

令和元年6月12日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03639

研究課題名(和文) 銀河団衝突の初期に解放される莫大な重力エネルギーの行方の観測

研究課題名(英文) Observing where the huge kinetic energy from merging clusters of galaxies goes

研究代表者

中澤 知洋 (Nakazawa, Kazuhiro)

名古屋大学・現象解析研究センター・准教授

研究者番号：50342621

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙最大の天体、銀河団が衝突・合体する時に解放される莫大なエネルギーが、高温ガスの加熱、乱流の励起、さらに粒子加速や磁場増幅にどのように使われるかを知るために2つの研究を行なった。衝突銀河団CIZA J1358.9-4750を複数のX線天文衛星と電波天文台で観測し、衝突の初期段階にあること、それにも関わらず複雑な構造を持つことを確認した。並行して超精密分光によるドップラー観測と、高感度硬X線観測による加熱の観測精度向上を目指し、ASPTO-H衛星での観測を目指した。観測はできなかったものの、軌道上でASTRO-Hの硬X線観が世界最高感度にあることを実証し、将来検出器への指針を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙最大の天体が合体する「銀河団衝突」の中では、莫大なエネルギーが解放され、加熱、乱流、粒子加速などが起きる。しかし、そのエネルギーがどこへ行くかは解明されていない。既存のX線衛星、電波観測で研究を続けつつ、最新のX線衛星ASTRO-Hで、運動エネルギーや加熱をかつてない精度で観測することを目指した。2016年2月に打ち上げられ、担当していた硬X線検出器も世界最高の感度を達成したが、衛星喪失による本格観測には至らなかった。しかし、これまで難しいとされてきた硬X線での高感度観測のレシビを確立し実証できたことで、将来計画をより高性能にできる。

研究成果の概要(英文)：Kinetic energy released in merging cluster of galaxies initiates, hot gas heating, turbulence, particle acceleration, and magnetic field amplification. To understand how the initial energy is converted into those non-thermal energies, we performed two research works. Firstly, we observed the early-phase merging cluster CIZA J1358.9-4750 with three X-ray observatories and GHz radio, and confirmed it is really in its early phase. Secondly, we aimed at observing such merging clusters with ASTRO-H satellite, capable of fine doppler imaging and high-temperature hottest gas detection. In this work, we performed optimization of detector operation and analysis parameters of the Hard X-ray Imager (HXI). After the launch in 2016/2, we verified the world's best sensitivity of the HXI in orbit. Right before actual observations start, the satellite was lost. Based on these achievements, we obtained a set of technical lessons to be used for future high-sensitivity hard X-ray survey.

研究分野：宇宙X線天文学

キーワード：銀河団 衝突銀河団 X線 GHz 電波 硬X線検出器 非熱的エネルギー

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

銀河団は宇宙最大の自己重力系で、そのバリオンの大半を X 線を放射する高温ガスが占める。銀河団同士が衝突すると莫大な重力エネルギーが解放され、ガスの加熱、乱流や粒子加速、磁場増幅に費やされるが、どの形態にどの割合で解放されるか、その定量的な評価は難しい。こうした「非熱的」なエネルギーへの流れの割合の総和は、衝突初期には 20%以上になる領域も存在しており、銀河団全体でも 20%レベルに達する可能性がある。これらの測定が難しい理由は、第 1 に既知の衝突銀河団は形状が複雑で元々の衝突形態が推定しにくいために入力された重力エネルギーが分かりにくいこと、第 2 にはこれまでの X 線観測ではガスの運動の追尾でも過熱や非熱的な放射の探査でも感度が不足していたためである。

2. 研究の目的

我々は、衝突銀河団において解放されるエネルギーの分岐を定量化することを研究の大目的とした。我々が最近発見した近傍の初期衝突銀河団 CIZA J1358.9-4750 (以後 CIZA J1359) は、形状がシンプルで明るい衝撃波面を持ち、しかもそれをほぼ真横から見ていると考えられ、第 1 の課題を解決できる可能性を秘めている。さらに 2015 年打ち上げ予定であった ASTRO-H 衛星は、硬 X 線の高感度撮像分光で加熱されたガスの分布を知り、軟 X 線精密分光でガスの運動を高温ガスの音速の数十分の一までの精度で直接観測できる画期的な能力を持っており、第 2 の課題を解決する突破口であった。この衛星で高感度観測を実現するためのデータ処理の方法を確立し、打ち上げ後を迎えたのちには、実際に CIZA J1359 銀河団やその他の代表的な衝突銀河団を観測し、電波、可視光の観測を組み合わせ、他の銀河団と比較することで、銀河団衝突のエネルギーの流れを観測的に明らかにすることを目指した。

3. 研究の方法

(1) 衝突銀河団の観測研究

「すざく」衛星での CIZA J1359 の最初に観測[論文 7]に引き続き、3 つの追加観測データを解析した。暗く広がった放射に高い感度を持つ「すざく」で CIZA J1359 の周辺部を広く見る追加観測、角分解能が圧倒的に優れるアメリカのチャンドラ衛星の観測、および大有効面積と角分解能のバランスの良い欧州の XMM ニュートン衛星の観測である(いずれも PI Kato)。また豪州の ACTA 電波干渉計の 1.6 GHz 帯の観測データ(PI Akahori)も使用した。同時に、その他の衝突銀河団の観測研究も推進した。

(2) ASTRO-H 衛星の開発

硬 X 線の広がった放射に対する感度は、望遠鏡の有効面積に加えて検出器のバックグラウンドの低さと安定性がかぎを握る。ASTRO-H 衛星搭載の硬 X 線撮像検出器 Hard X-ray Imager (HXI) は、低バックグラウンドを特徴とし、銀河団高温ガスの加熱の検出に大きな威力を発揮すると期待される。HXI の開発は JAXA 予算で進められ、本研究では、銀河団などの広がった放射の高感度観測を実現するための検出器運用パラメータや解析手法の最適化の検証を実施した。

(3) ASTRO-H による衝突銀河団の観測研究

予算申請時の予定より 1 年遅れで、ASTRO-H は 2016 年 2 月に打ち上げられた。これは計画時から想定していた範囲内である。3 月に HXI の立ち上げ運用を行い、基本的な動作性能を検証した。4 月以降にはついに本格的に銀河団観測に移行する予定であったが、その直前で、姿勢系異常により衛星は失われてしまった。

4. 研究成果

(1) 衝突銀河団の観測研究

「すざく」による周辺部観測で、2 つの銀河団の衝突していない側には衝撃波は見られず、まだ衝突の初期段階であることが確認された。また、衝突している領域から垂直に吹き出す高温ガスを発見した。これは、シミュレーションで時折みられる現象と一致していると考えられる(Kato et al. in prep)。また、電波観測でも上記の衝撃波がないこと、中心部で発生している若い衝撃波では、まだ GeV 電子の加速が進んでいないことを確認した [論文 1]。チャンドラおよび XMM-Newton のデータでは、例えば東方には衝撃波が伸びているが、西方には伸びていないなど、想定よりも複雑な構造であることが明らかとなった(Kato et al. in prep)。これは北方の銀河団が数十億年前にもう一つの衝突を経験している可能性を示す。

表面輝度が非常に暗い Abell 548W 銀河団を「すざく」で観測し、CIZA J1359 と対照的に、ほぼ視野に垂直に衝突している衝突銀河団である可能性が高いことを示した[論文 6]。また銀河面上の銀河団探索や、他の衝突銀河団の観測も進めた [論文 4-5]。

(2) ASTRO-H 衛星の開発と軌道上性能、およびその後の開発研究

地上での最終地上試験などで検出器の動作パラメータおよび地上解析ソフトの最適化を進めつつ、2016 年 2 月の打ち上げを迎えた。衛星本体の立ち上がりおよび他の検出器の立ち上げを待って、3 月上旬に HXI の立ち上げを行なった。初期データを観測したところ、軌道上の一部で想定よりバックグラウンドが高いものの、それ以外ではバックグラウンドが想定通りに低い

ことを確認した。データ解析を生かして上記のバックグラウンドの除去方法を確立し、検出器の解析パラメータをさらに最適化することで、広がった硬X線放射に対しては、ライバル衛星の米国 NuSTAR を 3-5 倍上回る世界最高感度を実現したことを確認した[論文 2-3, 学会 5,7,16,18,19, 21]。

3 月末に衛星が失われた後は、上記の性能評価と、バックグラウンドの起源の探査を続けた。これにより軌道上中性子の影響を綺麗に分離できた(鈴木寛大 修士論文 東京大学 2018)。また次世代の硬X線観測を目指す FORCE 衛星の計画を推進し[学会 1-3,12]、シールド検出器の新しい読み出し方法の研究などを進めた[学会 20]。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 7 件)

- [1] "ATCA 16 cm observation of CIZA J1358.9-4750: Implication of merger stage and constraint on non-thermal properties", Akahori, Takuya; Kato, Yuichi; Nakazawa, Kazuhiro; Ozawa, Takeaki; Gu, Liyi; Takizawa, Motokazu; Fujita, Yutaka; Nakanishi, Hiroyuki; Okabe, Nobuhiro; Makishima, Kazuo, PASJ 70, Issue 3, id.53 (2018) 査読あり
- [2] "Hard x-ray imager onboard Hitomi (ASTRO-H)", Nakazawa, Kazuhiro; Sato, Goro; Kokubun, Motohide; et al. JATIS 4, id. 021410 (2018). 査読あり
- [3] "In-orbit performance and calibration of the Hard X-ray Imager onboard Hitomi (ASTRO-H)", Hagino, Kouichi; Nakazawa, Kazuhiro; Sato, Goro; Kokubun, Motohide; et al. JATIS 4, id. 021409 (2018). 査読あり
- [4] "Suzaku and Chandra observations of the galaxy cluster RXC J1053.7+5453 with a radio relic", Itahana, Madoka; Takizawa, Motokazu; Akamatsu, Hiroki; van Weeren, Reinout J.; Kawahara, Hajime; Fukazawa, Yasushi; Kaastra, Jelle S.; Nakazawa, Kazuhiro; Ohashi, Takaya; Ota, Naomi; Röttgering, Huub J. A.; Vink, Jacco; Zandanel, Fabio, PASJ 69, Issue 6, id.88 (2017) 査読あり
- [5] "Suzaku and Chandra observations of CIZA J1700.8-3144, a cluster of galaxies in the Zone of Avoidance", Mori, Hideyuki; Maeda, Yoshitomo; Ueda, Yoshihiro; Nakazawa, Kazuhiro; Tawara, Yuzuru, PASJ 69, Issue 1, id.3 8 pp (2017) 査読あり
- [6] "Suzaku observation of a high-entropy cluster Abell 548W", Nakazawa, Kazuhiro; Kato, Yuichi; Gu, Liyi; Kawaharada, Madoka; Takizawa, Motokazu; Fujita, Yutaka; Makishima, Kazuo, PASJ 68, Issue SP1, id.S21 12 pp. (2016) 査読あり
- [7] "Discovery of a nearby early-phase major cluster merger CIZA J1358.9-4750", Kato, Yuichi; Nakazawa, Kazuhiro; Gu, Liyi; Akahori, Takuya; Takizawa, Motokazu; Fujita, Yutaka; Makishima, Kazuo, PASJ 67, Issue 4, id.718 pp. (2015) 査読あり

[学会発表](計 22 件)

[国際学会]

- [1] ``The FORCE mission Science aims and instrument parameters for broadband x-ray imaging spectroscopy with good angular resolution'', SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation, June 10-15, 2018, in Austin, Texas
- [2] ``Prospects of X-ray Astronomy'', The 4th KMI International Symposium, February 18 -- 20, 2019, in Nagoya University, Japan, 招待講演
- [3] ``Recovery of high-resolution X-ray spectroscopy with XARM and future mission candidate FORCE for hard X-ray/wide-band imaging spectroscopy'', ``The extreme Universe viewed in very-high-energy gamma rays 2017'', December 18 -- 19, 2017, in Kashiwa, Japan, 招待講演
- [4] Y. Kato, ``CIZA J1358.9-4750: an early-phase merger clusters of galaxies exhibiting a twin shocks'', ``the workshop on the early-phase merging clusters'', February 8 2017, SRON, Netherlands
- [5] K. Nakazawa, ``In orbit performance of Hitomi X-ray observatory and beyond'', ``INTEGRAL work shop 2016'', 10--14 October, 2016, Amsterdam, Netherland
- [6] K. Nakazawa, ``Filling the gap between MeV and GeV -- eASTROGAM and CAST --'', ``The extreme Universe viewed in very-high-energy gamma rays 2016'', December 15--16, 2016, in Kashiwa, Japan
- [7] Kazuhiro N., et al. ``The Hard X-ray Imager onboard Hitomi (ASTRO-H)'', ``7 years of MAXI: Monitoring X-ray Transients, 5-7 December 2016, Wako, Japan'', 5-7 December 2016, Wako, Japan (poster)
- [8] Kato, Y., ``X-ray observation of shocks within the plasma in clusters of galaxies'', ``6th East-Asia School and Workshop on Laboratory, Space, Astrophysical Plasma'', 11-16 July 2016, Tsukuba, Japan

[9] Y. Kato, K. Nakazawa, L. Gu, T. Akahori, M. Takizawa, Y. Fujita, A. Simionescu, and K. Makishima, ``Observation of a nearby early merging cluster of galaxies, CIZA J1358.9-4750: new born shocks in the ICM'', 15th HEAD meeting of the American Astrophysics Society, 3--7 April 2016, Naples, Florida, USA

[国内学会]

- [10] 小高裕和 et al. 「衛星軌道上放射化バックグラウンドシミュレータの開発と「ひとみ」衛星搭載硬 X 線撮像検出器のデータの再現性」, 日本物理学春季年会 (2018)
- [11] 加藤佑一 et al. 「銀河団衝突で発生した若い衝撃波の観測研究」, T09a, 日本天文学会・2017 秋季年会
- [12] 中澤知洋 et al. 「1-80 keV の広帯域 X 線を高感度で撮像分光する次世代の小型科学衛星計画 FORCE: 2017 年のステータス」, 20aK21-5, 日本物理学春季年会 (2017)
- [13] 赤堀卓也 et al. 「衝突銀河団 CIZA J1358.9-4750 領域の広がった電波放射の探査」, T21b, 日本天文学会・2017 春季年会
- [14] 加藤佑一 et al. 「超新星残骸 SN1006 における衝撃波直下での電子加熱と電離速度」, Z104a, 日本天文学会・2017 春季年会
- [15] 加藤佑一, 「超新星残骸プラズマにおける衝撃波直下での電子加熱」, 高エネルギー宇宙物理学研究会 2016 「(2016 年 11 月 30-12 月 2 日, 青山大学相模原キャンパス)
- [16] 中澤知洋, 「X 線衛星「ひとみ(ASTRO-H)」搭載の硬 X 線撮像検出器(HXI)の軌道上動作」, 日本物理学秋季年会 (2016)
- [17] 加藤佑一, 「衝突銀河団 CIZA J1358.9-4750 における低マッハ数衝撃波によるプラズマ加熱」, 日本物理学秋季年会 (2016)
- [18] 中澤知洋: 招待講演: 「The Hard X-ray Imager onboard ASTRO-H」, 第 13 回 X 線結像光学シンポジウム (2015 年 11 月 17-18 日, 名古屋大学)
- [19] 中澤知洋 et al. 「ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線撮像検出器(HXI)の現状～打ち上げ～」, V345a 日本天文学会・2016 春季年会
- [20] 古田祿大 et al. 「次世代 X 線衛星での応用を目指した 1--80keV の広帯域におけるアクティブシールドの最適化」, V328a 日本天文学会・2016 春季年会
- [21] 中澤知洋 et al. 「ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線撮像検出器(HXI)の現状打上げに向けて」, V330a 日本天文学会・2015 秋季年会
- [22] 加藤佑一 et al. 「衝突銀河団 CIZA J1358.9-4750 の衝撃波付近における鉄原子の電離状態」, T06a 日本天文学会・2015 秋季年会

[図書](計 1 件)

- ・「銀河団同士の衝突による 巨大衝撃波の誕生を捉えた」加藤祐一, 中澤知洋, 天文月報, 109, (12), pp.843--850, 2016

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名: 赤堀 卓也

ローマ字氏名: AKAHORI TAKUYA

所属研究機関名: 国立天文台

部局名: 水沢 VLBI 観測所

職名: 特任研究員

研究者番号(8桁): 70455913

(2)研究協力者

研究協力者氏名: 滝沢 元和

ローマ字氏名：TAKIZAWA MOTOKAZU

研究協力者氏名：加藤 祐一

ローマ字氏名：KATO YUICHI

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。