

氏 名 伊藤 慧

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2298 号

学位授与の日付 2022 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 Star Formation Activity of Galaxies and its Relationship to  
Environment in Distant Universe

論文審査委員 主 査 高田 唯史  
天文科学専攻 准教授  
伊王野 大介  
天文科学専攻 准教授  
小野寺 仁人  
天文科学専攻 助教  
矢島 秀伸  
筑波大学 計算科学研究センター 准教授  
兒玉 忠恭  
東北大学 大学院理学研究科 教授

## 博士論文の要旨

氏 名 伊藤 慧

論文題目 Star Formation Activity of Galaxies and its Relationship to Environment in Distant Universe

The formation and evolution of galaxies are essential topics in modern astronomy. Galaxy properties are correlated with their living environments, which is called the “environmental effect”. In the local universe, galaxies in dense environments, such as clusters, are often in the quiescent phase. To reveal the origin of the environmental effect, it is essential to explore its initial condition in the distant universe. Protoclusters are one of the ideal laboratories at that point, but due to the small sample size, their properties are totally in mystery at  $z > 3$ . Moreover, recent studies suggest that the different galaxy populations probe the different spatial distribution in protoclusters, although it is not yet clear how this impacts the environment related studies and whether it is the same in the general field. Moreover, recent observations with deep surveys and sensitive near-infrared spectrograph have revealed the existence of galaxies with suppressed star formation even at  $\sim 1\text{--}2$  Gyr after the big bang. However, it is not yet explored whether the quenching mechanism of these high redshift galaxies is related to the environment or other mechanisms, such as active galactic nuclei (AGNs).

In this thesis, I report exploring the star formation activity of galaxies mainly at high redshift and its connection to their living environment. Based on the wide-field survey of the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program (HSC-SSP) and the Cosmic Evolution Survey (COSMOS), I conduct three studies with the statistical approaches.

Firstly, we derive the rest-frame UV luminosity function of galaxies in protoclusters (PC UVLF) at  $z \sim 4$ . This protocluster sample is selected from the overdensity map of Lyman break galaxies at  $z \sim 4$  from the HSC-SSP, and the largest sample at this redshift. After the statistical correction for the incompleteness and contamination for protocluster galaxies, we successfully determine the PC UVLF for the first time. From this function, we find that protocluster galaxies tend to be brighter in the rest-frame UV than field galaxies. It is not likely due to AGNs, suggesting that protocluster galaxies are more active in star formation. The PC UVLF also suggests that protoclusters at  $z \sim 4$  contribute to the  $\sim 6\text{--}20\%$  of the total star formation occurring in the universe. These suggest that the environment has already affected the galaxy evolution at  $z \sim 4$ , and protocluster galaxies may evolve earlier than field galaxies.

Secondly, we evaluate the general spatial distribution difference among different

galaxy populations at  $2 < z < 4.5$  in the COSMOS field. We construct a massive star-forming and quiescent galaxy (SFG and QG) sample from the photometric redshift and Ly $\alpha$  emitter (LAE) sample of the SC4K survey. We conduct two analyses: clustering and overdensity measurement. The cross-correlation signal of SFGs and QGs is as expected from their autocorrelation signal. However, the cross-correlation signal of SFGs and LAEs is significantly lower than their autocorrelation signal. This low signal suggests that some physics segregate LAEs in addition to the halo mass difference. The overdensity distribution measured by SFGs as a tracer supports this trend, showing that LAEs are in less dense regions than SFGs and QGs. These results reinforce the importance of exploring multiple galaxy populations in quantifying the intrinsic galaxy environment of the distant universe. In addition, we discuss the connection between SFR and the living environment from the derived overdensity. However, we do not find any correlation. Based on the clustering analysis and the overdensity, this work suggests that the environmental quenching is insignificant at  $z > 2$ .

Lastly, we explore the connection between galaxy quenching and AGNs at  $0 < z < 5$ , which is another plausible mechanism for quenching. We conduct the X-ray and radio image stacking for X-ray undetected QGs selected from the latest COSMOS2020 catalog. We successfully detect signals of X-ray and radio for up to  $z \sim 5$  for the first time. The X-ray and radio luminosity cannot be explained by the only X-ray binaries and star formation-related emissions, respectively, suggesting that QGs ubiquitously possess low-luminosity AGNs. Moreover, QGs have higher AGN luminosity than SFGs at  $z > 1.5$ . We conclude that this trend indicates that AGNs have an essential role in galaxy quenching, possibly through “radio-mode” feedback. This is not seen at  $z < 1.5$ , which might reflect that other mechanisms, such as environmental quenching, are dominant for quenching.

This thesis observationally suggests that the overdense environments at the high redshift ( $z > 2$ ) have a role in enhancing the star formation, not in quenching, and it already starts as early as  $z \sim 4$ . Quenching at high redshift is likely to be caused by AGNs. On the other hand, it also suggests the importance of mapping the multiple galaxy populations to examine the real environment.



## 博士論文審査結果

Name in Full 氏 名 伊藤 慧

Title 論文題目 Star Formation Activity of Galaxies and its Relationship to Environment  
in Distant Universe

銀河の形成と進化は、現代天文学において本質的なテーマである。個々の銀河の性質は、その銀河が存在する環境と相関があり、「環境効果」と呼ばれている。我々の近傍である局所宇宙では、銀河団などの高密度環境に存在する銀河は、しばしば静かな状態（星形成が行われていない、もしくは強く抑制されている状態）にある事がわかっている。このような環境効果の起源を明らかにするためには、遠い宇宙における、その初期状態を探ることが不可欠である。原始銀河団はその点で理想的な実験場の一つだが、未だそのサンプル数が少ないため、赤方偏移が 3 を超えるような高赤方偏移の宇宙において、その性質は未解明である。また、最近の研究により、異なる銀河種族は原始銀河団内において異なる空間分布を示すことが知られてきており、このような特徴が、環境効果に関連した研究にどう影響するのか、また、原始銀河団以外の領域でもその特徴は同様なのかは明らかになっていない。さらに、近年の観測では高感度な近赤外線分光器により、ビッグバン後 1~2Gyr の時点でも星形成が抑制された銀河が存在する事が明らかになってきているが、これら高赤方偏移にある銀河のクエンチング（星形成を抑制する）メカニズムはまだ解明されていない。

本論文では、主に高赤方偏移における銀河の星形成活動について調査を行い、銀河が存在する環境との関連性について論じている。ハイパー・スプリーム・カムによるすばる戦略枠観測（HSC-SSP）による広視野サーベイと宇宙進化サーベイ（COSMOS）のデータを用いて、以下の 3 つの統計的なアプローチによる研究を行っている。

### 1. 赤方偏移が 4 の宇宙に存在する原始銀河団の静止系紫外光度関数を求める事で、高赤方偏移における星形成の環境効果の調査

この研究では、赤方偏移 4 近辺に存在するライマンブレイク銀河の密度超過情報から、今までで最大の原始銀河団サンプルを作成し、原始銀河団の静止系紫外光度関数を決定することに成功している。この光度関数から、原始銀河団中のライマンブレイク銀河は静止系紫外線において、銀河団ではない一般的な領域に比べ明るくなる傾向があり、その原因は活動銀河中心核ではなく、活発な星形成によるものである事がわかった。また、原始銀河団における星形成はこの時代の宇宙全体における星形成の 6~20% を占めていることを明らかにした。これらの結果は、赤方偏移 4 における銀河の進化について、環境効果が既に影響を与えていることを示唆している。

### 2. COSMOS 領域における赤方偏移 2~4.5 の異なる銀河種族（具体的には大質量の星形成銀河と静かな状態の銀河、ライマン $\alpha$ 輝線銀河の 3 種族）の空間分布と星形成抑制に対する環境効果の有無の調査

この研究では、測光情報の解析によって大質量の星形成銀河 (SFG) と静かな銀河 (QG) のサンプルを構築し、SC4K カタログによるライマンアルファ輝線銀河 (LAE) サンプルと合わせて、3 つの銀河種族についてのクラスタリングと密度超過測定の 2 つの解析を行った。これらの解析により、SFG と QG についてはその分布に大きな差が見られなかったが、SFG と LAE の分布には明らかな差が見られ、ダークハローの質量差に加えて、何らかの物理現象が LAE をそのほかの銀河種族から分離していることを示唆する事、LAE が SFG や QG よりも密度が低い領域に存在することを示した。これらの結果は、遠方宇宙の銀河の存在する環境を定量化する上で、複数種類の銀河分布を探索することの重要性をより強く示した。さらに、導き出された密度超過に基づいて、星形成率及び比星形成率と環境との関連性について解析し、それらの相関が非常に弱いことを明らかにした。これは赤方偏移 2 周辺において環境効果によるクエンチングメカニズムは重要ではない事を示唆している。

### 3. COSMOS 領域の多波長 (X 線と電波) のデータを用いる事によって、赤方偏移 0~5 の宇宙について、星形成抑制と活動銀河中心核の関係についての調査

この研究では最新の COSMOS2020 というマルチバンドカタログから抽出された、X 線未検出の QG サンプルについて、X 線と電波画像のスタッキング解析を行った。その結果、赤方偏移 5 までの X 線と電波のシグナルを世界で初めて検出することに成功した。X 線と電波の光度は、それぞれ X 線連星と星形成に関連した放射だけでは説明できないことから、QG 内には低光度の活動銀河中心核が存在していることが示唆される。さらに、赤方偏移が 1.5 より大きい宇宙では、QG は SFG よりも高い活動銀河中心核の光度を示すことを発見し、活動銀河中心核が "電波モード" のフィードバックを介して、銀河のクエンチングに重要な役割を担っていると結論づけた。活動銀河中心核の光度の超過は、赤方偏移 1.5 より近傍の宇宙では見られず、銀河における星形成のクエンチングに対する他のメカニズムが支配的である可能性があることも示した。

以上のように、本論文は、原始銀河団の観測から、高密度の環境は高赤方偏移の星形成については、クエンチングではなく、むしろ促進する役割を担っており、それは、赤方偏移 4 の時点ですでに始まっている事、高赤方偏移でのクエンチングは、おそらくは環境による効果よりも銀河自身の活動銀河中心核による働きが主であること、一方、銀河の個体群を調べ、実際の環境効果を調べる為には、複数の銀河種族を用いた総合的な解析が重要である事を明らかにした。

本研究は多種多様なデータをうまく使いながら、銀河進化における環境効果や星形成抑制のメカニズムの起源に迫る上で、興味深い結果をもたらしたと言え、銀河進化の研究論文としても十分な価値が認められる。

本研究において、データ解析は、出願者が中心になって遂行したものである。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。以上の理由により、審査委員会は、本論文が学位の授与に値すると判断した。