie, Allen Steven W., Anabuki Naohisa, Angelini Lorella, Arnaud Keith, Asai Makoto, Audard Marc, Awaki Hisamitsu, Axelsson Magnus, Azzarello Philipp, Ueda Shutaro, 他, “Hitomi (ASTRO-H) X-ray Astronomy Satellite”, Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 4, 1, 2018, 査読有, doi:10.1117/1.JATIS.4.2.021402

⑫Tanaka Takaaki, Uchida Hiroyuki, Nakajima Hiroshi, Tsunemi Hiroshi, Hayashida Kiyoshi, Tsuru Takeshi Go, Dotani Tadayasu, Ueda Shutaro, 他, “Soft X-ray Imager aboard Hitomi (ASTRO-H)”, Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 4, 1, 2018, 査読有, <https://doi.org/10.1117/1.JATIS.4.1.011211>

⑬Nakajima Hiroshi, Maeda Yoshitomo, Uchida Hiroyuki, Tanaka Takaaki, Tsunemi Hiroshi, Hayashida Kiyoshi, Tsuru Takeshi G, Dotani Tadayasu, Nagino Ryo, Inoue Shota, Ozaki Masanobu, Tomida Hiroshi, Natsukari Chikara, Ueda Shutaro, Mori Koji, Yamauchi Makoto, Hatsukade Isamu, 他, “In-orbit performance of the soft X-ray imaging system aboard Hitomi (ASTRO-H)”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 70, 1, 2018, 査読有, <https://doi.org/10.1093/pasj/psx116>

⑭Hitomi Collaboration, Aharonian Felix, Akamatsu Hiroki, Akimoto Fumie, Allen Steven W., Angelini Lorella, Audard Marc, Awaki Hisamitsu, Axelsson Magnus, Ueda Shutaro, 他, “Solar abundance ratios of the iron-peak elements in the Perseus cluster”, Nature, 535, 1, 2017, 査読有, <https://doi.org/10.1038/nature24301>

⑮Hitomi Collaboration, Aharonian, F. A., Dotani, T., Ishisaki, Y., Tsunemi, H., Ueda, S. et al., “Hitomi Constraints on the 3.5 keV Line in the Perseus Galaxy Cluster”, The Astrophysical Journal Letters, 837, L15, 2017, 査読有, <http://dx.doi.org/10.3847/2041-8213/aa61fa>

⑯Ueda, S., Kitayama, T., & Dotani, T., “Embedded Spiral Patterns in the Cool Core of the Massive Cluster of Galaxies Abell 1835”, The Astrophysical Journal, 837, 34, 2017, 査読有, <http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/aa5c3e>

⑰Miyaoaka Keita, Okabe Nobuhiro, Kitaguchi Takao, Oguri Masamune, Fukazawa Yasushi, Mandelbaum Rachel, Medezinski Elinor, Babazaki Yasunori, Nishizawa Atsushi J, Hamana Takashi, Lin Yen-Ting, Akamatsu Hiroki, Chiu I-Non, Fujita Yutaka, Ichinohe Yuto, Komiyama Yutaka, Sasaki Toru, Takizawa Motokazu, Ueda Shutaro, 他, “Multiwavelength study of X-ray luminous clusters in the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program S16A field”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 70, 1, 2017, 査読有, <https://doi.org/10.1093/pasj/psx132>

⑱上田周太朗, 北山哲, 堂谷忠靖, “衝突の痕跡か? 銀河団のクールコア中に見つかった渦巻構造”, 天文月報, 第 110 巻, 8 月号, P.513, 2017, 査読無

⑲Hitomi Collaboration, Aharonian, F. A., Dotani, T., Ishisaki, Y., Tsunemi, H., Ueda, S. et al., “The quiescent intracluster medium in the core of the Perseus cluster”, Nature, 535, 117, 2016, 査読有, <http://dx.doi.org/10.1038/nature18627>

⑳Inoue, Shota; Hayashida, Kiyoshi; Ueda, Shutaro; Nagino, Ryo; Tsunemi, Hiroshi; Koyama, Katsuji, “Search for a non-equilibrium plasma in the merging galaxy cluster Abell 754”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 68, S23, 2016, 査読有, doi:10.1093/pasj/psw027

㉑Shota Inoue, Kiyoshi Hayashida, Shuhei Katada, Hiroshi Nakajima, Ryo Nagino, Naohisa Anabuki, Hiroshi Tsunemi, and Shutaro Ueda, et al., “Modeling the spectral response for the soft X-ray imager onboard the ASTRO-H satellite”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 831, 415, 2016, 査読有, doi:10.1016/j.nima.2016.03.071

㉒Takaaki Tanaka, Hiroshi Tsunemi, Kiyoshi Hayashida, Takeshi G Tsuru, Tadayasu Dotani, Hiroshi Nakajima, Naohisa Anabuki, Ryo Nagino, Hiroyuki Uchida, Masayoshi Nobukawa, Masanobu Ozaki, Chikara Natsukari, Hiroshi Tomida, Shutaro Ueda, et al., “The Soft X-ray Imager (SXI) for the ASTRO-H Mission”, Proceedings of SPIE, 9601, 96010E, 2016, 査読無, doi:10.1117/12.2190808

㉓Kitayama, T., Ueda, S., Takakuwa, S.,

Tsutsumi, T., Komatsu, E., Akahori, T., Iono, D., Izumi, T., Kawabe, R., Kohno, K., Matsuo, H., Ota, N., Suto, Y., Takizawa, M., Yoshikawa, K., “The Sunyaev-Zel'dovich effect at 5” : RX J1347.5-1145 imaged by ALMA”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 68, 88, 2016, 査読有, <http://dx.doi.org/10.1093/pasj/psw082>

〔学会発表〕(計 8件)

① Shutaro Ueda, “Coexistence of excess hot gas and a sloshing cool core in RXJ 1347.5-1145”, SnowCluster, 2018

② Shutaro Ueda, “ Atmospheric gas dynamics in the Perseus cluster observed with Hitomi”, 高エネルギー宇宙物理連絡会, 2018, 招待講演

③ Shutaro Ueda, “Embedded spiral patterns in the massive galaxy cluster Abell 1835”, The X-ray Universe 2017, 2017

④ 上田周太郎、北山哲、堂谷忠靖, “A1835 銀河団のクールコア中に埋もれていた渦巻構造の発見”, 日本天文学会, 2017

⑤ 上田周太郎, “ 「ひとみ」 によるペルセウス座銀河団の高温ガスの速度場の測定”, 日本天文学会, 2017

⑥ 上田周太郎、飯塚亮、一戸悠人、井上翔太、太田直美、北山哲、佐藤浩介、田中桂悟、田村隆幸、辻本匡弘、藤本龍一、前田良知、および「ひとみ」コラボレーション, “ 「ひとみ」 によるペルセウス座銀河団のガス速度測定: (2) 輝線の非ガウス性とイオン温度への制限”, 日本天文学会, 2017

⑦ 上田周太郎、田村隆幸、堂谷忠靖, “X線観測から探る銀河団中心銀河とその超巨大質量ブラックホールの進化”, 日本 SKA サイエンス会議「宇宙磁場」 2015, 招待講演

⑧ Shutaro Ueda, “Luminous Supermassive Black Holes in the Brightest Cluster Galaxies”, ISAS Astrophysics Colloquia, 2015, 招待講演,

〔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：  
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

上田 周太郎 (UEDA, Shutaro)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・宇宙航空プロジェクト研究員

研究者番号：40748258

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：

(4) 研究協力者

( )