

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24740160

研究課題名(和文) 銀河分光と重力レンズのシナジー解析による宇宙論

研究課題名(英文) Synergy analysis of galaxy imaging and redshift surveys

研究代表者

日影 千秋 (Hikage, Chiaki)

名古屋大学・基礎理論研究センター・特任助教

研究者番号：00623555

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：将来の大規模銀河サーベイを用いて精密宇宙論解析を展開する上で、銀河ダークマター関係の不定性、特に、銀河の乱雑運動に起因する非線形な赤方偏移変形による系統誤差が大きな障害である。本研究では、銀河分光サーベイに重力レンズ情報を組み合わせることで、銀河ダークマター関係の不定性を取り除き、宇宙の3次元質量分布情報を引き出す新たな解析手法を構築した。重力レンズ情報を組み合わせることで、重力模型を識別する上で重要な構造成長率の測定精度が2倍近く向上することがわかった。また、銀河パワースペクトルを多重極展開することで非線形赤方偏移変形の影響を取り除く新しい手法を構築したことは、当初の予想を上回る成果である。

研究成果の概要(英文)：The challenge in performing the precise cosmology analysis using galaxy redshift surveys is the uncertainty in the relationship between galaxies and dark matter distribution, in particular, the nonlinear redshift-space distortion due to the random motion of galaxies. I worked on the synergy of galaxy redshift survey and imaging survey and developed a novel method to make full use of the 3D matter information of the universe. I found that combining the gravitational lensing information with galaxy redshift surveys improve the accuracy of growth rate measurement nearly twice than the galaxy redshift survey only. I also succeed in developing another novel method to remove the uncertainty of nonlinear redshift-space distortion, i.e., Fingers-of-God effect, using high multipole components of galaxy power spectrum such as hexadecapole and tetra-hexadecapole, which has not been used in previous analysis. This work is beyond the original expectations.

研究分野：宇宙論

キーワード：宇宙論 宇宙大規模構造 ダークエネルギー

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 一般相対論は20世紀の物理学の基盤であり、宇宙の進化や重力レンズ現象などを通して、検証が行われてきた。しかし、観測精度の向上とともに、一般相対論では説明が困難な観測、実験結果が現れてきた。その一つは最近になって宇宙膨張が加速してきたことを示す発見である (Riess 1998, AJ 116, 1009, Perlmutter 1999, ApJ 517, 565)。宇宙の加速膨張を説明するために、ダークエネルギーという謎の成分の存在や、一般相対論に基づく重力理論が大スケールで破綻していることを示唆しており、加速膨張の起源を明らかにすることは現代物理学の最も重要な目標である。

(2) また、基本素粒子であるニュートリノの質量や世代数などの基本的性質は未だはっきりしていない。ニュートリノの正体を明らかにする、特に質量を決定することは急務となっている。異なる種類のニュートリノの質量差は、ニュートリノ振動の地上実験から高精度で測定できるが、ニュートリノの質量自体の決定精度は弱かった。

(3) 宇宙の加速膨張の要因、ニュートリノ質量を明らかにする方法として、宇宙大構造の進化を調べる方法がある。まず、宇宙の構造の時間成長率は、加速膨張の要因がダークエネルギーか、重力法則の修正によるものかで異なるため、成長率の測定から、宇宙の加速膨張の要因を絞り込むことができる。また、宇宙の密度ゆらぎは、ニュートリノの総質量に応じて変わるので、密度ゆらぎのパワースペクトルなどを詳細に解析することで、ニュートリノの絶対質量を測定することができる。

(4) 宇宙の加速膨張の要因、ニュートリノ質量を明らかにするため、世界各国で、銀河赤方偏移サーベイ、重力レンズサーベイが世界各国で進行している。すばる望遠鏡を用いた銀河撮像・分光計画「SuMIRe」もその一つであり、日本のグループが主導的な立場をとっている。

銀河分光サーベイは、銀河の赤方偏移情報から距離を推定することで、宇宙大構造の3次元空間情報を得ることができる。しかし、銀河はダークマターの密度の濃い場所を選択的に形成されるため、観測した銀河分布と、ダークマター分布とは一致せず、その違いは「銀河バイアス」とよばれる。また、銀河固有の運動によって、赤方偏移を通して測った銀河までの距離が分からないことで、銀河の空間分布に歪みが生じる。これは「赤方偏移変形」とよばれ、銀河バイアスとともに精密な宇宙論解析を行う上で大きな系統誤差の要因となっている。

重力レンズサーベイは、宇宙の質量分布を直接探ることができるユニークな指標である。重力レンズ効果は、遠方銀河の形の歪みを通

して調べるが、それは視線方向に積算した情報のため、宇宙大構造の3次元情報を完全に取り出すことはできない。つまり、銀河分光サーベイ、重力レンズ観測の一方のみの解析では、宇宙大構造を調べる上で限界があった。

## 2. 研究の目的

今回、銀河分光サーベイと重力レンズサーベイを組み合わせたシナジー解析を行い、個々の観測の限界を越えた新たな宇宙論解析を行う。重力レンズ情報を使って、銀河周りの質量分布を調べ、銀河分光サーベイで問題となっていた銀河バイアスや非線形な赤方偏移変形「Fingers-of-God」(以下 FoG)の不定性を取り除く方法を構築する。特に、非線形な赤方偏移変形の影響を取り除く方法はこれまでほとんど開発されておらず、銀河サーベイを用いた宇宙論解析における最も大きな問題の一つである。

重力レンズ情報を組み合わせたシナジー解析によって、FoGの不定性を取り除き、現状の銀河サンプルから宇宙の質量分布に関する3次元情報を最大限に引き出し、暗黒エネルギーの性質や、ニュートリノ質量の決定精度の向上を目指す。すばる望遠鏡を使った銀河撮像・分光サーベイ計画「SuMIRe」へ応用を目指し、銀河赤方偏移サーベイと重力レンズサーベイを統合した新たな宇宙大構造の解析方法を目指す。

## 3. 研究の方法

(1) 銀河の空間分布情報から宇宙の質量分布を調べ、精密な宇宙論解析を行ううえで、銀河の乱雑な運動による非線形な赤方偏移変形「Fingers-of-God」(以下FoG)の不定性が大きな課題である。FoG効果は、ダークマターハローの中心からずれたサテライト銀河がハロー内部を運動することによって生じる。そこで、FoGの要因となるサテライト銀河の割合を、重力レンズ情報を使って調べる方法を構築する。

(2) スローンデジタルスカイサーベイ (SDSS) における明るく赤い銀河 (LRG) サンプルは宇宙論解析にしばしば用いられる。今回、LRG 周りで背景銀河の形状の系統的な歪みの大きさを調べることで、LRGがハロー中心からどの程度ずれているかを調べ、FoGの大きさの推定に用いる。

(3) 銀河団サンプルを使い、銀河の動径分布、速度分布を調べ、LRGが中心銀河である割合を調べる。(2)の重力レンズ情報の解析結果と比較し、矛盾がないかを調べる

(4) SuMIReプロジェクトなど、将来の大規模銀河サーベイに応用するために、FoGの不定性を補正し、銀河クラスタリングの情報を余すところなく活用するための手法を構築する。

#### 4. 研究成果

え上記の研究方法に基づき、銀河分布を用いた宇宙論解析において大きな課題であった FoG 効果の不定性を取り除く手法を確立した。以下に研究成果の概要を述べる

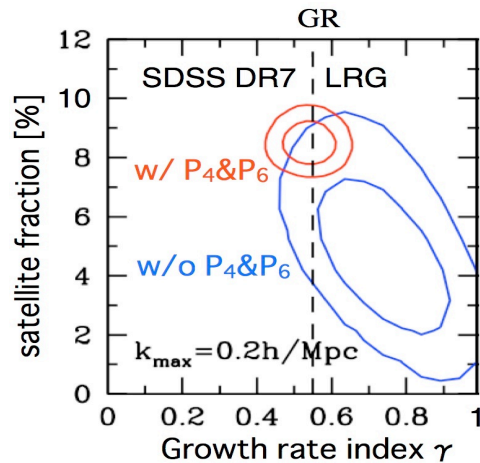
(1) 非線形な赤方偏移変形「FoG 効果」を引き起こすサテライト銀河の周りでは、重力レンズのシグナルが減衰することを利用し、銀河サンプル中に含まれるサテライト銀河の割合を推定する方法を構築した。重力レンズ情報を組み合わせて FoG 効果の不定性を減らすことで、重力理論検証の指標となる構造成長率の決定精度が2倍以上向上することを示した。

(2) SDSS の Luminous Red Galaxy (LRG) サンプルを用いて銀河・銀河レンズを測定した結果、LRG のおよそ 20%が、ハロー中心から外れたオフセット(サテライト)銀河であることを明らかにした。その結果に基づき、これまで分からなかった LRG の FoG 効果の大きさを推定することに成功した。

(3) redMaPPer の銀河団カタログを用いて明るく赤い銀河(LRG)が中心銀河である確率を調べた。その結果、各銀河団で、最も明るい LRG が中心銀河である確率は、70-80%程度であることがわかった。この結果は、研究成果(2)で述べた重力レンズによる結果と無矛盾である。今回、2つの異なる方法から、LRG のダークマターハロー中心からのずれの割合を調べ、一致する結果が得られたことは、本結果の信頼性を高めるものである

(4) FoG の影響を取り除く新しい手法として、銀河パワースペクトルの多重極成分を用いる新しい方法を構築した。これまで、重力理論の検証にとって重要な構造成長率の測定では、四重極成分( $P_2$ )の情報が使われていた。しかし、四重極成分には、FoG 効果の影響が入り込むため、構造成長率を精密に測定できず、重力理論の精密な検証が困難であった。

今回、四重極より上の多重極成分  $P_4$  や  $P_6$  を使って、FoG 効果の不定性を解消する方法を構築した。多重極成分は、主に FoG 効果から生じるため、組み合わせた解析から、重力成長と FoG 効果による赤方偏移変形の縮退を解くことができる。今回、SDSS LRG サンプルに応用し、FoG 効果によって生じる十六重極(1=4)以上の多重極成分を実際に初めて検出した。また、多重極成分(1=4, 6)の情報を加える(右図赤線)ことで、構造成長率指標  $\gamma$  との決定精度が、2-3 倍向上した。本結果は、当初の予想を上回る成果である。



#### 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 8 件)

1. 日影千秋、高田昌広、David Spergel  
“Using Galaxy-Galaxy Weak Lensing Measurements to Correct Finger-of-God”  
MNRAS<sup>(注1)</sup> 419 巻 4 号(2012) 3457-3481 頁
2. 日影千秋、Rachel Mandelbaum, 高田昌広、David Spergel, “Where are the Luminous Red Galaxies (LRGs)? Using correlation measurements and lensing to relate LRGs to dark matter halos”  
MNRAS 435 巻 3 号(2013) 2345-2370 頁
3. 正木彰伍, 日影千秋, 高田昌広, David Spergel, 杉山直, “Understanding the nature of luminous red galaxies (LRGs): Connecting LRGs to central and satellite subhalos”  
MNRAS 433 巻 4 号 (2013), 3506-3522 頁
4. 日影千秋, 山本一博, Impacts of satellite galaxies on the redshift-space distortions, JCAP<sup>(注2)</sup> 2013 巻 8 号 19
5. 浅羽信介, 日影千秋, 小山和哉, Gong-Bo Zhao, Alireza Hojjati, Levon Pogossian, “Principal Component Analysis of Modified Gravity using Weak Lensing and Peculiar Velocity Measurements”  
JCAP 2013 巻 8 号 29
6. 日影千秋, “Constraining Halo Occupation Distribution and Cosmic Growth Rate using Multipole Power Spectrum”  
MNRAS Letter 441 巻 1 号(2014) 21-25 頁
7. 星野華子, Alexie Leauthaud, Claire Lackner, 日影千秋, Eduardo Rozo, Eli Rykoff, Rachel Mandelbaum, Surhud More, Anupreeta More, 斎藤俊, Benedetta Vulcani, “Luminous Red Galaxies in Clusters: Central Occupation, Spatial Distributions and Miscentering” MNRAS accepted

8. 日影千秋, 「銀河分布の非等方性から探る宇宙の構造形成: カイザー vs 神の指」天文月報解説記事「EUREKA」107 巻 3 号 (2014 年 3 月) 163-171 頁

(注<sup>1</sup>)MNRAS: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society の略

(注<sup>2</sup>)JCAP: Journal of Cosmology and Astroparticle Physics の略

[学会発表] (計 15 件)

◆招待講演 (国際会議)

1. 日影千秋 “Impacts of satellite galaxies on the redshift-space distortion studies” The 6th KIAS workshop on Cosmology and Structure Formation 韓国高等研究院, 2014 年 11 月 4 日
2. 日影千秋 “Clustering of galaxies” Workshop on Synergy of HSC and Hiroshima CORE-U projects 広島大学 2014 年 8 月 28 日
3. 日影千秋 “Constraining HOD and cosmic growth rate from multipole power spectra” Workshop on cosmology with redshift-space galaxy clustering, 京都大学基礎物理学研究所, 2014 年 2 月 25 日
4. 日影千秋 “Unveiling cosmic structure formation with galaxy imaging and redshift surveys” KMI International Symposium (KMI2013), 名古屋大学 2013 年 12 月 12 日
5. 日影千秋 “Primordial Non-Gaussianity from Isocurvature Perturbations” Workshop on “The CMB and theories of the primordial universe” 京都大学基礎物理学研究所, 2013 年 8 月 30 日
6. 日影千秋 “Synergy of galaxy imaging and redshift surveys” グローバル COE 会議 岐阜都ホテル, 2013 年 3 月 8 日

◆招待講演 (国内会議)

7. 日影千秋 “CMB 観測からの初期ゆらぎの非ガウス性” 日本物理学会, 宇宙線・宇宙物理領域シンポジウム企画セッション (主題: 宇宙密度揺らぎの非ガウス性), 広島大学, 2013 年 3 月 27 日
8. 日影千秋 “見えてきた宇宙大構造の進化” 天文・天体物理若手夏の学校, 福井県東尋坊温泉三国観光ホテル, 2012 年 8 月 2 日

◆一般口頭講演 (国際会議)

9. 日影千秋 “Impacts of satellite galaxies on the redshift-space distortion analysis” The 19th International symposium on Particles, Strings and Cosmology (PASCOS 2013) 国立台湾大学 2014 年 10 月 7 日
10. 日影千秋 “Galaxy-galaxy weak lensing as a tool to correct Finger-of-God” ESO workshop on “Science from next generation imaging and spectroscopic surveys” ヨー

ロッパ南天天文台, 2012 年 10 月 18 日

11. 日影千秋 “Galaxy-galaxy weak lensing as a tool to correct Finger-of-God” DENET conference, パリ天体物理学研究所, 2011 年 10 月 26 日

◆一般口頭講演 (国内会議)

12. 日影千秋 “銀河分布の赤方偏移変形を用いた宇宙大構造の成長率と銀河速度分散の制限” 日本天文学会秋季年会 山形大学, 2014 年 9 月 13 日
13. 日影千秋 “Impacts of satellite galaxies on the redshift-space distortions” 第 2 回観測的宇宙論ワークショップ 国立天文台, 2013 年 12 月 4-6 日
14. 日影千秋 “Using lensing and correlation measurements to correct the Finger-of-God” 日本天文学会春季年会 埼玉大学, 2013 年 3 月 23 日
15. 日影千秋 “Where are luminous red galaxies? Using lensing and correlation measurements to correct Finger-of-God” 観測的宇宙論ワークショップ 国立天文台, 2012 年 11 月 27-29 日

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]  
なし

[その他]  
ホームページ  
<http://www2.kmi.nagoya-u.ac.jp/~hikage/>

6. 研究組織

- (1)研究代表者  
日影 千秋 (HIKAGE, Chiaki)  
名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構  
研究者番号: 00623555

- (2)研究分担者 なし

- (3)連携研究者 なし