

氏 名 古澤 順子

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大甲第 1223 号

学位授与の日付 平成 21 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 Clustering History of K-selected Galaxies at  $z < 4$  in  
the SXDS/UDS Field

論文審査委員 主 査 教授 有本 信雄  
准教授 梶野 敏貴  
准教授 兒玉 忠恭  
教授 松原 英雄  
教授 太田 耕司（京都大学）

We investigate mass-dependent galaxy evolution based on a large sample of, about 50,000, K-band selected galaxies in a multi-wavelength catalog of the Subaru/XMM-Newton Deep Survey (SXDS) and the UKIRT Infrared Deep Sky Survey (UKIDSS), Ultra Deep Survey (UDS).

After we discriminate galaxies from stars and various false objects, we employ the optical to near-infrared photometry to determine photometric redshifts of these galaxies. Then, we estimate the stellar mass of our sample galaxies using the same standard fitting procedure as used for estimate the photometric redshift (photo- $z$ ).

Since we employ exactly the same SED models both in the photo- $z$  determination and mass estimation, stellar masses of galaxies thus obtained are internally consistent with the photo- $z$  and other physical parameters of the best-fit SEDs, including age, metallicity, extinction due to the internal dust, etc.

We compute the stellar mass function and the stellar mass density (SMD) up to redshift  $z=4$ . By combining a large number of stellar masses and spatial distributions of galaxies in one contiguous wide and deep field, we examine properties of the mass-dependent clustering of galaxies.

Compared to previous studies, we are able to estimate stellar mass functions more accurately over the wider redshift range and, also, we can investigate properties of the K-selected galaxies to much lower-mass galaxies ( $M^* \sim 10^{10.5} M_{\odot}$ ) at high- $z$  (up to  $3 \leq z < 4$ ).

The clustering properties derived from our data are, relatively free from the field-to-field variation with the aid of the wide survey area. This enables us to investigate not only the evolution of stellar mass of galaxies but also the clustering evolution of galaxies as a function of the stellar mass up to the redshift  $z = 4$ .

In order to discuss the clustering properties of the galaxies quantitatively, we derive the two-point angular correlation functions (ACFs)  $w(\theta)$ , using the technique proposed by Landy & Szalay (1993). The ACF shows the clustering properties of galaxies projected on the sky.

From a given angular clustering measurement, the correlation length  $r_0$  of galaxies for each mass range can be estimated by the Limber equation (Limber 1953) using the redshift distribution of galaxies and a choice of cosmology (e.g., Peebles 1980).

Since the spatial correlation function (SCF) obtained from a combination of  $w(\theta)$  and the redshift distribution of sample galaxies should reflect the intrinsic clustering in the space,  $r_0$  shows the spatial clustering strength of sample galaxies.

An observed trend we found is in good agreement with the local scaling behavior of the clustering with stellar mass of galaxies. More massive galaxies have stronger clustering at  $z < 4$ . The most massive dark haloes (MDHs) are likely to host the most

massive galaxies. On the other hand, the intermediate-mass galaxies ( $10^{10.5}M_{\odot} < M^* < 10^{10.9}M_{\odot}$ ) may also be hosted in somewhat lower-mass DHs at the various different redshifts.

We find that the turning redshift point of changing the dark matter haloes hosting the intermediate-mass galaxies is at  $z \sim 2$ .

We also find several high mass density regions of massive galaxies at  $1.4 \leq z < 2.5$  in our sample. These concentrations of massive galaxies are considered to be candidates of the present-day clusters of galaxies.

We also investigate the clustering properties of galaxy populations including star-forming BzK (sBzK) and passively-evolving BzK galaxies (pBzK) which are classified by their colors. We find that a 77% of our massive galaxies at  $1.4 \leq z < 2.5$  are the massive sBzK galaxies, and the high mass-density regions at  $1.4 \leq z < 2.5$  are composed primarily of the massive sBzK galaxies ( $M^* > 10^{11.3}M_{\odot}$ ). Thus, the massive galaxies at this epoch are dominated by the massive sBzK galaxies. These high mass-density regions may be the proto-clusters which evolve into the present-day massive clusters of galaxies. We also find that the average stellar mass of the pBzK galaxies at  $1.4 \leq z < 2.5$  is  $\sim 10^{10.8}M_{\odot}$ . Although this average mass corresponds to that of the intermediate-mass galaxies, the clustering strength of the whole pBzK population is as high as that of the massive galaxies ( $M^* \geq 10^{11}M_{\odot}$ ). This result may suggest that the clustering structure of pBzK galaxies formed earlier than that of the sBzK galaxies at  $1.4 \leq z < 2.5$ , and may imprint the large-scale structures of massive galaxies at the earlier epoch.

銀河の形成と進化というテーマは現代の観測的宇宙論のなかでも依然として未解決な課題として重要な位置を占めている。その全容を明らかにするには、多様な銀河種族の各々について、その質量分布関数や、クラスタリング、星形成率、銀河形態、AGN 活動性などが赤方偏移とともにどのように進化し、その進化が銀河環境にどのように依存してきたかを解明することが肝要である。

出願者は、2,279 平方分角にわたる広大な天域の約 50,000 個という深さと広さを兼ね揃えた大量銀河サンプルを用いて、その赤方偏移と恒星質量、クラスタリングを求め、銀河の恒星質量とダークハロー質量の成長の様子をこれまでに無い統計精度で明らかにした。

出願者が本論文において行った解析は以下の様なものである。

1. SXDS (Subaru-XMM Newton Deep Survey) / UDS (UKIDSS Ultra Deep Survey) フィールドと呼ばれる天域のすばる望遠鏡による可視測光データ (B, V, R,  $i'$ ,  $z'$ ) と UKIRT 望遠鏡による近赤外測光データ (J, K) を用いて、K バンドで選別した約 50,000 個の銀河の測光カタログを作成した。このカタログのもっとも暗い銀河の限界等級は  $K_{AB}=23.5$  に達すると深い観測にも関わらず、観測領域の広さは従来の 4~16 倍であり、深さと広さの組み合わせにおいて極めてユニークな銀河測光カタログとなっている。
2. このカタログをもとに、それぞれの銀河のスペクトルエネルギー分布 (SED) を構築し、モデルテンプレートの SED と比較して、銀河の測光学的な赤方偏移  $z$  と恒星質量  $M_*$  とを導出した。この二つの基本量は同一の銀河モデルに基づいて導かれており、恒星の年齢、金属量、ダストによる吸収量、質量・光度比といったパラメータは整合的なものとなっている。また、測光学的に求めた赤方偏移については、分光で確定している赤方偏移をもつ銀河サンプルと比較し、その精度が十分であることを確認している。
3. 赤方偏移が  $0 < z < 4$  にある銀河の恒星質量分布をシェヒター関数型で近似して、その進化を求め、さらに、恒星質量分布を積分して宇宙における恒星の平均的な質量密度の進化を導出した。これによって、宇宙のこの時代 ( $0 < z < 4$ ) における星形成と銀河の成長の様子を明らかにする統計的に十分な精度のデータを得るに至った。先行研究に比べて圧倒的に領域が広く、銀河数も桁違いに多いので、銀河の空間分布のばらつき (cosmic variance) の影響をほとんど受けないのが大きな特長である。また、深い撮像と数多くの銀河をサンプルすることにより、質量の小さな ( $M_* \leq 10^{10.5} M_\odot$ ) 暗い銀河を、より遠方 ( $3 < z < 4$ ) まで追跡することが可能となった。
4. 銀河の天球上に射影されたクラスタリング (集中度) の指標である二体角度相関関数を求め、これと測光学的な赤方偏移とから空間的なクラスタリングを表す相関長  $r_0$  を銀河の質量ごとに導出した。質量ごとに銀河の空間的なクラスタリングの進化をここまで詳細に求めたのは本研究が初めてである。

その結果、次のような新しい知見を得ている。

1. 宇宙における星質量密度の進化は  $z > 2$  では急であるが、それ以後は緩やかになることを示した。どの質量の銀河からの寄与も遠方に行くほど減少しているが、特に質

量の大きな銀河 ( $M_* > 10^{10.86} M_\odot$ )に限るとこの減少傾向は穏やかで、大質量銀河の成長が  $z > 2$  の時期に活発に起こったことを示唆する。これは銀河のダウンサイジングと呼ばれる現象であり、大質量の銀河ほど初期に星形成が活発であり、星の形成活動は時代を下るとともにより小さな銀河へと移行したことを意味する。この解釈については、低質量の銀河は最近になって形成されたからだとする説もあるが、本研究では、赤方偏移が  $3 < z < 4$  という初期の時代でも質量の小さな銀河 ( $M_* \leq 10^{10.5} M_\odot$ ) が既に多数存在することを発見しており、ダウンサイジングが質量の大きな銀河ほど星形成活動が早く終息する現象であることを観測的に明らかにした。

2. 銀河のクラスタリングの進化は銀河質量に強く依存する。銀河質量の大きいほどクラスタリングは強く、この傾向はどの赤方偏移でも成立する。質量の大きな銀河 ( $M_* > 10^{11.26} M_\odot$ ) はどの赤方偏移でも重い質量 (平均的に  $M_{\text{DH}} \sim 10^{14} M_\odot$  に相当) のダークハローに内包されていることを明らかにした。これらの銀河は、将来、近傍宇宙の銀河団へと取り込まれることが予想される。一方、質量が中程度以下 ( $10^{10.46} M_\odot < M_* < 10^{11.26} M_\odot$ ) の銀河の場合には、クラスタリングの赤方偏移に伴う変化は銀河質量に強く依存せず、 $z > 2$  まではそれぞれ質量がほぼ一定のダークハローに内包されているように振る舞い、 $z < 2$  にあってはより質量の大きなダークハローに包まれている可能性を示唆した。質量の小さい銀河 ( $10^{9.66} M_\odot < M_* < 10^{10.46} M_\odot$ ) ではこの傾向はそれほど顕著ではない。
3. 楕円銀河の祖先と考えられている銀河種族 ERO、DRG、BzK を特定し、その中でも星形成を行っている s BzK 銀河と星形成の終了した p BzK 銀河 ( $1.4 < z < 2.5$ ) の赤方偏移とクラスタリングを求め、s BzK 銀河と p BzK 銀河の赤方偏移分布には明瞭な相関のないこと、p BzK 銀河のクラスタリングが s BzK 銀河よりも強いことを明らかにした。これは p BzK 銀河が s BzK 銀河に比べてより遠方のクラスタリングの強い銀河団環境で誕生したことを示唆する。また、大質量の s BzK 銀河 ( $M_* > 10^{11.3} M_\odot$ ) が集中して存在する領域を三つ発見した。これらの領域は高赤方偏移における原始銀河団候補として注目される。

出願者の博士論文に示された以上の結果は、出願者の高度な観測データ処理能力、結果の解釈のために必要な広範かつ高度な背景知識等が備わっていることを示している。本論文は銀河の形成と進化の解明に大きく貢献する観測結果を提示したものであり、優れて独創的で画期的なものである。これにより審査委員会は、全員一致で本論文が博士論文として十分な価値を有し、合格であると判定した。