

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2014～2015

課題番号：26887012

研究課題名(和文) 銀河サーベイにおける赤方偏移変形効果の精密モデルと重力理論の検証

研究課題名(英文) Precise modeling of redshift-space distortions in galaxy surveys and cosmological test on gravity theories

研究代表者

奥村 哲平 (Okumura, Teppei)

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任研究員

研究者番号：70402427

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙の加速膨張の性質を理解するために、銀河サーベイを用いた理論的及び観測的研究を行った。理論的研究においては、将来の大規模サーベイから暗黒エネルギーの性質がパーセントレベルで決定されることを念頭におき、宇宙論的摂動論による解析的手法と、ハローモデルと呼ばれる準解析的手法を組み合わせ、観測量である銀河パワースペクトルを精密に予言できるモデルを構築した。観測的研究においては、国際プロジェクトSubaru FastSound surveyの宇宙論解析を主導し、100億光年をこえる遠方における重力理論の検証を行い、このような遠方宇宙においても相対性理論の予言と一致することを世界で初めて明らかにした。

研究成果の概要(英文)：I have performed theoretical and observational studies using galaxy surveys to understand properties of the cosmic acceleration. On theoretical side, considering the fact that future large surveys can determine the dark energy properties with percent accuracy, I have developed a theoretical model which accurately predicts the galaxy power spectrum by combining the cosmological perturbation theory and the empirical halo model. On the observational side, I have led the cosmological analysis of the international project called the Subaru FastSound Galaxy Survey, and I performed a test on gravity theory at the distant universe 10 billion years away. For the first time in the world, I have found that the gravity law is consistent with Einstein's general relativity at such distant universe.

研究分野：観測的宇宙論

キーワード：宇宙大規模構造 暗黒エネルギー 重力理論の検証 銀河サーベイ 赤方偏移変形

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙膨張を加速させる暗黒エネルギーの正体は何か？万有斥力をもつ宇宙定数なのか？あるいは宇宙を支配する重力理論が大スケールで一般相対性理論からずれていることによる見かけのものなのか？これは天文学だけでなく、基礎物理学における共通の重要な問題であるが、その解明のためには、地道な天文学的観測を続けていく以外に手がかりがなく、世界中で大規模な銀河サーベイが進行中である。膨張宇宙において銀河までの距離を測るには赤方偏移を用いるため、距離の測定には銀河自身の速度による変位が加わる。この効果は赤方偏移変形と呼ばれ、3次元銀河地図において視線方向に非等方性を生み出す。この赤方偏移変形を測定することによって、宇宙の密度場に加えて速度場の情報を得る事ができる (Kaiser 1987, MNRAS, 227,1)。速度場は重力によって引き起こされるため、赤方偏移変形は暗黒エネルギー及び修正重力理論のテストに最適なプローブである。当時、最大の銀河サーベイであったスローン・デジタル・スカイ・サーベイ (SDSS) を用い、赤方偏移変形とバリオン音響振動を解析することにより、暗黒エネルギーの状態方程式が $\sim 10\%$ のレベルで制限されていた。より大規模なサーベイを用いることにより、加速膨張の起源に迫ることができると期待されている。

しかし、現実はその単純ではない。質の高い観測データを用いて暗黒エネルギーや変更重力理論がパーセントレベルで制限できるということは、それを理解する理論モデルに対しても同レベルの精度が求められる。そうでなければ、制限した宇宙モデルに対して間違った解釈がなされてしまうのである。例えば、宇宙初期は宇宙の密度のゆらぎが小さく、パワースペクトルはゆらぎの線形摂動論という単純な物理でうまく記述できる。しかし、現在の時間に近づくと、非線形重力進化が進み、理論的な予言が難しくなる。すなわち、質の良いデータがあってもそれを説明する理論の予言が困難なのである。申請者の数値シミュレーションを用いた先行研究 (Okumura & Jing, 2011, ApJ)において、「暗黒物質は密度の高い場所で暗黒物質ハロー (以後、ハロー) を形成し、銀河はハローの中で形成されることが知られているが、(a) 重いハローと軽いハローの中に存在する銀河では全くことなる赤方偏移変形の振る舞いを示し、(b) 相関関数とパワースペクトルでも結果が異なる」ことを明らかにした。また、申請者の Uros Seljak 氏との一連のシリーズ論文において、銀河サーベイの理論に関する研究を行い、暗黒物質とハローの赤方偏移変形の非線形モデルを構築することに成功した。その過程において、銀河パワースペクトルの理論研究における最も難しい点は、「我々が観測できるのは暗黒物質ではなく銀河の3次元地図だ」という事実であり、ハロ

ーの運動はバルク運動で記述できるが、その内部の銀河の運動は完全に非線形であるビリアル運動をしている」ことを指摘した。この点をクリアにすることが、宇宙大規模構造を精密宇宙論に用いることができるかのカギとなる。

## 2. 研究の目的

(1) ハローの赤方偏移変形のモデルを用いて、銀河の赤方偏移変形を理解するには、以下の2通りの方法が考えられる。(A) 銀河とハローの関係を経験的な関数で理論モデルに取り入れ、観測と直接比較する。(B) 観測された銀河分布から、ハローを同定してその分布を再構築し、我々が既に持っているハローの理論モデルを適用する。これらの方法は互いに相補的で、どちらも利点と欠点がある。申請者はこの両方の手法の開発に取りかかる。

宇宙論のコミュニティの共通認識では、現在、観測された密度パワースペクトルは大まかに波数  $k \sim 0.1h/\text{Mpc}$  まで理論的に再現できると考えられている。申請者は、上に挙げた2通りの方法で、 $k \sim 0.2h/\text{Mpc}$ 、すなわちこれまでの2倍小スケールまで適用範囲を延ばすことを目標としている。密度場は3次元であるため、引き出すことのできる宇宙論的情報は  $2^3=8$  倍をとる。開発した手法は  $N$  体シミュレーションを使って慎重にテストする必要がある。最終的な目標は、SDSS 第3期の、Baryon Oscillation Spectroscopic Survey (BOSS) CMASS 銀河データに適用し、修正重力理論に対してこれまでにない、正確かつ精密な制限を与えることである。

(2) 上述の1. で述べたように、SDSS をはじめとした銀河サーベイによって、加速膨張の性質に様々な制限がついている。しかし、遠方の観測はより困難であるため、これまでの研究は赤方偏移1以下の比較的近傍宇宙に限られてきた。異なる暗黒エネルギーあるいは重力理論モデルの元では、銀河のクラスターリングは異なって進化するため、広い赤方偏移を観測することが重要である。そのため、赤方偏移が1を超える遠方宇宙のサーベイが今後重要となる。

## 3. 研究の方法

(1) 上述の2.(1)で述べた通り、赤方偏移変形効果の理論モデルを、2通りの方法(A, B)で行う。まず(A)については、申請者と Seljak 氏が中心となって開発した、「位相空間分布関数法」という新しい理論モデルを用いる。これは、銀河分布(空間3次元)とその速度場(運動量3次元)を6次元の位相空間で同時に扱うというこれまでにない新しい手法である。先行研究において、この新しい方法でハローのクラスターリングを理論的に予言することに成功したが、観測量は銀河である。銀河とハローの違いは、ハロー中心から離れて存在する銀河(衛星銀河)。衛星銀河は、ハロー内でビ

リアル運動をするため、中心でハローとともに運動する銀河(中心銀河)とは全く異なる振る舞いをします。このビリアル運動は完全に非線形の運動であるため、解析的な摂動論的手法を用いることができない。そこで、本研究では、銀河のクラスターリングを、大スケールでは摂動論による解析的手法を用い、小スケールではビリアル定理に基づく経験的な関数形でパラメトライズし、それらを組み合わせるといった手法の開発を行う。

一方、(B)の研究については、上述した銀河クラスターリングのモデリングの際の、衛星銀河の問題を回避するために、異なるアイデアを採用する。すなわち、観測された衛星銀河のクラスターリングを理論的にモデリングしようとするのではなく、観測された銀河分布から衛星銀河を取り除くことを考える。これは、アイデア自体は簡単であるが、観測される銀河の3次元位置は、赤方偏移変形によって視線方向にランダムにシフトするため、非常に困難となる。そこで、赤方偏移変形によって間違っ同定されて取り除かれた衛星銀河のクラスターリングへの影響は、ウィンドウ関数によって容易にモデル化できることを行う。すなわち、観測した銀河分布からハローのクラスターリングを構築し、(銀河に比べて容易である)ハローの理論モデルと比較することによってダークエネルギーの情報を引き出せるということになる。

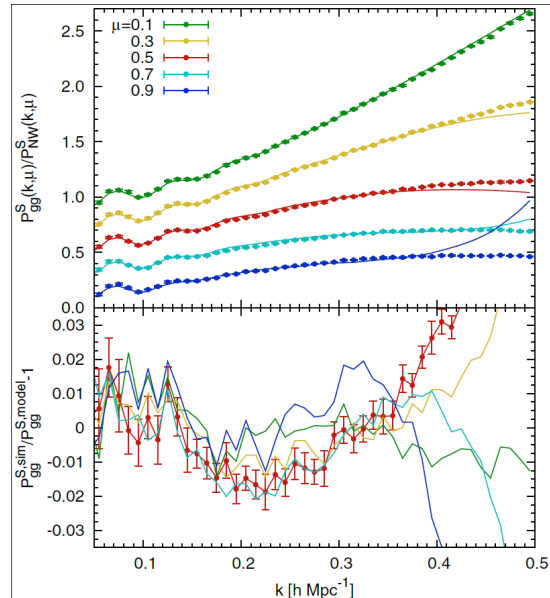
(2) 遠方宇宙における加速膨張の検証については、日本が主導する銀河サーベイの国際プロジェクト、FastSound サーベイを用いる。これは、すばる望遠鏡に取り付けられたFMOS という分光器を用い、赤外線領域で銀河サーベイを行うというユニークなサーベイである。このサーベイによって得られる、 $1.2 < z < 1.5$  における銀河分布のクラスターリング解析を行い、一般相対性理論の検証を行う。

#### 4. 研究成果

(1) 3. (1) の(A)の方法について、まず銀河分布を、中心銀河と衛星銀河に分割し、それをハローモデルにおける1ハロー項と2ハロー項に分けることを行った。これは、中心銀河を、同じハロー内に衛星銀河が存在しないものと存在するものに分割し、衛星銀河を、同じハロー内に他の衛星銀河が存在しないものと存在するものの、合計4パターンに分割することに対応している。そして、それぞれの銀河サンプルに対して、パワースペクトルの理論モデリングを行った。具体的には、大スケールの、異なるハローに存在する銀河ペアに関しては摂動論による解析的手法を用い、小スケールのハロー内部のクラスターリングはビリアル定理に基づく経験的な関数形でパラメトライズし、それを組み合わせた。これにより、先行研究で得られていた理論モ

デルに比べ、2倍小さいスケールまで銀河クラスターリングを精密に予言することに成功した[次節5.の雑誌論文(2)]。銀河サーベイは3次元観測なので、従来に比べ $2^3=8$ 倍ものフリーモード(=宇宙論的情報)を正しく引き出せることに対応している。以下の図は、モデリングの結果を表している。上のパネルの点が、シミュレーションから計算した銀河パワースペクトルで、実線が我々のモデルである。モデルが正しければ、この2つが等しくなる。下のパネルは、我々のモデルのaccuracyである。 $k \sim 0.4 h/\text{Mpc}$ まで $\sim 3\%$ のレベルで正しく銀河のクラスターリングを計算できていることを表している。

この申請者の開発した銀河クラスターリングにおける理論モデルは、2016年現在世界最高レベルの精度を持っており、現行の最大の銀河サーベイからダークエネルギーを制限するために用いられている。この手法は強力で将来の大規模サーベイの解析に有用であるが、衛星銀河の非線形運動のempiricalな取り扱いについては不安が残る。



(2)次に、3. (1)の(B)の方法については、すでに述べたように、赤方偏移変形によって位置のシフトした銀河を取り込むために、シリンダーの形をしたハローファインダーのようなものを考える。シリンダーの非等方な形状の影響を取り入れるために、ウィンドウ関数と、ウィンドウ関数とパワースペクトルの畳み込み(convolution)で補正を行った。このフォーマリズムを適用し、観測した銀河分布からハローのクラスターリングを構築し、(銀河に比べて容易である)ハローの理論モデルと比較することによってダークエネルギーの情報を引き出せるということになる。

この手法の妥当性をテストするために、SDSS-III BOSS サーベイを似せたシミュレーションデータを作成し、解析を行った。その結果、上記の摂動論とビリアル定理を組み合わせたモデルと同程度の精度を達成でき

ることを発見した。本研究も、採用期間の2年間の間に完成させる予定であったが、残念ながら論文を完成させるには間に合わなかった。現在論文を執筆中であり、1ヶ月以内に投稿予定である。

(3) 我々は、FastSound サーベイで観測された輝線銀河の分光サンプルから赤方偏移空間の相関関数を測定した。その結果、視線方向に垂直方向と平行方向の距離で測った非当方相関関数と、その Multipole 成分の両方に、赤方偏移変形効果によるクリアな非当方性を検出した。従来サーベイによって、赤方偏移変形効果は  $z < 1$  の宇宙において研究されてきた。我々は、FastSound 銀河サンプルの解析によって、 $z \sim 1$  において密度ゆらぎの線形成長率  $f(z)\sigma_8(z)$  に初めての制限を与えた。得られた制限は  $0.482 \pm 0.116$  (68% C.L.) であり、一般相対性理論による予言  $f\sigma_8 \sim 0.392$  とコンシステントな結果となった。右図は、縦軸  $f\sigma_8$ 、横軸に赤方偏移を取っている。赤の丸い点が我々の制限で、一般相対性理論の予言は緑のバンドで表している[次節 5. の雑誌論文(1)]。

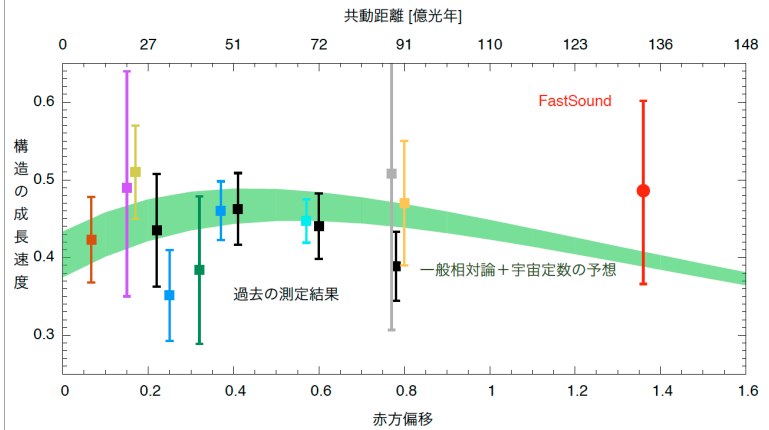
また、従来得られている  $z < 1$  での  $f\sigma_8$  の制限に、今回得られた FastSound サーベイのような高赤方偏移での制限を組み合わせることによって、WMAP や Planck 衛星のような宇宙背景放射の非当方性の観測とは独立に重力理論への制限を行うことができるというデモンストレーションを行った。

## 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 10 件)

- ① Okumura, T., Hikage, C., Totani, T., et al. “The Subaru FMOS galaxy redshift survey (FastSound). IV. New constraint on gravity theory from redshift space distortions at  $z \sim 1.4$ ”, PASJ, 査読有, 68 (2016) 38
- ② Okumura, T., Hand, N., Seljak, U., Vlah, Z., Desjacques, V. “Galaxy power spectrum in redshift space: combining perturbation theory with the halo model” Physical Review D, 査読有, 92 (2015) 103516
- ③ Song Y. -S., Taruya, A., Linder, E., Koyama, K., Sabiu, C. G., Zhao, G. -B., Bernardeau, F., Nishimichi, T., Okumura, T., “Consistent Modified Gravity Analysis of Anisotropic Galaxy Clustering Using BOSS DR11” Physical Review D, 査読有, 92 (2015) 043522



- ④ Saito, S., Baldauf, T., Vlah, Z., Seljak, U., Okumura, T., McDonald, P. “Understanding higher-order nonlocal halo bias at large scales by combining the power spectrum with the bispectrum” Physical Review D, 査読有, 90 (2014) 123522
- ⑤ Song, Y. -S., Sabiu, C. G., Okumura, T., Oh, M. Linder, E. V. “Cosmological Tests using Redshift Space Clustering in BOSS DR11” Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 査読有, 12 (2014) 005
- ⑥ Song, Y. -S., Okumura, T., Taruya, A. “Broadband Alcock-Paczynski test exploiting redshift distortions” Physical Review D, 査読有, 89 (2014) 103541
- ⑦ Okumura, T., Seljak, U., Vlah, Z., Desjacques, V. “Peculiar velocities in redshift space: formalism, N-body simulations and perturbation theory” Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 査読有, 05 (2014) 003
- ⑧ Blazek, J., Seljak, U., Vlah, Z., Okumura, T. “Geometric and dynamic distortions in anisotropic galaxy clustering” Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 査読有, 04 (2014) 001

[学会発表] (計 8 件)

- ① 奥村哲平, “The Subaru FMOS galaxy redshift survey (FastSound). New constraint on gravity theory from redshift space distortions at  $z \sim 1.4$ ” Subaru Users’ Meeting FY2015, 2016年1月19日, KKR HOTEI ATAMI (静岡県熱海市)
- ② 奥村哲平, “Reconstructing halo power spectra from redshift-space galaxy distribution” PFS Meeting, 2015年12月14日, マルセイユ(フラ

- ンス)
- ③ 奥村哲平, “銀河の赤方偏移変形効果のモデリング” 観測的宇宙論研究会, 2015年11月19日, 京都大学(京都府京都市)
  - ④ 奥村哲平, “Reconstructing halo power spectrum from redshift-space galaxy distribution” Theoretical and Observational Progress on Large-scale Structure of the Universe: MPA/ESO/MPE/Excellence Cluster Universe Joint Conference 2015, 2015年7月22日, ガーチング(ドイツ)
  - ⑤ 奥村哲平, “FastSound Survey:  $1.2 < z < 1.5$  における重力理論のテスト” 観測的宇宙論研究会, 2014年11月26日, 名古屋大学(愛知県名古屋市)
  - ⑥ 奥村哲平, “Modeling nonlinear power spectrum of galaxies in redshift space” Measuring and Modelling Redshift-Space Distortions in Galaxy Surveys, 2014年7月23日, セスト(イタリア)
  - ⑦ 奥村哲平, “Peculiar velocities in redshift space: formalism, N-body simulations and perturbation theory” The 10th Sino-German Workshop on Galaxy Formation and Cosmology, 2014年5月19日, 西安(中国)
  - ⑧ 奥村哲平, “Nonlinear velocity statistics and redshift-space distortions in peculiar velocity surveys” CosKASI Conference 2014, 2014年4月16日, デジョン(韓国)

〔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〕

ホームページ等

<http://member.ipmu.jp/teppey.okumura/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

奥村 哲平 (OKUMURA, Tepei)

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・  
特任研究員

研究者番号: 70402427