

平成 30 年 4 月 12 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2017

課題番号：26800093

研究課題名(和文)密度ゆらぎとその進化の精密測定

研究課題名(英文)Accurate measurement of density fluctuations and their evolution

研究代表者

大栗 真宗(Oguri, Masamune)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教

研究者番号：60598572

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：HSCサーベイの初期データの解析および関連するさまざまな研究を行い数多くの研究成果を得た。重力レンズ解析によりこれまで最大級の三次元質量地図を作成し、また質量地図よりこれまで最大級の質量で選ばれた銀河団サンプルを構築した。銀河団の数がプランク衛星の観測結果から期待されるものより少ないことがわかった。HSCサーベイで可視銀河団サンプルを赤方偏移1.1まで構築した。またハッブル宇宙望遠鏡をもちいた観測で重力レンズで増光されたこれまででもっとも遠方の単独の星を発見し、これがダークマターの性質に新しい制限を与えることがわかった。

研究成果の概要(英文)：I obtained many research results based on the analysis of the first-year HSC survey data and related work. I have constructed the three-dimensional weak lensing mass map ever made, and selected clusters of galaxies purely from the mass map to find that their abundance is lower than the expectation from the Planck satellite result. I have also constructed an optically selected cluster catalog out to redshift of 1.1. I contributed the discovery of the farthest star ever seen that was made thanks to gravitational lensing magnification, and found that the discovery place an interesting constraint on the nature of dark matter.

研究分野：天文学

キーワード：観測的宇宙論 重力レンズ 銀河団 サーベイ観測

## 1. 研究開始当初の背景

近年の観測的宇宙論研究の急速な発展により、冷たいダークマターと宇宙項的なダークエネルギーを基本的な構成要素とし重力不安定性により構造が形成される宇宙論の標準理論が完成したと断言していいであろう。その成功の代表的な例が宇宙背景放射ゆらぎの観測であり、わずかに数個のパラメータを合わせるだけで宇宙背景放射の複雑な温度ゆらぎおよび偏光ゆらぎの角度パワースペクトルが見事に再現でき、我々の宇宙構造形成史の理解が基本的に正しいことを如実に示している。今年 2013 年に宇宙論解析の最初の結果が発表されたプランク衛星の宇宙背景放射ゆらぎの観測はこの描像に基本的には沿うものであり、温度ゆらぎパワースペクトルや温度ゆらぎ場のガウス性など基本的な物理量が標準理論の予言と非常によく合うことが再確認された。

しかしながら、プランク衛星の結果は、近傍宇宙において以前考えられていたよりも多くの質量密度および密度ゆらぎの量を予言するものであった。一方近傍宇宙の密度ゆらぎを測定する代表的な手法である弱い重力レンズ相関関数と銀河団の数密度は、質量密度および密度ゆらぎの両方と正の相関をもつ。その結果、プランク衛星の結果から予測される近傍宇宙での銀河団の数密度や弱い重力レンズ相関関数が現在のこれらの観測と矛盾の兆候を示している。

## 2. 研究の目的

本研究ではすばる望遠鏡を用いた大規模撮像データの詳細な解析により近傍宇宙の密度ゆらぎとその進化を詳細に測定しプランク衛星の結果との無撞着性を徹底的に検証する。この研究計画の背景として、すばる望遠鏡に新型カメラ Hyper Suprime-Cam (以下 HSC) が新たに設置され稼働を始めたことがある。この HSC はこれまでのすばる望遠鏡のカメラの 7 倍の観測視野を持ち、現時点で圧倒的に世界最高のサーベイ速度を有するカメラとなっている。この性能を有効活用すべく 5 年間で計 300 夜という大量のすばる望遠鏡の観測時間を投入した撮像サーベイ計画が 2014 年 2 月より開始される。弱い重力レンズと銀河団を用いた密度ゆらぎの精密測定はこの HSC サーベイにおいて主要テーマの一つに掲げられておりまさに本研究に理想的な観測データが得られると期待できる。

## 3. 研究の方法

本研究では、近傍宇宙の密度ゆらぎの代表的な手法である弱い重力レンズ観測と銀河団観測の両方を用いこれらの様々な観測量を相互比較する多角的なアプローチをとる。

これにより、これまでの観測に比べ飛躍的に統計誤差を減らすのみならず系統誤差を抑えた密度ゆらぎの測定を目指す。例えば銀河団の数密度を用いる方法の系統誤差の大きな要因の一つが銀河団の質量見積りであるが、弱い重力レンズ信号を多数の銀河団の周りで測定し重ね合わせることで銀河団の平均質量を精確に見積もることができる。さらには弱重力レンズマップのピークを同定することで銀河団を発見することができ、これを用いた数密度の研究は可視の銀河団銀河の色から得られた銀河団サンプルを用いた研究と相補的であり系統誤差のチェックに有用である。一方弱い重力レンズの二点相関関数からも直接密度ゆらぎを測定することができ、HSC サーベイではこの測定の感度は過去のサーベイから 10 倍向上されるが、弱い重力レンズ二点相関関数においても銀河の向きの固有相関や測光的赤方偏移などの系統誤差に注意する必要がある。銀河団数密度の結果との比較は重要である。それに加えて研究代表者は過去の理論研究において銀河団と弱い重力レンズの観測量をうまく組み合わせることでさまざまな系統誤差を自己較正する新手法を提案している。この新しい方法論を HSC サーベイに適用して従来の方で得られた結果と比較する。このように多角的なアプローチにより信頼性の高い密度ゆらぎの測定を行う。また HSC サーベイにより近傍宇宙の密度ゆらぎの総量だけでなく赤方偏移  $z=0$  から 1 程度までのゆらぎの時間進化も測定でき、これはプランク衛星の結果との矛盾がはっきりした場合その原因となる上で述べた様々な物理プロセスを峻別し特定する上で非常に有用となる。

## 4. 研究成果

事前に予期していた成果に加えて、その他の様々な研究成果が得られた。

HSC サーベイの観測は順調にすすみ、初年度データの解析によって弱い重力レンズの測定が期待される質でできていることがわかった。系統誤差を様々な角度から調べ、その系統誤差は初年度データ解析において無視できるほど小さいことがわかった。

この弱い重力レンズカタログをもちいて質量マップを再構築した。伝統的な二次元質量マップに加えて、測光的赤方偏移を利用した三次元質量マップの再構築にも成功した。これはこれまで再構築されたなかでもっとも広い領域に渡る三次元質量マップである。この質量マップの解析から純粋に重力効果のみで選ばれるクリーンな銀河団サンプルを構築しその数密度をプランク衛星の結果の外挿の期待値と比較したところ HSC サーベイの銀河団数密度はこの外挿の期待値より低いことがわかった。これは密度ゆらぎの食い違いの問題をますます深刻なものにする。スニアエフ-ゼルドビッチ効果で選ばれた銀

河団サンプルについても HSC データをもちいた重力レンズ解析を行い、上記の結果を支持する結果を得た。

また銀河団の数密度進化を議論するために、HSC サーベイデータから可視銀河団サンプルを構築するための新しいアルゴリズム CAMIRA を開発した。SDSS データに適用しそのパフォーマンスの高さを確かめた。この CAMIRA を HSC サーベイの初年度データに適用し赤方偏移 0.1 から 1.1 までの広い範囲で銀河団サンプルを構築した。このように赤方偏移 1 をこえる遠方まで信頼できる銀河団サンプルを構築できたのは HSC サーベイの威力をよく表している。現在この銀河団サンプルの重力レンズをもちいた精確な質量測定を行っている。

銀河団の質量分布をよりよく理解するためにハッブル宇宙望遠鏡をもちいた銀河団観測の研究に参加していたが、そこで偶然に重力レンズで非常に大きく増光された単独の星を発見した。詳しい理論的な検討によって、この観測からダークマターの性質に新しい制限を与えることができることがわかった。この一連の研究は密度ゆらぎの進化を調べる新しい手法を開拓するもので、当初想定はしていなかったが本研究課題の遂行に際して得られた重要な結果である。

#### 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 45 件)

- (1) P. L. Kelly, 他 (including M. Oguri, 著者 45 人中 12 番目), “Extreme magnification of a star at redshift 1.5 by a galaxy-cluster lens”, *Nature Astronomy*, 2, 334-342 (2018), 査読有  
DOI: 10.1038/s41550-018-0430-3
- (2) S. A. Rodney, 他 (including M. Oguri, 著者 35 人中 23 番目), “Two Peculiar Fast Transients in a Strongly Lensed Host Galaxy”, *Nature Astronomy*, 2, 324-333 (2018), 査読有  
DOI: 10.1038/s41550-018-0405-4
- (3) M. Oguri, J. M. Diego, N. Kaiser, P. L. Kelly, and T. Broadhurst, “Understanding Caustic Crossings in Giant Arcs: Characteristic Scales, Event Rates, and Constraints on Compact Dark Matter”, *Physical Review D*, 97, 023518 (2018), 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevD.97.023518
- (4) S. Miyazaki, M. Oguri, 他, “A Large Sample of Shear Selected Clusters from the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program S16A Wide Field Mass Maps”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 70, S27 (2018), 査読有  
DOI: 10.1093/pasj/psx120
- (5) M. Oguri, S. Miyazaki, 他, “Two- and Three-Dimensional Wide-Field Weak Lensing Mass Maps from the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program S16A Data”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 70, S26 (2018), 査読有  
DOI: 10.1093/pasj/psx070
- (6) M. Oguri, 他, “An Optically-Selected Cluster Catalog at Redshift  $0.1 < z < 1.1$  from the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program S16A Data Masamune Oguri, et al.”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 70, S20 (2018), 査読有  
DOI: 10.1093/pasj/psx042
- (7) A. More, C.-H. Lee, M. Oguri, 他, “A New Quadruple Gravitational Lens from the Hyper Suprime-Cam Survey: the Puzzle of HSC J115252+004733”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 465, 2411-2419 (2017), 査読有  
DOI: 10.1093/mnras/stw2924
- (8) M. Oguri, “Measuring the distance-redshift relation with the cross-correlation of gravitational wave standard sirens and galaxies”, *Physical Review D*, 93, 083511 (2016), 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevD.93.083511
- (9) Tamura, Y., M. Oguri, D. Iono, B. Hatsukade, Y. Matsuda, and M. Hayashi, “High-Resolution ALMA Observations of SDP.81. I. The Innermost Mass Profile of the Lensing Elliptical Galaxy Probed by 30 Milli-Arcsecond Images”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 67, 72 (2015), 査読有  
DOI: 10.1093/pasj/psv040
- (10) S. Miyazaki, M. Oguri, 他 “Properties of Weak Lensing Clusters Detected on Hyper Suprime-Cam’s 2.3 deg<sup>2</sup> Field”, *The Astrophysical Journal*, 807, 22 (2015), 査読有  
DOI: 10.1088/0004-637X/807/1/22
- (11) M. Oguri and Y.-T. Lin,

“Inferring Host Dark Matter Halo Masses of Individual Galaxies from Neighboring Galaxy Counts”, The Astrophysical Journal, 807, 22 (2015), 査読有  
DOI: 10.1088/0004-637X/801/2/94

- (12) M. Oguri, “A cluster finding algorithm based on the multiband identification of red sequence galaxies”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 444, 147-161 (2014), 査読有  
DOI: 10.1093/mnras/stu1446

[学会発表] (計 18 件)

- (1) M. Oguri, “Ultra high magnification microlensing”, PACIFIC 2018 symposium (招待講演), 北海道, 2018 年
- (2) 大栗真宗, “超高増光率重力マイクロレンズ”, 宇宙観測と地上実験から探るダークマター研究の現状と展望 (招待講演), 金沢, 2017 年
- (3) M. Oguri, “Clusters of galaxies in Subaru Hyper Suprime-Cam survey”, Galaxy Evolution Across Time (招待講演), Paris, France, 2017 年
- (4) 大栗真宗, “銀河団の弱重力レンズ”, 秋の学校「理論と観測から迫るダークマターの招待とその分布」(招待講演), 国立天文台, 東京, 2016 年
- (5) M. Oguri, “Clusters of galaxies in Subaru Hyper Suprime-Cam survey”, The 7<sup>th</sup> KIAS workshop on Cosmology and Structure Formation (招待講演), Seoul, Korea, 2016 年
- (6) M. Oguri, “Gravitational wave standard sirens”, Astronomical Distance Determination in the Space Age (招待講演), Beijing, China, 2016 年
- (7) M. Oguri, “Cluster searchers with HSC”, Follow-up of wide-area X-ray surveys: Science, Facilities, Programs (招待講演), Ringberg, Germany, 2016 年
- (8) M. Oguri, “The image plane approach to cosmic telescopes”, The Frontier Fields: Transforming our Understanding of Cluster and Galaxy Evolution (招待講演), Honolulu, USA, 2015 年

- (9) M. Oguri, “Scatter and bias in cluster mass estimates”, Astroparticle View of Galaxy Clusters (招待講演), 広島大学, 2015 年

- (10) M. Oguri, “Weak lensing with SuMIRe HSC/PFS”, Dawn of New Cosmology: Opportunities and Challenges in CMB Polarization and Large Scale Structure (招待講演), Taipei, Taiwan, 2014 年

[その他]

- (1) プレスリリース: これまででもっとも遠方の単独の星の観測 (<http://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/info/5802/>)
- (2) プレスリリース: かつてない広さと解像度のダークマター地図 ([https://www.subarutelescope.org/Pressrelease/2018/02/26/j\\_index.html](https://www.subarutelescope.org/Pressrelease/2018/02/26/j_index.html))
- (3) プレスリリース: 夜空に浮かぶ太古の目 ([https://www.subarutelescope.org/Pressrelease/2016/07/25/j\\_index.html](https://www.subarutelescope.org/Pressrelease/2016/07/25/j_index.html))
- (4) プレスリリース: すばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam が描き出した最初のダークマター地図 ([https://www.naoj.org/Pressrelease/2015/07/01/j\\_index.html](https://www.naoj.org/Pressrelease/2015/07/01/j_index.html))
- (5) プレスリリース: 視力 13,000 を達成! アルマ望遠鏡と重力レンズ望遠鏡のかけ合わせでモンスター銀河の真の姿をとらえることに成功 (<http://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2015/29.html>)

## 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