

令和 6 年 4 月 25 日現在

機関番号：62603

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2023

課題番号：19K14767

研究課題名（和文）将来観測に適応可能な銀河団の統計モデルと銀河団質量の精密測定

研究課題名（英文）Precise measurements of galaxy cluster masses with astrophysical models

研究代表者

白崎 正人 (Shirasaki, Masato)

統計数理研究所・統計思考院・助教

研究者番号：70767821

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：銀河団は、質量が太陽質量の10の15乗倍におよぶ宇宙最大の天体である。100万光年の超える大きさを持つため、銀河団の形成には、重力による物質集中と宇宙膨張の両方が重要である。遠方宇宙にある銀河団をくまなく検出することで、銀河団の形成過程を調査することができるのと同時に、重力と宇宙膨張の物理を検証することができる。本研究では、数値シミュレーション、準解析的モデル、観測データの3つを組み合わせ、銀河団の形成過程に迫る広範な研究を進めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙で一番大きな天体は、宇宙全体の小さなレプリカと考えられる。銀河団がどのように成長してきたかを調べることで、我々の住む宇宙をよりよく理解することができる。銀河団は、物質の重力成長、高温ガスからの高エネルギー放射、宇宙膨張による個数密度の進化、といったさまざまな物理過程が複雑に絡み合うおもしろい研究対象であり、本研究で行ったさまざまな研究成果は、銀河団の魅力を再確認する良い機会となる。

研究成果の概要（英文）：Clusters of galaxies are the largest objects in the Universe, with their typical masses being 10 to the 15th power of the mass of the Sun. Because of their size exceeding one million light years, both the gravitational growth of mass density and the cosmic expansion are important in the formation of galaxy clusters. By detecting clusters of galaxies throughout the distant universe, we can investigate the formation process of clusters of galaxies and at the same time verify the physics of gravity and cosmic expansion. We have combined numerical simulations, semi-analytical models, and observational data to conduct several extensive studies of the formation process of galaxy clusters so far.

研究分野：観測的宇宙論

キーワード：銀河団

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

銀河団の質量に対する個数分布（質量関数）は、宇宙の物質平均密度と密度揺らぎの大きさに依存し、宇宙論研究に有用である。しかしながら、銀河団の質量を決定するのは、観測的には極めて困難な操作である。銀河団の観測量からいかにして質量を推定するかは、2020年代の銀河団研究の喫緊の課題となっていた。

2. 研究の目的

本研究では、大規模な重力計算とガス/星の準解析モデルを複合的に用いた理論モデルを構築し、観測によって得られる銀河団の統計的な性質を物理的に理解する。N体計算により得られる高精度の質量降着史と、銀河団内部のガスと銀河の成長を密接に関連させることで、観測により示唆される銀河団の多様性をシミュレーション上で再現する。結果として得られるモデル銀河団を用いて、模擬的な天文観測を繰り返し行い、銀河団の観測量から銀河団の質量を高い統計精度で推定する方法論を開発する。

3. 研究の方法

本研究では、宇宙論的な大体積の中で銀河スケールの解像度を持つ重力計算とガスの準解析モデルの組み合わせにより、観測される銀河団の特徴をシミュレートし、観測量と銀河団質量がどのように関連しているかを調査する。シミュレーションで得られるモデル銀河団に実際の観測データ同様の解析手法を適応することで、推定される質量と真の値に違いが出ないような統計手法を開発する。

4. 研究成果

当初想定していたより、多くの研究成果を得ることができた。主たる成果は以下の通りである。

初年度は、X線観測と数値実験により較正された銀河団内ガスの物理モデルを用いて、米国、ロシア、欧州が進める将来の多波長の銀河団観測データがどの程度正確に銀河団内部のガス物理を制限できるかを予測した。結果として、現在進行中のX線観測計画eROSITA、米国が主導して進める銀河撮像観測LSST、高精度地上マイクロ波実験CMB-S4という3種類の異なる実験データを組み合わせれば、銀河団外縁部の乱流による非熱的圧力を15%の統計精度で測定できることを明らかにした。合わせて、異なる3種の実験データの相関解析を通じて、銀河団個数分布の時間進化を捉え、宇宙加速膨張の要因として考えられている暗黒エネルギーの時間進化を8%の統計精度で制限できることも示した。この結果は、将来の銀河団観測計画がどのような物理量を制限できるかを網羅的に示すもので、観測計画立案のガイドラインとして有用である。また、個々の銀河団の時間進化を理解するために、宇宙論的N体重力計算を用いて、銀河団の質量降着の歴史を詳細に調べ、銀河団周辺の質量分布と銀河団の質量降着に顕著な相関を発見した。この相関は、銀河団外縁の潮汐場により生じるもので、昨今の重力レンズ効果を用いた銀河団質量分布の解析に系統的な影響を与えることがわかった。

第2年度は、実際の観測データを使った銀河団のガスと質量分布に関する研究を行った。銀河団内部の陽子衝突に起因するガンマ線放射は、その存在が示唆されているものの、依然として観測されていない。我々は、銀河系外からくるガンマ線背景放射の中に、銀河団から到来するガンマ線がないかを統計的に調査した。宇宙に存在する銀河団を広く集めるために、宇宙マイクロ波背景放射(CMB)における熱的スニアエフゼルドビッチ効果(通称SZ効果)を利用した。SZ効果は、銀河団内の高温ガスとCMB光子が出会うことで、逆コンプトン散乱を通じて、CMBゆらぎに特徴的な周波数依存性が生じる現象である。プランク衛星によるCMB観測から、SZ効果に起因するゆらぎのマップが推定されている。このSZマップと、フェルミ衛星が観測するガンマ線の相関解析により、遠方の銀河団からガンマ線が到来しているかを調べた。実際の観測データでは、有意な相関が検出できなかったが、未検出であることから、銀河団内部からのガンマ線放射に上限をつけた。この上限は、近傍の銀河団からくる制限と比較して、数倍強い。得られたガンマ線放射の上限から、銀河団の成長過程で生じる衝撃波による陽子の加速能率は5%以下でなければならないことを示した。さらに、すばる望遠鏡による銀河撮像観測による銀河団探査手法を詳細に調べた。銀河撮像観測では、遠方の銀河が手前の重力によって形を変える重力レンズという現象を用いて、銀河団を探査する。この探査手法で、重力レンズと無関係な銀河団銀河が混入することで、銀河団の検出効率が下がることを発見した。しかし、測光的赤方偏移の情報を巧みに

利用することで、この銀河団銀河の混入の効果は小さくできることも併せて発見した。この結果は、現在進行中のすばる望遠鏡による第二公開データに応用される見込みである。

第3年度は、銀河団内部の銀河速度分散によって決まる力学的な質量と、重力レンズ解析によって決まる重力的な質量が一致するかを実際の観測データを用いて検証した。23個の銀河団を用いた解析では、二つの質量の間に統計的な違いは見られなかった。この結果を用いて、ビリアル定理により25億年前の宇宙での重力定数を制限し、地球近傍で知られている値と約20パーセントの統計誤差の範囲で整合していることを確認した。そのほかにも、プレーン重力理論など複数の修正重力理論に関する観測的な制限をつけることに成功した。また、電波領域での突発天体である高速電波バースト (Fast Radio Bursts; FRB) と銀河・銀河団と相互相関解析により、大規模構造に付随する電離ガスの分布を明らかにし、宇宙論的な情報を引き出せることを理論的に示した。1平方度あたり1つ程度のFRBを観測する将来観測により、銀河団とFRBの相互相関で、宇宙の平均的なバリオン密度や密度揺らぎの大きさなどの宇宙論の基本的な情報を数パーセントの統計精度で制限できることがわかった。加えて、銀河や銀河群とFRBの相互相関を加えることで、既存の観測で制限することが難しい銀河周辺のガス質量も10パーセント程度の精度で決定できることがわかった。さらに、すばる Hyper Suprime Cam サーベイによる銀河撮像データと、アタカマ宇宙望遠鏡で見つかった銀河団を用いた重力レンズ解析を進め、実際の観測データの解析に必要なパイプラインを構築した。

第4年度と最終年度は、すばる Hyper Suprime Cam サーベイによる銀河撮像データと、アタカマ宇宙望遠鏡で見つかった銀河団を用いた重力レンズ解析を進めた。解析結果は国際コラボレーションの内部査読段階にあり、近日中に論文として公表予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Rhythm Shimakawa, Nobuhiro Okabe, Masato Shirasaki, Masayuki Tanaka	4. 巻 519
2. 論文標題 King Chidarah Supercluster: Mapping the light and dark matter in a new supercluster at $z = 0.55$ using the subaru hyper supprime-cam	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters	6. 最初と最後の頁 L45-L50
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/mnrasl/slac150	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 Masato Shirasaki, Eiichi Egami, Nobuhiro Okabe, Satoshi Miyazaki	4. 巻 506
2. 論文標題 Stacked phase-space density of galaxies around massive clusters: comparison of dynamical and lensing masses	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 3385-3405
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/mnras/stab1961	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 Masato Shirasaki, Ryuichi Takahashi, Ken Osato, Kunihiro Ioka	4. 巻 512
2. 論文標題 Probing cosmology and gas physics with fast radio bursts: cross-correlations of dark matter haloes and cosmic dispersion measures	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1730-1750
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/mnras/stac490	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 Shirasaki Masato, Macias Oscar, Ando Shin'ichiro, Horiuchi Shunsaku, Yoshida Naoki	4. 巻 101
2. 論文標題 Cross-correlation of the extragalactic gamma-ray background with the thermal Sunyaev-Zel'dovich effect in the cosmic microwave background	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	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/PhysRevD.101.103022	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 Hamana Takashi, Shirasaki Masato, Lin Yen-Ting	4. 巻 72
2. 論文標題 Weak-lensing clusters from HSC survey first-year data: Mitigating the dilution effect of foreground and cluster-member galaxies	5. 発行年 2020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/psaa068	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 Masato Shirasaki, Erwin T. Lau, Daisuke Nagai	4. 巻 491
2. 論文標題 Probing Cosmology and Cluster Astrophysics with Multi-Wavelength Surveys I. Correlation Statistics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 235-253
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stz3021	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 Masato Shirasaki	4. 巻 883
2. 論文標題 The Pseudo-evolution of Galaxy-cluster Masses and Its Connection to Mass Density Profile	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab3855	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 -

〔学会発表〕 計1件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 白崎正人
2. 発表標題 N体シミュレーションを用いた銀河団ダークハローの質量集積の精密測定
3. 学会等名 日本天文学会2019年秋季年会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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