様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科研費
KAKENHI

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　元 年　 ６ 月 １１ 日現在

機関番号：６２６１６
研究種目：研究活動スタート支援
研究期間：2017～2018
課題番号：１７Ｈ０７３２５

研究課題名（和文）すばる望遠鏡で探る宇宙の構造形成過程への観測的制限

研究課題名（英文）Observational Constraint on the Structure Formation of the Universe Revealed by Subaru Telescope

研究代表者

石川　将吾（Ishikawa, Shogo）

国立天文台・天文シミュレーションプロジェクト・特任研究員

研究者番号：４０８０７３８５

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　1,800,000円

研究成果の概要（和文）：宇宙の大規模構造は量子論スケールの密度揺らぎが急激な宇宙膨張により成長したものと考えられているが、宇宙膨張を引き起こしたダークエネルギーの性質はほとんど明らかになっていない。またダークマターは宇宙の大規模構造の構成要素である銀河の形成と進化にとって重要な役割を果たす。本研究では、すばる望遠鏡により取得されたデータを用いて過去最大の大規模銀河サンプルを構築して銀河の詳細なクラスタリング解析を実行することにより、赤方偏移1.4（93億年前）までのダークマターと銀河の共進化の様子を明らかにし、さらにダークエネルギーの物理的性質に観測制限を与えることを目指した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
本研究は現在の宇宙の大部分を占めながらも正体不明である宇宙の暗黒成分に対してすばる望遠鏡による観測を通してその物理的性質を明らかにし、そこから銀河や宇宙の大規模構造の形成や進化を探るものである。これはすばる望遠鏡の高い集光力やHyper Suprime-Camによる広視野撮像能力を活用しなければ成し遂げることができない、世界で唯一本研究のみが達成可能な研究成果である。加えて、日本が誇るすばる望遠鏡により謎に包まれた宇宙の暗黒成分の正体に迫り、そして我々の住む宇宙がどのように形成されたのかを明らかにすることは、一般社会にとっても大変インパクトのある研究成果であると言える。

研究成果の概要（英文）：The large-scale structure of the Universe is thought to grow from density fluctuations with quantum scale by the rapid expansion of the Universe; however, properties of dark energy, which is thought to be the energy source of the expansion of the Universe, are rarely revealed. Another component of dark sector, dark matter, also plays an important role in galaxy formation and evolution. In this study, we reveal the co-evolution of galaxies and dark matter haloes and put observational constraints on dark energy by carrying out precise clustering analyses using the largest-ever galaxy catalogue obtained by Subaru Telescope Hyper Suprime-Cam.

研究分野：観測的宇宙論

キーワード：観測的宇宙論　ダークマター　ダークエネルギー　銀河のクラスタリング　バリオン音響振動　宇宙の大規模構造　すばる望遠鏡

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９、ＣＫ－１９（共通）

１．研究開始当初の背景

現在の宇宙は､その大部分がダークマターとダークエネルギーという正体や性質が不明な成分で構成されている。近年の数値シミュレーションや大規模宇宙サーベイにより、宇宙の大規模構造やその構成単位である銀河の形成や進化には宇宙の暗黒成分が重要な役割を果たすことが明らかとなっている。そのため、ダークマターやダークエネルギーの物理的性質を観測により制限することができれば、宇宙の構造形成について明らかにすることが可能となる。

まず、銀河はダークマターの塊（ダークマターハロー）の中で形成・進化することが知られているが、その共進化が時間とともにどのように進行するのかはよく分かっていない。ダークマターの密度揺らぎと観測される銀河を対応づけることができれば、密度揺らぎ進化から銀河進化の様子を明らかにすることができる。

また、構造形成モデルにより宇宙膨張がどのように進行したのかはすでに予言されている。しかしながら Ia 型超新星の観測を通してはじめて宇宙の加速膨張が明らかになったように､ダークエネルギーの物理的性質やそれが引き起こす宇宙膨張については不明な点が大きい。そのため、宇宙の膨張史や宇宙の大規模構造の形成過程を明らかにするためには、観測によりダークエネルギーの物理的性質に制限を与える必要がある。

２．研究の目的

本研究では､ダークマターとダークエネルギーという謎に包まれた宇宙の暗黒成分の観測を通して、宇宙の構造形成が宇宙年齢とともにどのように進行したのかを観測的に明らかにすることを目標としている。これは､I）宇宙の大規模構造の形成過程､および II）銀河進化の素過程、に対して、従来の研究よりも高精度かつより遠方宇宙に及ぶまで観測的制限を与えることで達成される。

３．研究の方法

本研究では、銀河同士の重力的な結びつきを表す「銀河のクラスタリング」を通して、ダークマターの密度揺らぎやダークエネルギーの物理的性質に迫る。まず「ダークエネルギーと冷たいダークマターによる宇宙モデル」では、銀河はダークマターハローの内部で形成されることが予言されている。密度揺らぎが大きい、すなわち重いダークマターハローに属する銀河ほど強い銀河のクラスタリングを示す。そのため銀河の物理的性質（星質量や赤方偏移）で銀河を分割してクラスタリングを調べることで観測された銀河とその背後のダークマター密度揺らぎを対応づけることが可能となり、ダークマターと銀河の共進化の様子を明らかにすることができる。

加えて、宇宙の晴れ上がりの際にバリオンの典型スケールが凍結された「バリオン音響振動」と呼ばれる現象を用いる。この凍結されたバリオンのスケールがおよそ 100 メガパーセクであり、銀河のクラスタリングにはこのスケールにおいて超過が見られることが知られている。すなわち､バリオン音響振動のピークはその時代における 100 メガパーセクのスケールに対応し、どの時代でも固有の距離を持つスケールの時間進化を追うことができれば、宇宙の膨張史を観測により直接捉えダークエネルギーの物理的性質に対して制限を与えることが可能となる。

これらの研究計画を遂行するためには､多数の銀河サンプルを選択して銀河のクラスタリングを精密に測定する必要がある。そこで本研究では、現在すばる望遠鏡で実施されている、超広視野主焦点撮像カメラ（Hyper Suprime-Cam; 以下、HSC）を用いた大規模かつ系統的な宇宙探査計画（以下、HSC サーベイ）のデータを用いて遂行する。HSC サーベイはすばる望遠鏡が誇る高い集光力と他の望遠鏡にはないユニークな広視野撮像装置である HSC による広い撮像性能を活かすことにより、過去の大規模サーベイと比較してより広く深い撮像データの取得に成功している。さらに 5 色の撮像データを利用することにより、銀河の星質量や赤方偏移といった物理量を推定した撮像赤方偏移カタログも提供されている。本研究では HSC サーベイによる撮像赤方偏移カタログを活用して過去最大の大規模銀河サンプルを構築し、銀河を物理パラメータで分割してクラスタリング解析を行い、ダークマターと銀河の共進化やダークエネルギーの物理的性質への観測制限を与えることを目指す。

４．研究成果

まずは HSC サーベイによる撮像赤方偏移カタログを利用して、赤方偏移 0.3 から 1.4 に存在する大規模銀河サンプルの構築を行った。本研究で得られた銀河サンプル数は 6,000,000 天体を超えており、本研究同様に広視野撮像サーベイのデータを用いて銀河のクラスタリングを測定した Dark Energy Survey の銀河サンプル数が 1,300,200 天体であることから、本研究の統計的優位性は明らかである。この過去最大の銀河サンプルを用いて極めて高い精度でクラスタリング解析を行い、ダークマターと銀河の共進化やバリオン音響振動の検出によるダークエネルギーの物理性質を探った。

[ダークマターと銀河の共進化]

銀河を星質量と赤方偏移で分割してクラスタリング解析を行うことにより､ダークマター密度揺らぎに対する銀河のバリオン物理依存性や赤方偏移進化を調べた。銀河の星質量が大きいほどクラスタリングが強い、すなわち密度揺らぎの大きな領域で銀河が成長していることが確認

された。ダークマターハロー内での銀河形成効率を表す「星・ダークマターハロー質量比」を計算したところ、どの時代でも 10^{12} M_{sun} (M_{sun} は太陽質量を表し、M_{sun}~10^{30} kg)程度の重さを持つダークマターハロー内で最も効率よく銀河が形成されていることを明らかにした。またダークマターハロー内で最も大きい中心銀河の周りに存在する衛星銀河は低質量銀河であっても赤方偏移１以下では銀河の総存在量の高々20%程度であり、一方で赤方偏移１よりも遠方ではほとんど存在していないことが判明した。これは衛星銀河が赤方偏移１以下において急速に形成されたことを示唆している。これらの成果を現在論文にまとめている。

[バリオン音響振動検出によるダークエネルギーへの観測制限]
撮像赤方偏移をもとに銀河サンプルを距離ごとに分割し、100 メガパーセクという宇宙論的スケールのクラスタリングを測定した。本研究では赤方偏移 0.8 から 1.1 におけるバリオン音響振動のシグナルを検出することに成功し、そのスケールは構造形成モデルによる理論予測と一致した。しかしながらより近傍や遠方ではバリオン音響振動のシグナルを有意に検出することができず、現時点では宇宙の膨張史からダークエネルギーに観測制限は与えられていない。
本研究は観測者から等距離にある銀河を多数集めることができるかが肝要であり、これはすなわち撮像赤方偏移の測定精度と HSC サーベイの探査面積に依存している。現在利用しているデータは 2016 年に HSC サーベイグループ内部に向けて公開されたデータであるが、今後最新の HSC サーベイのデータに切り替えて本研究を継続する。最新のデータでは探査面積が本研究で利用したデータの２倍以上となり、さらに撮像赤方偏移の精度も向上しているため、現時点で検出することができなかった赤方偏移においてもバリオン音響振動を検出し、宇宙の膨張史からダークエネルギーの物理的性質へ観測制限を与えることができると期待される。

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計７件）

(1) Uchiyama, Hisakazu; Kashikawa, Nobunari; Overzier, Roderik; Toshikawa, Jun; Onoue, Masafusa; Ishikawa, Shogo; Kubo, Mariko; Ito, Kei; Namiki, Shigeru; Liang, Yongming, “Suppression of Low-mass Galaxy Formation around Quasars at z~2-3”, 2019, The Astrophysical Journal, Volume 870, ID. 45, 14 pp., 10.3847/1538-4357/aaef7b, 査読あり
(2) Toshikawa, Jun; Uchiyama, Hisakazu; Kashikawa, Nobunari; Ouchi, Masami; Overzier, Roderik; Ono, Yoshiaki; Harikane, Yuichi; Ishikawa, Shogo; Kodama, Tadayuki; Matsuda, Yuichi; Lin, Yen-Ting; Onoue, Masafusa; Tanaka, Masayuki; Nagao, Tohru; Akiyama, Masayuki; Komiyama, Yutaka; Goto, Tomotsugu; Lee, Chien-Hsiu, “GOLDRUSH. III. A systematic search for protoclusters at z~4 based on the >100 deg^2 area”, 2018, Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 70, ID. S12, 10.1093/pasj/psx102, 査読あり
(3) Uchiyama, Hisakazu; Toshikawa, Jun; Kashikawa, Nobunari; Overzier, Roderik; Chiang, Yi-Kuan; Marinello, Murilo; Tanaka, Masayuki; Niino, Yuu; Ishikawa, Shogo; Onoue, Masafusa; Ichikawa, Kohei; Akiyama, Masayuki; Coupon, Jean; Harikane, Yuichi; Imanishi, Masatoshi; Kodama, Tadayuki; Komiyama, Yutaka; Lee, Chien-Hsiu; Lin, Yen-Ting; Miyazaki, Satoshi; Nagao, Tohru; Nishizawa, Atsushi J.; Ono, Yoshiaki; Ouchi, Masami; Wang, Shiang-Yu, “Luminous quasars do not live in the most overdense regions of galaxies at z~4”, 2018, Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 70, ID. S32, 10.1093/pasj/psx112, 査読あり
(4) Ishikawa, Shogo; Kashikawa, Nobunari; Toshikawa, Jun; Tanaka, Masayuki; Hamana, Takashi; Niino, Yuu; Ichikawa, Kohei; Uchiyama, Hisakazu, “The Galaxy-Halo Connection in High-Redshift Universe: Details and Evolution of Stellar-to-Halo Mass Ratios of Lyman Break Galaxies on CFHTLS Deep Fields”, 2017, The Astrophysical Journal, Volume 841, ID. 8, 14 pp., 10.3847/1538-4357/aa6d64, 査読あり
(5) Niino, Yuu; Aoki, Kentaro; Hashimoto, Tetsuya; Hattori, Takashi; Ishikawa, Shogo; Kashikawa, Nobunari; Kosugi, George; Onoue, Masafusa; Toshikawa, Jun; Yabe, Kiyoto, “The redshift-selected sample of long gamma-ray burst host galaxies: The overall metallicity distribution at z<0.4”, 2017, Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 69, ID. 27, 10.1093/pasj/psw133, 査読あり
(6) Malkan, Matthew A.; Cohen, Daniel P.; Maruyama, Miyoko; Kashikawa, Nobunari; Ly, Chun; Ishikawa, Shogo; Shimasaku, Kazuhiro; Hayashi, Masao; Motohara, Kentaro, ” Lyman-break Galaxies at z~3 in the Subaru Deep Field: Luminosity Function, Clustering, and [O III] Emission”, 2017, The Astrophysical Journal, Volume 850, ID. 5, 15 pp., 10.3847/1538-4357/aa9331, 査読あり
(7) Onoue, Masafusa; Kashikawa, Nobunari; Willott, Chris J.; Hibon, Pascale; Im, Myungshin; Furusawa, Hisanori; Harikane, Yuichi; Imanishi, Masatoshi; Ishikawa, Shogo; Kikuta, Satoshi; Matsuoka, Yoshiki; Nagao, Tohru; Niino, Yuu; Ono, Yoshiaki;

Ouchi, Masami; Tanaka, Masayuki; Tang, Ji-Jia; Toshikawa, Jun; Uchiyama, Hisakazu, “Minor Contribution of Quasars to Ionizing Photon Budget at z~6: Update on Quasar Luminosity Function at the Faint End with Subaru/Suprime-Cam”, 2017, The Astrophysical Journal Letter, Volume 847, ID. L15, 6 pp., 10.3847/2041-8213/aa8cc6, 査読あり

〔学会発表〕（計３件）

(1) 石川将吾, “The Subaru HSC Low-redshift Galaxy Clustering with Photometric Redshift” , 日本天文学会春季年会、2019 年 3 月 14 日~17 日, 法政大学（東京都・小金井市）
(2) 石川将吾, “The Galaxy-Halo Connection Across Cosmic Hisotry”, 銀河進化研究会、2017 年 6 月 7 日~9 日, 大阪大学（大阪府・豊中市）
(3) 石川将吾, “The Galaxy-Halo Connection in High-redshift Universe”, 日本天文学会秋季年会、2017 年 9 月 11 日~13 日, 北海道大学（北海道・札幌市）

〔図書〕（計０件）
該当なし

〔産業財産権〕
○出願状況（計０件）
該当なし

○取得状況（計０件）
該当なし

〔その他〕
ホームページ等
該当なし

６．研究組織

(1)研究分担者
該当なし

(2)研究協力者
該当なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。