

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 9 月 5 日現在

機関番号：34304

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400264

研究課題名(和文) 宇宙の構造形成における重力非線形成長の理論研究と観測的宇宙論への応用

研究課題名(英文) Theoretical Study of gravitational nonlinear growth in structure formation and its application to the observational cosmology

研究代表者

二間瀬 敏史 (FUTAMASE, Toshifumi)

京都産業大学・理学部・教授

研究者番号：20209141

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：暗黒エネルギーの観測的研究のために宇宙の大規模構造による弱い重力レンズ解析において重要な高精度な背景銀河形状測定法を開発した。近傍銀河団に対して弱い重力レンズによって内部の暗黒物質部分ハローを検出し、その統計的な性質が冷たい暗黒物質に基づく構造形成理論と矛盾しないことを初めて示した。我々がその存在を予言した銀河団のつくる新種の重力レンズ像が2009年に発見された。この像をつくる背景銀河の赤方偏移が暗黒エネルギーに敏感に依存することを示し、新たな暗黒エネルギーの観測方法を提案した。大規模構造が超新星の明るさに与える効果を定量的に調べることで、ニュートリノ質量の上限がえられることを示した。

研究成果の概要(英文)：We have developed a new accurate method of shape measurement of background galaxies in the weak lensing analysis by large scale structure of the universe which is used to study dark energy observationally. We have detected the dark matter subhalos in nearby galaxy clusters. We confirm that the measured statistical properties of the observed subhalos are consistent with the prediction by the structure formation scenario based on cold dark matter. We have proposed a new method of measuring the dark energy property using a new type of the lensed image in galaxy cluster which is predicted by us and discovered in 2009. The method is based on the fact that the redshift of the source galaxy depends critically on the dark energy so that we can improve the accuracy of the measurement of dark energy by observing many GRAMORs. We have also studied the effect of large scale structure on the apparent luminosity of supernovae and found that the effect is used to put an upper bound on neutrino mass

研究分野：宇宙論

キーワード：弱い重力レンズ 銀河団 暗黒物質 暗黒エネルギー

1. 研究開始当初の背景

現代宇宙論において暗黒物質、暗黒エネルギーの正体の解明は最も大きな問題である。これらの理論的な理解はいまだ困難であるため、観測的にそれらの性質を測定することが急務であった。そのため日本を含め多くの観測プロジェクトが計画され、現在実行中のものもある。しかし観測が大規模、高精度になればなるほど、構造形成の理論的理解を深め、かつデータ解析を高精度化する必要がある。そのため重力の非線形成長の理論的理解、および暗黒物質、暗黒エネルギーの観測データ解析の高精度化が必要であった。特に暗黒エネルギーに関しては、その観測手段である宇宙の大規模構造による弱い重力レンズ効果が非常に微弱であるため、大気の揺らぎや光学系の不完全さによる誤差の集積の影響が大きく、精密な測定を困難にしている。したがって弱い重力レンズ効果における誤差評価とその改善に注目が集まっていた。

2. 研究の目的

暗黒物質、暗黒エネルギー研究のために現在進行中、または近い将来に実行される大規模銀河サーベイデータに基づく弱い重力レンズ観測を念頭に置いて、その大規模高精度データを真に科学的価値あるものにするため、弱い重力レンズ観測に決定的に重要な背景銀河形状の新たな測定方法とそれに付随する系統的な誤差の除去方法の開発を目的とした。それと同時に暗黒エネルギーによる弱い重力レンズ効果は微小なため、他の方法でも観測することが望ましく、新たな暗黒エネルギー観測法を提案することも目的である。

暗黒物質については従来観測してきた近傍銀河団の弱い重力レンズ観測による銀河団全体およびその内部の暗黒物質の分布研究をさらに進めることで、暗黒物質の性質及び構造形成理論の検証を行うことを目的とする。

また近い将来実現される超大規模サーベイによって観測可能となる超新星の明るさに対する大規模構造の影響から、構造形成に影響を与えるニュートリノ質量への制限、宇宙膨張に影響を与える暗黒エネルギーなど宇宙論に関する情報を引き出すことを目的とする。

3. 研究の方法

弱い重力レンズ効果の解析に最も重要な背景銀河の正確な形状測定であるが、これには大気揺らぎなどの系統誤差が付きまとう。この誤差は同一視野に観測される星の像を基に補正されるが、従来方法では微小で薄い背景銀河に対して補正に用いられる関数を近似する必要があるので、誤差が十分取り

除けなかった。我々が以前から独自に開発している背景銀河の形状測定法に基づく方法では淡く小さな銀河に対しても補正に要する関数を近似する必要がないため誤差を正確に取り除けることが期待される。この方法が実際に有効に行えるかを観測データ及び数値シミュレーションで検証を行う。

すばる望遠鏡の超広視野をもつ主焦点カメラを用いて近傍銀河団の弱い重力レンズ効果を観測し、銀河団全体、および内部の質量分布を決める観測プロポーザルを行い、観測結果を様々な暗黒物質に基づく構造形成理論の予言と比較検討することで、暗黒物質の性質を調べる。

暗黒エネルギー研究のために我々が以前にその存在を指摘した新種の強い重力レンズ像が最近発見されたことで、それを用いた新たな観測方法を提案する。

また大規模構造が引き起こす超新星の明るさの変化を定式化はすでに行っているもので、これに基づいて近い将来観測される超新星データに合わせた解析を行うことで、ニュートリノ質量、暗黒物質への制限が得られる可能性を追求する。

4. 研究成果

弱い重力レンズ解析はレンズ天体の背景銀河形状の測定が基礎であるが、大気の揺らぎなどで測定誤差が生まれ特に暗黒エネルギーが引き起こす微小な変化の測定に決定的な影響を与え、暗黒エネルギーの詳細な情報を引き出すことを困難にする。通常、その誤差は本来1点のイメージをもつべき星の像をつかって補正されるが、従来方法では微小で暗い背景銀河に対しては補正のために利用する関数に対してある種の近似を行うためにその誤差補正が不十分であった。我々は補正関数の逆関数を構成するという方法で近似を使わない全く新しい方法を開発した。数値実験によってこの方法は誤差が従来よりもはるかに小さいことを確認した。さらに従来経験的にしか取り扱えなかった CCD が大気からの光子を感知することで引き起こされる誤差について第一原理から除去する方法を提案した。この方法をすばる望遠鏡で観測された A1689 という銀河団に対して適用し銀河団の質量分布を求めた。また暗黒エネルギー観測の新しい方法として我々が初めて指摘した GRAMOR と呼ばれるゆがみが小さいにもかかわらず大きく拡大されているレンズ像が利用できることを示した。GRAMOR は実際に存在することが 2009 年に確認されたが、その観測データを用いることでこの GRAMOR 像をつくる背景銀河の赤方偏移が暗黒エネルギーの性質に敏感に依存することを示した。このことから宇宙望遠鏡で詳細な観測が行われている複数の銀河団に対して期待される GRAMOR の数を見積り十分な数の GRAMOR が発見されること、およびそれらのイ

メージを作る背景銀河の赤方偏移を同時に用いることで暗黒エネルギー観測の有力な方法となることを示した。

またすばる望遠鏡によって 50 個の近傍銀河団を観測して、弱い重力レンズ効果によってそれらの平均的な質量分布を決めて、それが冷たい暗黒物質に基づく構造形成理論の予言と一致することを示した。

宇宙の大規模構造が引き起こす超新星の明るさの変化について、近い将来の観測でニュートリノの質量について 1 エレクトロンボルト程度の上限が得られることを示した。さらにこの上限は、異なる赤方偏移の超新星のデータを比較検討することや赤方偏移が 2 程度までの超新星を観測することで、さらに引き下げられることを見出した。

5. 主な発表論文等 (研究代表者は下線)

[雑誌論文](計 13 件)

1. R.Hada and T. Futamase, Cosntraints on neutrino mass from the lensing dispersion of Type Ia supernovae, 査読有, Astrophysical Journal, 828, p.112, (2016), DOI:10.3847/0004-637X/828/2/112
2. T. Okura and T. Futamase, The Systematic Error Test for PSF Correction in Weak lensing Shear Measurement by ERA, 査読有, Astrophysical Journal, 827, 138, (2016), DOI:10.3847-637X/827/2/138
3. N. Okabe, K. Umetsu, T. Tamura, T. Fujita, M. Takzawa, and 12 authors, 8 番目. Central mass profile of nearby cool-core galaxy cluster Hydra A and A478, 査読有, Monthly Notices of Royal astronomical Society, 456, 4475-4487, (2016) DOI:10.1093/mnras/stv2916
4. G. Smith, P. Mazzotta, N. Okabe, F. Zipara, A. Mulroy, and 10 authotrs, 10 番目, LoCUSS: Testing Hydrostatic equilibrium in galkaxy cluster, 査読有, Monthly Notice of Royal astronomical Society, 456, 74-78, (2016), DOI: 10.1093/mnras/siv
5. M. Morioka and T. Futamase, Lens Statistics wit Gravitationally Lensed yet Morphologically Regular Images, 査読有, Astrophysical Journal, 805, 184, (2015), DOI: 10.1088/0004-637X/805/2/184
6. Y. Okura and T. Futamase, A New Weak Lensing Shear Anlysis using Ellipticity Defined by 0th order Moment, 査読有, Astronomy and Astrophysics, 576, A63, (2015) DOI 10.1051/0004-6361/201425450
7. T. Futamase, Gravitational lensing in Cosmology, 査読有, International Journal of Modern Physics, D, 24, 1530011, (2015) DOI 10.1142/S0218271815300116
8. N. Okabe, K. Umetsu, T. Tamura, Y.Fujita, M. Takizawa and 14 authors, 14 番目, 査読有, Universal profiles of te intracluster medium from Suzaku X-ray and Subaru weak-lensing observations, Publications of Astronomical Society of Japan, 66, 9914, (2014) DOI 10.1093/pasj/psu075
9. A Lefor and T. Futamase, Comparison of strong gravitational lensing model Software, 査読有, Astronomy and Computation, 6, 28-40, (2014) DOI 10.1016/j.ascom.2014.04.006
10. N. Okabe, T. Futamase, M. Kajisawa and R. Kuroshima, Subaru Weak-Lensing Study of Subhalos in the Coma Cluster, 査読有, Astrophysical Journal, 784, 90, (2014)
11. N. Okura and T. Futamase, A New Method of Point-Spread Function correction using the Ellipticity of Re-Smeared Artificial Iimages in Weak lensing Shear Analysis, 査読有, Astrophysical Journal, 792, 104, (2014) DOI 10.1088/0004-637X/784/2/90
12. R. Hada and T. Futamase, The magnitude-redshift relation in a realistic inhomogeneous universe, 査読有, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 012, 042, (2014) DOI 10.1088/1475-7516/2014/12/042
13. T. Hamana, S. Miyazaki, Y. Okura, T. Okamura and T. Futamase, Toward Understanding the Anisotropic PPoint Spread Function of Suprime-Cam and its impact on Cosmic Shear Measurement, 査読有, Publications of Astronomical Society of Japan, 65, 104, (2014) DOI 10.1093/pasj/65.5.104

[学会発表](計 5 件)

1. T. Futamase, Weak Gravitaional Lensing applied for Cosmology and Theory of Gravity, Sendai Workshop on Quantum Information Physics 2017, (招待講演) 2017 年 3 月 13 日、東北大学、仙台
2. T. Futamase, Review of Gravitational Lensing, (招待講演)、理論懇親会 2017、2016 年 12 月 22 日、東北大学、仙台
3. T. Futamase, Weak Lensing Study of Subhalos in Very Nearby Galaxy Clusters, Cosmic Microwave Background, Large Scale Structure and 21cm

Survey,(招待講演),28, June, 2016,
Universidad Autonoma de Madrid, Madrid,
Spain

4. T. Futamase, Weak lensing Study for DM subhalos in Coma Cluster, (招待講演), 12th Schutz Workshop on Gravitational Waves and Relativistic Astrophysics, 12, September 2015, Albert Einstein Institute, Hanover, Germany
5. T. Futamase, What is GR and current frontier science using GR, (基調講演), 24, August, 2015, Celebrating A Century of General Relativity Einstein dan International Year of Light, Bundung Institute of Technology, Bundung, Indonesia,

[図書](計 2 件)

1. 二間瀬敏史, 宇宙物理学、190 ページ、朝倉書店, (2014), ISBN 978-4-254-13779-8
2. T. Futamase, “On the backreaction problem in cosmology”, in Frontiers in Relativistic Celestial Mechanics, Vol.1, Theory, p. 283 - 294, M. Soffel, T. Damour, G. Scafer, S. Korobkov, S. Kopeikin, DE GRUYTER, 2014, ISBN 978-3-11-033749-5

6. 研究組織

(1) 研究代表者

二間瀬 敏史 (FUTAMASE, Toshifumi)
京都産業大学・理学部・教授
研究者番号: 20209141

(2) 研究協力者

Y. Mellier (Y. Mellier)
パリ天文台・教授

D. Eisenstein (D. Eisenstein)
ハーバード大学・天文学部・教授

梅津 敬一 (UMETSU, Keiichi)
中央研究院天文・天体物理研究所、教授

大倉 悠貴 (OOKURA, Yuki)
理化学研究所・ポストドク

岡部 信広 (OKABE, Nobuhiro)
広島大学・特任助教