

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 16 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23740161

研究課題名(和文) 宇宙の構造進化から探る暗黒エネルギー

研究課題名(英文) Studying Dark Energy with the Evolution of Cosmic Structure

研究代表者

大栗 真宗 (Oguri, Masamune)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：60598572

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙論及び構造形成に関する多くの成果が得られた。特にすばる望遠鏡Suprime-camの重力レンズ解析から銀河団内のダークマター分布をこれまでにない精度で測定し、標準的な構造形成のモデル予測とよく一致することを見いだした。また大規模N体計算のレイトレーシングの解析から理論計算の精度向上や新たな統計量の提案などを行った。これらの成果はすばる望遠鏡Hyper Suprime-camサーベイ策定に大いに活用されその実現に貢献した。

研究成果の概要(英文)：Many results on cosmology and structure formation were obtained. In particular, I have measured dark matter distributions in clusters of galaxies precisely with weak lensing analysis of Subaru Suprime-cam images, finding a very good agreement with standard model predictions. The analysis of large ray-tracing simulation data led to the construction of improved analytical models and the proposal of new statistical quantities. These results were used in the survey design of the Subaru Hyper Suprime-cam survey and played a significant role in the approval of the Subaru HSC survey.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：観測的宇宙論 重力レンズ クエーサー 銀河団 ダークマター ダークエネルギー

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙の全エネルギーの7割以上を占めると考えられている暗黒エネルギーは、現代宇宙論の最大の謎の一つである。この宇宙膨張を加速される暗黒エネルギーの正体にせまる現在の唯一の方法は天文観測であり、それ故宇宙の構造進化からその性質を調べるサーベイ計画が世界中で進行している。これまで日本は、暗黒エネルギーの観測的研究において海外に遅れをとってきたが、現在すばる望遠鏡に搭載が予定されている **Hyper Suprime-Cam** (以下 **HSC**) が稼働すればこの分野で一気に世界をリードすることができるかと期待されていた。**HSC** は本研究開始当初2011年末ごろにファーストライトを迎えると見積もられており、その広い視野と集光能力によって稼働時点で世界最高のサーベイ速度を達成することになる。

**HSC** を用いた広視野サーベイによる暗黒エネルギー研究は、主に弱い重力レンズ現象と銀河団の数密度進化を用いて行われる。特に **HSC** は弱い重力レンズの研究を直接念頭において設計されており、視野の広い範囲にわたって非常に高い結像性能を有することから、弱い重力レンズを用いた研究で他のサーベイを圧倒する成果が得られると期待されている。これらの暗黒エネルギー研究は、物質の揺らぎの赤方偏移進化を詳細に観測することで暗黒エネルギーの各時刻での量を測るという手法を用いることになるが、このような揺らぎの進化を用いた手法は **Ia** 型超新星爆発やバリオン音響振動といった距離の測定に基づいた幾何学的手法と極めて相補的であり、暗黒エネルギーの詳細研究に必要不可欠となる。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、弱い重力レンズと銀河団という二つのゆらぎの宇宙論的進化の代表的なプローブの理論的及び観測的研究を、特にこれらの宇宙論的応用において大きな障害となる統計誤差をどのように克服するかに重点をおいて行うことであった。この研究は、銀河団の構造と進化に対する知見を深めると同時に、近い将来のすばる望遠鏡を用いた広視野の撮像サーベイから暗黒エネルギーの情報を効率よく引き出すための基礎研究でもある。

## 3. 研究の方法

本研究では理論研究と観測研究を平行して行う。理論研究では、例えば弱い重力レン

ズによる宇宙論において重要となる系統誤差を抑える一つの可能性として、多くの異なる観測データを組み合わせることによる自己較正(**self-calibration**)を検討する。重力レンズ解析の難しい点として観測量が視線方向に投影した量という点があるが、銀河(**luminous red galaxies**)、銀河団、クエーサーなどの赤方偏移サンプルと背景銀河、あるいは歪みのシグナルそのものとの相互相関を測定することでその赤方移偏の情報を抜き出すことができるため、これを利用することで上記の系統誤差をさらに自己較正できるであろう。これらのアイデアを具現化し、シミュレーションで得られる模擬観測データや実際の観測に適応しその効果を調べていく。一方観測研究では、これまでスローンデジタルスカイサーベイ(**SDSS**)のデータを用いた強い重力レンズの探索を国内外の研究協力者と行ってきており、これにより強い重力レンズを示す銀河団の様なサンプルを構築しつつある。この銀河団サンプルに対してすばる望遠鏡の主焦点カメラ **Suprime-cam** による撮像サーベイを進めており、すでに半分以上の銀河団に対して多色の広視野画像を得ている。これら銀河団画像の弱い重力レンズ解析を系統的に行い、その結果を強い重力レンズの結果やスニヤエフ-ゼルドヴィッチ(以下 **SZ**) 効果の観測による銀河団ガスの分布などを比べ、銀河団内の暗黒物質分布とガス分布を詳細に調べる。これらの解析の過程において、将来の **HSC** サーベイにおける弱い重力レンズの解析を視野に入れ、上記の理論研究で得られる新手法の試験を行い、かつより精確な銀河の形状測定や点拡散関数の歪みの補正など解析の基礎的なとこにまで踏み込んだ研究も行いたい。

## 4. 研究成果

強い重力レンズを示す銀河団のすばる望遠鏡による系統的な観測を行い、その重力レンズ効果の詳しい解析を行った。これにより、銀河団内のダークマター分布についてこれまででない精度で明らかにすることができた。特に、ダークマター密度分布の中心集中度について長らく論争が続いていたが、この研究により密度分布が標準的な冷たいダークマターモデルで予測されるものとよい一致を示すことを明らかにした。また密度分布の非球対称性についても測定を行い、ダークマター分布が平均的におおきく歪んだ扁平な分布である強い証拠を得た。この一連の研究により銀河団の理解がより深まり、研究計画の主目的である銀河

団の進化の観測を用いたダークエネルギーの解明に向けた重要なステップとなる。

この他、大規模 N 体計算のレイトレーシングの研究も進め、特に宇宙論的重力レンズの確率分布について最高精度の計算を行い解析計算との比較などを行った。さらに、N 体シミュレーションを詳しく解析することで、密度揺らぎパワースペクトルの高精度モデルの開発や重力レンズで選択される銀河団の選択効果などを調べた。

銀河団により引き起こされた大分離角重力レンズクエーサーを、ハッブル望遠鏡およびチャンドラ望遠鏡で観測し、詳しい解析からその複雑な内部構造を明らかにし、特に衝突によって重力レンズと X 線から推定される銀河団質量に著しい違いがあることを突き止めた。

またクエーサーの小スケール相関関数を測定し、それをハローモデルの枠組みでモデル化することでクエーサーがダークハローの中心に存在する確率を初めて制限した。

またスローンデジタルスカイサーベイから構築された重力レンズクエーサーサンプルの統計解析を行うことで、超新星爆発の観測等とは独立に宇宙が加速膨張している強い証拠を得た。強い重力レンズサンプルの統計解析から楕円銀河の質量密度分布を再構築し、重力レンズクエーサーのマイクロレンズ現象に着目することでダークマター分布と星分布の直接的な分解に初めて成功した。その結果従来考えられていたダークマター分布の断熱圧縮効果が観測的には見られないことがわかった。

新たな宇宙論のテストとして、様々な統計量を考案した。宇宙の大規模構造に見られるボイドの弱い重力レンズ効果を考え将来のサーベイにおいて検出可能であることを見いだした。バリオン音響振動によるダークエネルギー探査の新たな方法論として、分光サンプルと撮像サンプルのクロス相関関数を提案した。

まとめると、非常に多くの理論的、観測的成果が得られ、HSC サーベイに向けた準備が飛躍的に進んだ。HSC サーベイは装置開発の遅れによりファーストライトも 2013 年に遅れ、その結果本研究で HSC データを直接解析することはできなかった。一方で本研究の成果は HSC サーベイのサーベイデザインやサーベイ提案書に大いに活用され、結果として 5 年 300 夜の HSC サーベイの実現へ大きく貢献

し、その意味で当初の目的に沿う大きな進展が得られたことは強調しておきたい。

## 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 19 件)

M. B. Bayliss, T. Johnson, M. D. Gladders, K. Sharon, M. Oguri, “Line-of-Sight Structure Toward Strong Lensing Galaxy Clusters”, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 783, 41 (2014)

DOI: 10.1088/0004-637X/783/1/41

M. Oguri, C. E. Rusu, E. E. Falco, “The Stellar and Dark Matter Distributions in Elliptical Galaxies from the Ensemble of Strong Gravitational Lenses”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 査読有, 439, 2494-2504 (2014)

DOI: 10.1093/mnras/stu106

A. J. Nishizawa, M. Oguri, M. Takada, “Baryon Acoustic Oscillations with the Cross-Correlation of Spectroscopic and Photometric Samples”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 査読有, 433, 730-739 (2013)

DOI: 10.1093/mnras/stt761

Y. Higuchi, M. Oguri, T. Hamana, “Measuring the Mass Distribution of Voids with Stacked Weak Lensing”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 査読有, 432, 1021-1031 (2013)

DOI: 10.1093/mnras/stt521

C. R. Rusu, M. Oguri, 他, “The Quasar-galaxy Cross SDSS J1320+1644: A Probable Large-separation Lensed Quasar”, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 765, 139 (2013)

DOI: 10.1088/0004-637X/765/2/139

J. Fohlmeister, C. S. Kochanek, E. E. Falco, J. Wambsganss, M. Oguri, X. Dai, “A Two-year Time Delay for the Lensed Quasar SDSS J1029+2623”, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 764, 186 (2013)

DOI: 10.1088/0004-637X/764/2/186

T. Misawa, N. Inada, K. Ohsuga, P. Gandhi, R. Takahashi, M. Oguri, “Spectroscopy along Multiple, Lensed Sight Lines through Outflowing Winds in the Quasar SDSS J1029+2623”, *The Astronomical Journal*, 査読有, 145, 48 (2013)

DOI: 10.1088/0004-6256/145/2/48

M. Oguri, 他, “The Hidden Fortress: structure and substructure of the complex strong lensing cluster SDSS J1029+2623”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 査読有, 429, 482-493 (2013)

DOI: 10.1093/mnras/sts351

R. Takahashi, M. Sato, T. Nishimichi, A. Taruya, M. Oguri, “Revising the Halofit Model for the Nonlinear Matter Power Spectrum”, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 761, 152 (2012)

DOI: 10.1088/0004-637X/761/2/152

A. Zitrin, M. Bartelmann, K. Umetsu, M. Oguri, T. Broadhurst, “Miscentring in galaxy clusters: dark matter to brightest cluster galaxy offsets in 10 000 Sloan Digital Sky Survey clusters”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 査読有, 426, 2944-2956 (2012)

DOI: 10.1111/j.1365-2966.2012.21886.x

N. Ota, M. Oguri, 他, “The Chandra View of the Largest Quasar Lens SDSS J1029+2623”, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 758, 26 (2012)

DOI: 10.1088/0004-637X/758/1/26

T. Hamana, M. Oguri, M. Shirasaki, M. Sato, “Scatter and bias in weak lensing selected clusters”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 査読有, 425, 2287-2298 (2012)

DOI: 10.1111/j.1365-2966.2012.21582.x

I. Kayo, M. Oguri, “Very small scale clustering of quasars from a complete quasar lens survey”, 査読有, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 424, 1363-1371 (2012)

DOI: 10.1111/j.1365-2966.2012.21321.x

A. Zitrin, 他 (including M. Oguri), “The universal Einstein radius distribution from 10 000 SDSS clusters”, 査読有, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 査読有, 423, 2308-2324 (2012)

DOI: 0.1111/j.1365-2966.2012.21041.x

M. Oguri, 他, “The Sloan Digital Sky Survey Quasar Lens Search. VI. Constraints on Dark Energy and the Evolution of Massive Galaxies”, 査読有, *The Astronomical Journal*, 143, 120 (2012)

DOI: 10.1088/0004-6256/143/5/120

N. Inada, M. Oguri, 他, “The Sloan Digital Sky Survey Quasar Lens Search. V. Final Catalog from the Seventh Data Release”, *The Astronomical Journal*, 査読有, 143, 119 (2012)

DOI: 10.1088/0004-6256/143/5/119

M. Oguri, 他, “Combined Strong and Weak Lensing Analysis of 28 Clusters from the Sloan Giant Arcs Survey”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 査読有, 420, 3213-3239 (2012)

DOI: 10.1111/j.1365-2966.2011.20248.x

N. Jackson, 他 (including M. Oguri), “New lensed quasars from the MUSCLES survey”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 査読有, 419, 2014-2024 (2012)

DOI: 10.1111/j.1365-2966.2011.19857.x

R. Takahashi, M. Oguri, 他, “Probability Distribution Functions of Cosmological Lensing: Convergence, Shear, and Magnification”, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 742, 15 (2011)

DOI: 10.1088/0004-637X/742/1/15

[学会発表] (計 7 件)

M. Oguri, “Gravitational lensing science with WISH”, WISH Science Workshop: "Exploring the Darkness" (招待講演), 2013年12月3日, 国立天文台, 東京

M. Oguri, “Dark matter distributions in clusters

and galaxies measured using gravitational lensing”, Dark matter, dark energy and their detection (招待講演), 2013年7月23日, Novosibirsk, Russia

M. Oguri, “The shape of cluster-scale dark matter halos”, Cluster Lensing: Peering into the Past, Planning for the Future (招待講演), 2013年4月16日, STScI, Baltimore, USA

M. Oguri, “SDSS J1029+2623: A violent cluster merger?”, Subaru Users Meeting FY2012 (招待講演), 2013年01月16日, 国立天文台, 東京

M. Oguri, “Applications of gravitationally lensed submm galaxies”, Large Aperture Millimeter/Submillimeter Telescopes in the ALMA era (招待講演), 2012年09月29日, 国立天文台, 東京

M. Oguri, “Testing LambdaCDM with Cluster Lensing”, Particle Cosmology (招待講演), 2011年12月17日, 名古屋大学

M. Oguri, “Halo Profiles from Lensing Observations of Clusters”, SZX Huntsville (招待講演), 2011年9月21日, Huntsville, USA

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

本研究成果を元にした3件のプレスリリースがあり、日本経済新聞をはじめ国内外の多くのメディアに紹介された。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大栗 真宗 ( OGURI, Masamune )  
東京大学・大学院理学系研究科・助教  
研究者番号: 60598572

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者