

令和元年6月17日現在

機関番号：32661

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2018

課題番号：25400236

研究課題名(和文)多波長で探る宇宙プラズマとダークマターの共進化

研究課題名(英文) Probing coevolution of cosmic plasma and dark matter with multi-wavelength data

研究代表者

北山 哲 (KITAYAMA, Tetsu)

東邦大学・理学部・教授

研究者番号：00339201

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計ALMA、X線天文衛星ひとみ(ASTRO-H)などによる精密観測データ、および宇宙論的大規模数値シミュレーションに基づいて、宇宙最大の天体である銀河団中のプラズマとダークマターの関連を探究した。主な成果として、電波領域において最も高解像度の高温プラズマ観測に成功したこと、それに基づいてプラズマやダークマターの基本的性質に対する定量的情報を得たこと、銀河団中心部におけるプラズマの運動速度が従来の予想よりもはるかに小さいことを示したこと、などが挙げられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、国際協力のもとで日本が大きな役割を果たして開発された最新鋭の観測装置の能力を、最大限に引き出すことが可能となった。特にALMAに関しては、従来困難視されていた広がった信号の測定がどこまで可能であるかが、本研究によって定量的に明らかになった。また、X線天文衛星ひとみ(ASTRO-H)については、2016年4月の運用停止による科学的な損失を大幅に補填し、次期衛星計画に対して有益な情報を提供することができた。

研究成果の概要(英文)：We have explored the link between hot plasma and dark matter in galaxy clusters, based on high-precision observational data taken, e.g., by Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) and Hitomi (ASTRO-H) X-ray astronomy satellite, as well as state-of-the-art cosmological simulations. The main achievements are that we have accomplished the highest spatial-resolution radio observation of hot plasma, obtained quantitative constraints on the fundamental properties of plasma and dark matter, and shown that the velocity of hot plasma near the center of galaxy clusters is much lower than previously expected.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：宇宙論 銀河団 ダークマター プラズマ 電波 X線

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

1. 研究開始当初の背景

本研究を開始した当初、宇宙全体の時間発展に関しての大枠は明らかになってきたものの、星や銀河、銀河団といった多様な天体階層がいかにか形成されてきたか、それらが宇宙全体の進化とどのように結びついているか、などには依然として未解決の課題が多く残されていた。また、宇宙の物質の大半を担うダークマターの有力候補と考えられていた粒子が、地上の加速器実験では検出されず、天文学的手法によってその性質を探る重要性が高まっていた。さらに、電波におけるアタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計 ALMA、X 線におけるひとみ (ASTRO-H) 衛星など、国際協力のもとで日本が大きな役割を果たして開発された観測装置が完成を間近に控えていた時期であった。

2. 研究の目的

宇宙の階層構造の形成を宇宙全体の進化と合わせて明らかにするためには、宇宙に存在するバリオンの大半を占めると考えられるプラズマ状態のガスと、重力の大半を担うダークマターの相互関係を理解することが不可欠である。本研究では、宇宙の大規模構造の主要な構成要素である銀河団を対象とし、プラズマの加熱過程や運動とダークマター分布との関係を明らかにすることと、未知のダークマターの性質に対する定量的情報を引き出すことを目的とした。

3. 研究の方法

上記目的の達成のために、ALMA、X 線天文衛星ひとみ (ASTRO-H) といった多波長における最新鋭の観測装置の連携を推進し、波長帯の枠、および理論と観測の枠を超えた研究を実施した。

電波領域では、銀河団プラズマが宇宙マイクロ波背景放射光子を散乱することにより生じるスニヤエフ ゼルドビッチ効果 (以下、SZ 効果と略す) に主眼を置いた。ALMA をはじめとする電波干渉計による SZ 効果観測では、周波数帯や望遠鏡配列を適切に選ぶことが極めて重要で、そのためには詳細なシミュレーションが不可欠となる。特に ALMA は、口径の異なる望遠鏡や単一鏡を組み合わせるため、感度評価は複雑であり、観測対象の広がりや構造にも大きく左右される。このような状況を予見し、研究代表者は ALMA の仕様や諸々の雑音成分を取り入れたシミュレーションコードを完成させ、それを最大限に活用しながら、ターゲット選定を含めた綿密な観測戦略の検討を進めた。

X 線領域では、ひとみ (ASTRO-H) 衛星計画のサイエンスワーキンググループのリーダーとして、2016 年の打ち上げ以降の観測計画の立案とともに、実際に取得された観測データの解析を主導した。本研究開始時に既に稼働していた X 線天文衛星すざく、チャンドラなどによるデータも合わせて活用した。

また、宇宙の構造形成理論を観測データと結びつけるため、宇宙論的大規模数値シミュレーションも利用した。

4. 研究成果

(1) ALMA を用いて、世界で初めて 5 秒角の空間分解能で SZ 効果を検出することに成功した。また、この観測データを、X 線天文衛星チャンドラおよびハッブル宇宙望遠鏡のデータと組み合わせ、遠方銀河団 RX J1347.5-1145 中の高温ガスの状態方程式、およびガスとダークマター分布との関係を明らかにした。その結果、この銀河団の中心付近では高温ガスが音速よりも十分に遅い速さでゆっくりとかき回されて圧力平衡がほぼ保たれた状態にある一方で、銀河団南東部では高速の衝撃波によりガスが加熱され、ガスはダークマターの塊からはぎとられた状態にあることがわかった。さらに、ダークマターの自己相互作用断面積への制限を得ることに成功した。これらの結果は、SZ 効果の観測としてはこれまでで最も高い解像度を達成し、銀河団プラズマの空間分布や温度を測定する新たな手法を確立した、という意義をもち、ALMA、ヨーロッパ南天天文台 (ESO)、ドイツ・マックスプランク研究所、台湾中央研究院など多数の研究機関のホームページでニュースとして紹介された。

(2) 2016 年 4 月に運用を停止した X 線天文衛星ひとみ (ASTRO-H) が事故前に取得していた希少な観測データから可能な限りの科学的情報を引き出すための系統的な解析と考察を行った。主な成果としては、1) 銀河団プラズマの運動速度の高精度測定に初めて成功し、ペルセウス銀河団中心部における運動速度が従来の予想よりも小さいことを明らかにしたこと、2) 同領域において、ヘリウム型鉄イオンによる輝線が共鳴散乱を受けていることを直接示したこと、3) 同領域における重元素組成比が、太陽近傍と整合することを初めて明らかにしたこと、4) 同領域のガスに対して、衝突電離平衡からの有意なずれは認められないことを示したこと、5) ペルセウス座銀河団中心に存在する活動銀河核において、蛍光鉄輝線の放射が、ブラックホールから約 5000 光年以内の領域から生じていることを示したこと、6) これらの成果に対する検出器由来の系統誤差、および既存のプラズマモデルに起因する不定性などを系統的に明らかにしたこと、などが挙げられる。これらは、マイクロカ

ロリメータを用いた高分解能 X 線分光観測が、銀河団や活動銀河核の強力な研究手段となることを実証したものである。

- (3) ALMA による観測データを用いて、計 4 つの重力レンズ銀河団方向における輝線放射天体探査を行い、赤方偏移 0.3, 0.7, 1.2, 6 における CO(3-2), CO(4-3), CO(5-4), [CII] 放射天体の光度関数にそれぞれ制限を導いた。
- (4) X 線天文衛星すざくによって取得された衝突銀河団 Abell 2163 のスペクトルデータを解析し、有意な硬 X 線放射を検出することに成功した。その結果、この銀河団に 2 億度を超える極めて高温の熱的ガスが付随することが裏付けられた一方で、従来予想されていた非熱的ガスの量は少ないことが示唆され、銀河団内の平均磁場強度に対する厳しい下限が得られた。
- (5) X 線天文衛星チャンドラによるデータから、Abell 1835 銀河団中に渦巻状のガス内部構造が存在することを発見した。この発見は、見かけ上安定している銀河団においても、銀河団衝突が起こっており、銀河団の内部構造に無視できない影響を与えていることを示唆している。
- (6) SZ 効果と X 線観測データの組み合わせによる角径距離の測定と、Ia 型超新星爆発による光度距離の測定を組み合わせると、宇宙モデルのユニークな検証が可能になることに着目し、現状のデータが標準的な宇宙モデルと誤差の範囲内で整合していることを示した。また、宇宙マイクロ波背景放射の角度パワースペクトルには、現状では個別に観測できない遠方銀河団による同効果の信号が総和として寄与している可能性が高いことに着目し、最新の銀河団モデルに基づいた定量的予言を行った。
- (7) X 線データを用いた銀河団の質量測定に関し、宇宙論的大規模数値シミュレーションを用いた研究を行った結果、従来は基礎方程式において無視されていたガス加速度項が 20 - 30 % 程度のバイアスを引き起こす可能性があることを見出した。
- (8) 宇宙の構造形成過程を解析的に記述するための最も基本的な理論的枠組みとして広く用いられている球対称崩壊モデルの妥当性およびその物理的根拠を、宇宙論的大規模重力多体系シミュレーションと比較することによって定量的に調べた。その結果、重力多体系が宇宙膨張から分離して収縮を開始する時期を球対称崩壊モデルは系統的に早く見積もっていること、その主な原因は重力多体系内部の密度分布および速度分散の効果が球対称崩壊モデルでは無視されていることにあると考えられること、これらの効果は重力多体系が一定の緩和状態に達した段階での物理量に対しては互いに相殺し、結果的に大規模重力多体系シミュレーションの結果と良い一致が認められること、などが明らかになった。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 27 件)

A. Simionescu, S. Nakashima, H. Yamaguchi, K. Matsushita, F. Mernier, N. Werner, T. Tamura, K. Nomoto, J. de Plaa, S. -C. Leung, A. Bamba, E. Bulbul, M. E. Eckart, Y. Ezoe, A. C. Fabian, Y. Fukazawa, L. Gu, Y. Ichinohe, M. N. Ishigaki, J. S. Kaastra, C. Kilbourne, T. Kitayama, M. Leutenegger, M. Loewenstein, Y. Maeda, E. D. Miller, R. F. Mushotzky, H. Noda, C. Pinto, F. S. Porter, S. Safi-Harb, K. Sato, T. Takahashi, S. Ueda, S. Zha: “ Constraints on the chemical enrichment history of the Perseus Cluster of galaxies from high-resolution X-ray spectroscopy ”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (2019) 483, pp.1701-1721, 査読有, 10.1093/mnras/sty3220

Hitomi Collaboration: “ Detection of polarized gamma-ray emission from the Crab nebula with the Hitomi Soft Gamma-ray Detector ”, Publications of the Astronomical Society of Japan (2018) 70, 113, 査読有, 10.1093/pasj/psy118

Shutaro Ueda, Tetsu Kitayama, Masamune Oguri, Eiichiro Komatsu, Takuya Akahori, Daisuke Iono, Takuma Izumi, Ryohei Kawabe, Kotaro Kohno, Hiroshi Matsuo, Naomi Ota, Yasushi Suto, Shigehisa Takakuwa, Motozaku Takizawa, Takahiro Tsutsumi, Kohji Yoshikawa: “ A Cool Core Disturbed: Observational Evidence for the Coexistence of Subsonic Sloshing Gas and Stripped Shock-heated Gas around the Core of RX J1347.51145 ”, The Astrophysical Journal (2018) 866, 48, 査読有, 10.3847/1538-4357/aadd9d

Taizo Okabe, Takahiro Nishimichi, Masamune Oguri, Sebastien Peirani, Tetsu Kitayama, Shin Sasaki, Yasushi Suto: “ Projected alignment of non-sphericities of stellar,

- gas, and dark matter distributions in galaxy clusters: analysis of the Horizon-AGN simulation”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (2018) 478, pp.1141-1160, 査読有, 10.1093/mnras/sty1068
- Tadayuki Takahashi, Motohide Kokubun, Kazuhisa Mitsuda, Tetsu Kitayama (104 番目), et al.: “Hitomi (ASTRO-H) X-ray Astronomy Satellite”, Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems (2018) 4, 021402, 査読有, 10.1117/1.JATIS.4.2.021402
- Hitomi Collaboration: “Hitomi X-ray observation of the pulsar wind nebula G21.5-0.9”, Publications of the Astronomical Society of Japan (2018) 70, 38, 査読有, 10.1093/pasj/psy027
- Hitomi Collaboration: “Atmospheric gas dynamics in the Perseus cluster observed with Hitomi”, Publications of the Astronomical Society of Japan (2018) 70, 9, 査読有, 10.1093/pasj/psx138
- Hitomi Collaboration: “Measurements of resonant scattering in the Perseus Cluster core with Hitomi SXS”, Publications of the Astronomical Society of Japan (2018) 70, 10, 査読有, 10.1093/pasj/psx127
- Hitomi Collaboration: “Temperature structure in the Perseus cluster core observed with Hitomi”, Publications of the Astronomical Society of Japan (2018) 70, 11, 査読有, 10.1093/pasj/psy004
- Hitomi Collaboration: “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 (2018) 70, 12, 査読有, 10.1093/pasj/psx156
- Hitomi Collaboration: “Hitomi observation of radio galaxy NGC 1275: The first X-ray microcalorimeter spectroscopy of Fe-K line emission from an active galactic nucleus”, Publications of the Astronomical Society of Japan (2018) 70, 13, 査読有, 10.1093/pasj/psx147
- Hitomi Collaboration: “Search for thermal X-ray features from the Crab nebula with the Hitomi soft X-ray spectrometer”, Publications of the Astronomical Society of Japan (2018) 70, 14, 査読有, 10.1093/pasj/psx072
- Hitomi Collaboration: “Hitomi X-ray studies of giant radio pulses from the Crab pulsar”, Publications of the Astronomical Society of Japan (2018) 70, 15, 査読有, 10.1093/pasj/psx083
- Hitomi Collaboration: “Hitomi observations of the LMC SNR N 132 D: Highly redshifted X-ray emission from iron ejecta”, Publications of the Astronomical Society of Japan (2018) 70, 16, 査読有, 10.1093/pasj/psx151
- Hitomi Collaboration: “Glimpse of the highly obscured HMXB IGR J16318-4848 with Hitomi”, Publications of the Astronomical Society of Japan (2018) 70, 17, 査読有, 10.1093/pasj/psx154
- Hitomi Collaboration: “Solar abundance ratios of the iron-peak elements in the Perseus cluster”, Nature (2017) 551, pp.478-480, 査読有, 10.1038/nature24301
- Yuki Yamaguchi, Kotaro Kohno, Yoichi Tamura, Masamune Oguri, Hajime Ezawa, Natsuki H. Hayatsu, Tetsu Kitayama, Yuichi Matsuda, Hiroshi Matsuo, Tai Oshima, Naomi Ota, Takuma Izumi, Hideki Umehata: “Blind Millimeter Line Emitter Search using ALMA Data Toward Gravitational Lensing Clusters”, The Astrophysical Journal (2017) 845, 108, 査読有, 10.3847/1538-4357/aa80e0
- Hitomi Collaboration: “Hitomi Constraints on the 3.5 keV Line in the Perseus Galaxy Cluster”, The Astrophysical Journal Letters (2017) 837, L15, 査読有, 10.3847/2041-8213/aa61fa
- Shutaro Ueda, Tetsu Kitayama, Tadayasu Dotani: “Embedded Spiral Patterns in the Cool Core of the Massive Cluster of Galaxies Abell 1835”, The Astrophysical Journal (2017) 837, 34, 査読有, 10.3847/1538-4357/aa5c3e
- Daichi Suto, Sebastien Peirani, Yohan Dubois, Tetsu Kitayama, Takahiro Nishimichi, Shin Sasaki, Yasushi Suto: “Projected axis ratios of galaxy clusters in the Horizon-AGN simulation: Impact of baryon physics and comparison with observations”, Publications of the Astronomical Society of Japan (2016) 69, 14, 査読有, 10.1093/pasj/psw118
- ②① Daichi Suto, Tetsu Kitayama, Takahiro Nishimichi, Shin Sasaki, Yasushi Suto: “Evolution and statistics of non-sphericity of dark matter halos from cosmological N-body simulation”, Publications of the Astronomical Society of Japan (2016) 68, 97, 査読有, 10.1093/pasj/psw088
- ②② Tetsu Kitayama, Shutaro Ueda, Shigehisa Takakuwa, Takahiro Tsutsumi, Eiichi Komatsu, Takuya Akahori, Daisuke Iono, Takuma Izumi, Ryohei Kawabe, Kotaro Kohno, Hiroshi

- Matsuo, Naomi Ota, Yasushi Suto, Motozaku Takizawa, Kohji Yoshikawa: “The Sunyaev-Zel'dovich effect at 5 : RX J1347.5-1145 imaged by ALMA”, Publications of the Astronomical Society of Japan (2016) 68, 88, 査読有, 10.1093/pasj/psw082
- ②③ Hitomi Collaboration: “The quiescent intracluster medium in the core of the Perseus cluster”, Nature (2016) 535, pp.117-121, 査読有, 10.1038/nature18627
- ②④ Daichi Suto, Tetsu Kitayama, Ken Osato, Shin Sasaki, Yasushi Suto: “Confrontation of top-hat spherical collapse against dark halos from cosmological N-body simulations”, Publications of the Astronomical Society of Japan (2016) 68, 14, 査読有, 10.1093/pasj/psv122
- ②⑤ Tetsu Kitayama: “Cosmological and astrophysical implications of the Sunyaev-Zel'dovich effect”, Progress of Theoretical and Experimental Physics (2014) 2014, 06B111, 査読有, 10.1093/ptep/ptu055
- ②⑥ N. Ota, K. Nagayoshi, G. W. Pratt, T. Kitayama, T. Oshima, T. H. Reiprich: “Investigating the hard X-ray emission from the hottest Abell cluster A2163 with Suzaku”, Astronomy & Astrophysics (2014) 562, A60, 査読有, 10.1051/0004-6361/201322878
- ②⑦ Daichi Suto, Hajime Kawahara, Tetsu Kitayama, Shin Sasaki, Yasushi Suto, Renyue Cen: “Validity of Hydrostatic Equilibrium in Galaxy Clusters from Cosmological Hydrodynamical Simulations”, The Astrophysical Journal (2013) 767, 79, 査読有, 10.1088/0004-637X/767/1/79

〔学会発表〕(計 14 件)

李建鋒, 河野孝太郎, 廿日出文洋, 山口裕貴, 山下祐依, 早津夏己, 大栗真宗, 梅畑豪紀, 北山哲, 上田周太郎, 田村陽一, 松田有一, 赤堀卓也: “ALMA 3mm 帯データを用いた無バリエーションのミリ波輝線銀河探索”, 日本天文学会 (千葉大学, 2018 年 3 月)

岡部泰三, 大栗真宗, 須藤靖, 西道啓博, 北山哲, 佐々木伸, Sebastien Peirani: “銀河団と中心銀河の楕円率と主軸の向きとの相関”, 日本天文学会 (千葉大学, 2018 年 3 月)

石崎滉也, 赤堀卓也, 北山哲, 吉川耕司, SZ-ALMA チーム: “銀河団 RXJ1347-1145 の数値シミュレーション I”, 日本天文学会 (千葉大学, 2018 年 3 月)

上田周太郎, 一戸悠人, 藤本龍一, 井上翔太, Caroline Kilbourne, 北山哲, Maxim Markevitch, Brian McNamara, 太田直美, Scott Porter, 田村隆幸, 田中桂悟, Norbert Werner: “「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 (北海道大学, 2017 年 9 月)

岡部泰三, 大栗真宗, 須藤靖, 西道啓博, 北山哲, 佐々木伸, Sebastien Peirani: “銀河団のダークマターとバリオン分布の楕円率と主軸の向きとの相関”, 日本天文学会 (北海道大学, 2017 年 9 月)

李建鋒, 河野孝太郎, 廿日出文洋, 山口裕貴, 山下祐依, 早津夏己, 大栗真宗, 梅畑豪紀, 北山哲, 上田周太郎, 田村陽一, 松田有一: “Phoenix 銀河団における ALMA 3mm 帯データを使ったミリ波輝線銀河探索”, 日本天文学会 (北海道大学, 2017 年 9 月)

一戸悠人, 飯塚亮, 井上翔太, 上田周太郎, 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: (1) 速度構造”, 日本天文学会 (九州大学, 2017 年 3 月)

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 (九州大学, 2017 年 3 月)

山口裕貴, 河野孝太郎, 田村陽一, 大栗真宗, 泉拓磨, 北山哲, 江澤元, 大島泰, 松尾宏, 太田直美: “重力レンズ銀河団の ALMA データを用いた CO 光度関数の制限”, 日本天文学会 (九州大学, 2017 年 3 月)

北山哲, 上田周太郎, 高桑繁久, 堤貴弘, 小松英一郎, 赤堀卓也, 伊王野大介, 泉拓磨, 川邊良平, 河野孝太郎, 松尾宏, 大栗真宗, 太田直美, 須藤靖, 滝沢元和, 吉川耕司: “ALMA によるスニヤエフ・ゼルドビッチ効果の初観測”, 日本天文学会 (九州大学, 2017 年 3 月)

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 (九州大学, 2017 年 3 月)

須藤大地, 大里健, 北山哲, 佐々木伸, 須藤靖: “ダークマターの速度分散の成長とハローの自己相似的進化”, 日本天文学会 (甲南大学, 2015 年 9 月)

須藤大地, 北山哲, 佐々木伸, 須藤靖: “球対称崩壊・楕円体崩壊モデルの再考”, 日本天文学会 (大阪大学, 2015 年 3 月)

須藤大地, 北山哲, 佐々木伸, 須藤靖, Renyue Cen, Klaus Dolag: “X 線および SZ 効果観測を用いた銀河団質量推定の信頼性”, 日本天文学会 (東北大学, 2013 年 9 月)

〔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：
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：
国内外の別：

〔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：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号(8桁)：

(2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

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。