

氏 名 石川 将吾

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1901 号

学位授与の日付 平成29年3月24日

学位授与の要件 物理科学研究科 天文科学専攻  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 The Galaxy-Halo Connection Across Cosmic History

論文審査委員 主 査 教授 富阪 幸治  
准教授 早野 裕  
助教 松田 有一  
准教授 竹内 努 名古屋大学  
准教授 嶋作 一大 東京大学

論文の要旨

Summary (Abstract) of doctoral thesis contents

In this thesis, I discuss the relationship between observable galaxies and their underlying invisible host dark haloes over the global cosmic time at  $z=0-5$  based upon the precision clustering analyses. At each redshift, I collect a large number of galaxy samples enough to obtain high-quality two-point auto angular correlation function (ACF), which is a useful estimator to measure the strength of galaxy clustering quantitatively. Furthermore, the high accurate ACFs enable to carry out more precise clustering analyses using a "halo occupation distribution (HOD)" formalism, which characterizes the occupation number and the distribution of galaxies within the virialized dark haloes as a function of the dark halo mass.

At low-redshift ( $z < 1.4$ ) Universe, I collect numerous galaxy samples using the data of the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program (HSC SSP) Wide-layer. By using the photometric images with the extremely wide survey area taken by the Subaru/Hyper Suprime-Cam, I collect a large number of massive galaxies ( $M_{\star} > 10^{11} M_{\odot}$ ) up to  $z=1.4$  as well as the less massive galaxies down to the limiting magnitude of  $i < 25.5$  mag. Deep optical multi-wavelength images enable to apply a spectral energy distribution (SED) fitting technique to derive the stellar mass and the photometric redshift of each galaxy sample with high accuracies. I divide galaxy samples into subsamples according to their photometric redshift and the stellar mass in order to investigate the dependence of the clustering properties upon the physical properties by computing the ACFs of each subsample. Thanks to the numerous galaxy samples, derived ACFs show excellent S/N ratios, and the HOD model is able to reproduce the observed ACFs over all magnitude ranges. The mean halo masses of low- $z$  dark haloes increase monotonically with increasing the stellar-mass limits and the cosmic time, indicating the evidence that massive haloes host massive galaxies and the halo growth via halo mergers. Our observed stellar-to-halo mass ratios (SHMRs) are in good agreement with the theoretical model, although the slope at high-mass end shows a deviation from the model prediction.

The epoch at  $z \sim 2$ , known as the "cosmic noon", is important era to study formation and evolution of galaxy; however, it has been very difficult to construct a large number of galaxy samples, which is essential to carry out the precision clustering analyses. By combining our original data with publicly available data, I apply BzK/gzK selection to the wide-field imaging data over  $5.2 \text{ deg}^2$ , which is the largest-ever survey area of the BzK/gzK study. I select 41,112 sgzK galaxies down to  $K_{AB} < 23.0$ . The ACFs based upon the largest sgzK sample with high quality enable to perform the HOD analysis. The mean halo mass and the HOD mass parameters are found to increase monotonically with increasing K-band magnitude, suggesting that

(別紙様式 2)  
(Separate Form 2)

more luminous sgzK galaxies reside in more massive dark haloes. Following the dark halo mass evolution using the extended Press-Schechter formalism and the number evolution of satellite galaxies in a dark halo, I find that faint Lyman break galaxies at  $z \sim 4$  could evolve into the faintest sgzK galaxies ( $22.0 < K_{AB} < 23.0$ ) at  $z \sim 2$  and into the Milky-Way-like galaxies or elliptical galaxies in the local Universe, whereas the most luminous sgzK galaxies ( $18.0 < K_{AB} < 21.0$ ) could evolve into the most massive systems in the local Universe. In addition, the SHMRs of the sgzK galaxies are found to be consistent with the theoretical prediction, as well as the previous observational results at  $z \sim 2$ .

At high-redshift ( $z > 3$ ) Universe, I carry out the HOD analysis using the dropout galaxy samples at  $z \sim 3, 4, \text{ and } 5$  using the Canada-France-Hawaii Telescope Legacy Survey (CFHTLS) Deep Field. Deep- and wide-field images of the CFHTLS Deep Survey enable to obtain sufficiently accurate ACFs to apply the HOD analysis. The mean dark halo masses,  $\langle M_h \rangle = 10^{11.7-12.8} h^{-1} M_\odot$ , is found to increase with the stellar-mass limit. The threshold dark halo mass to possess a central galaxy within dark haloes,  $M_{\min}$ , show almost identical behavior to their stellar mass, compared to low- $z$  with the same stellar-mass limit, whereas the threshold dark halo mass to possess one satellite galaxy,  $M_1$ , show systematically higher values at  $z = 3-5$  than those of low- $z$  over the entire stellar-mass range. The satellite fractions, which represent the percentages of the satellite galaxy with respect to the total samples, are found to be significantly small compared to  $z \sim 2$ , indicating the drastically increase of satellite galaxies from  $z = 3-2$ . Along with the high  $M_1$  values and the low satellite fractions of high- $z$  galaxies, satellite galaxies form inefficiently within dark haloes at high- $z$ . Assuming the main-sequence of star-forming galaxies, I compute the SHMRs, which is found to agree with those derived using the SED fitting method. The observed SHMRs are highly consistent with the theoretical predictions based on the abundance-matching method within  $1\sigma$  confidence intervals. The pivot halo mass,  $M_{\text{pivot}}$ , which is the mass at the most efficient star-formation in galaxies, is, for the first time, found to increase with cosmic time at  $z > 3$ , and the SHMRs at  $M_{\text{pivot}}$  show little evolution, indicating that mass growth rates of stellar components and dark haloes are comparable at  $3 < z < 5$ .

From the precision clustering/HOD analyses, I firstly achieve to trace the redshift evolution of  $M_{\text{pivot}}$  across cosmic history by observations. The evolution of  $M_{\text{pivot}}$  is follows the theoretical prediction:  $M_{\text{pivot}}$  increases with decreasing the redshift at  $z = 3-5$  and has a peak at  $z \sim 2$ , which is known as the highest star-formation era, and then decrease the star-formation efficiency with increasing the cosmic time at  $z = 2-0$ . This result of the redshift evolution of star-formation efficiencies is consistent with the theoretical models as well as the observational results. Moreover, we show, for the first time observationally, the dark halo mass with the most efficient

(別紙様式 2)  
(Separate Form 2)

star-formation activity is  $M_h \sim 10^{12} M_\odot$  over cosmic time.

Summary of the results of the doctoral thesis screening

銀河は宇宙における重要な基本構成要素であり、銀河の広視野光学赤外サーベイ観測からその形成過程を探ることは現代天文学の重要な課題である。本研究は、赤方偏移別に3つの銀河サーベイを組み合わせることによって、 $z=5$  (宇宙年齢 12 億年) から  $z=0$  (現在、同 138 億年) にいたる、銀河とそれを取り巻く暗黒物質ハローの関係を観測的、統計的にあきらかにしようとした研究である。

低赤方偏移 ( $z < 1.4$ ) に関しては、すばる望遠鏡超広視野カメラ (Hyper Suprime-Cam) 戦略枠プログラムによってカタログされた銀河に対して、広帯域フィルターによる画像から得られたスペクトルエネルギー分布を用いて測光的赤方偏移を測定し、サンプルを構築した。一方、中間赤方偏移 ( $z \sim 2$ ) サンプルは、いくつかのサーベイで公表済みのデータから銀河の  $g$ 、 $z$ 、 $K$  バンドでの等級を得て、これから作られた2色図から  $z \sim 2$  で主に星形成中の銀河 (sgzK 銀河) を選択して構成した (一部、星形成を終えた銀河 (pgzK 銀河) を含む)。また、高赤方偏移 ( $z \sim 3-5$ ) の銀河サンプルは、カナダ・フランス・ハワイ望遠鏡戦略プログラムで観測された銀河から、銀河間物質の水素原子のライマン端吸収がスペクトル中で赤方偏移する性質を用いて選択される、 $u$ -、 $g$ -、 $r$ -ドロップアウト銀河を、それぞれ  $z \sim 3$ 、 $4$ 、 $5$  に存在する銀河としてサンプルを構築した。

本論文では、それぞれの赤方偏移ごとに、広視野にわたる多数の銀河から、銀河の空間2次元分布に対する自己角度相関関数を観測的に導出した。角度の大きなダイナミックレンジと統計的偏差の小さい自己相関関数を得ることに成功した。出願者は、これに Halo Occupation Distribution (HOD) 解析を行った。HOD とは (宇宙背景放射および重力の性質から、その揺らぎの成長が理論的に正確に予言可能な) 暗黒物質ハローと、その中で形成される中心銀河および衛星銀河の関係を (数個のパラメータを持つ) 比較的簡単な関係で仮定し、自己相関関数などの観測量を用いて、パラメータを推定する方法である。

銀河の星質量  $M_*$  と暗黒物質ハローの質量  $M_h$  の比 (Stellar-to-Halo Mass Ratio: SHMR) は、暗黒物質ハローの質量  $M_h \sim 10^{12} M_\odot$  程度で  $0.02 \sim 0.03$  の最大値をとり、より大きなハローに対しても、より小さなハローに対しても減少する。本論文ではこれがいずれの赤方偏移に対しても成り立つことを十分な精度で初めて示した。この SHMR は星形成の効率を示すが、これが最大となる暗黒物質ハローの質量 (pivot ハロー質量と呼ぶ  $M_h^{\text{pivot}} \sim 10^{12} M_\odot$ ) を決めたことになる。また、この pivot ハロー質量  $M_h^{\text{pivot}}$  の歴史的進化として、これが宇宙における星形成率が最大となる  $z \sim 2$  程度で最大となり、高赤方偏移 ( $z \sim 5$ ) でも低赤方偏移 ( $z \sim 0$ ) でも減少することを明らかにした。また Press-Schechter 定式化で暗黒物質ハローの進化を追跡したところ、 $z \sim 4$  のドロップアウト銀河から中間赤方偏移の最も暗い sgzK 銀河、現在の宇宙の我々の銀河のようなものに進化すること、また最も明るい sgzK 銀河は銀河団程度の質量の構造に進化すると考えられることがわかった。

本論文は 200 頁に及ぶが、その中の中間赤方偏移 ( $z \sim 2$ ) サンプルに関しては学術論文 2 編が英王立天文学会より出版済みであり、さらに遠方 ( $z \sim 3-5$ ) の銀河サンプルに関する 1 編が投稿中である。本研究は、出願者が取得したデータ、アーカイブで得られるデータを

(別紙様式 3)

(Separate Form 3)

広く用い、精度の高い観測値から、暗黒物質ハローと銀河の関係（銀河形成）を  $z=0\sim 5$  の広い赤方偏移にわたって HOD 解析という一貫した方法で調べたものである。データ解析から、結果のとりまとめ、議論など、論文作成の一連の過程において、出願者が主体的に行っていることが認められ、その内容は銀河形成の理解に大きく貢献するものである。したがって、審査委員全員が博士論文として合格であると判断した。