

氏 名 嶋川 里澄

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1904 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 Forming Galaxy Clusters at the Cosmic Noon

論文審査委員 主 査 准教授 岩田 生
准教授 伊王野 大介
准教授 林 左絵子
助教 岡本 崇 北海道大学
教授 太田 耕司 京都大学

論文の要旨

Summary (Abstract) of doctoral thesis contents

Galaxy protoclusters at the peak epoch of cosmic star formation ($z = 2-3$) are ideal test-beds to characterise how the present-day cluster galaxies have been formed. These massive systems can directly tell us what physical mechanisms are responsible for the galaxy diversity that is strongly dependent on the surrounding environment as clearly seen in the present-day Universe.

In this Thesis, we have conducted and presented very deep H-Alpha line imaging observations of the two known richest protoclusters (PKS 1138 at $z = 2.2$ and USS 1558 at $z = 2.5$) with the Multi-Object InfraRed Camera and Spectrograph (MOIRCS) on the Subaru Telescope. In addition, we have carried out a panoramic Ly-Alpha line imaging for one of the target protoclusters, USS 1558, using the Suprime-Cam on Subaru, which is the first systematic dual H-Alpha and Ly-Alpha lines survey for a young protocluster field at high redshift.

Based on the improved technique of the traditional narrowband selection, we have successfully identified in total 249 H-Alpha emitters (HAEs) associated with the two protoclusters, down to the stellar mass of $1E8$ Msun and star formation rate (SFR) of 2 Msun/yr. Such a large number of HAEs can trace a wide range of environmental dependence of the physical properties of galaxies in detail even on the sub-structure or group scale (≤ 300 physical kiloparsec scale).

Narrowband observation especially has a great advantage as it can sample less massive active star-forming objects whose stellar continua are very faint but emission lines are strong enough to be detected. Deep H-Alpha line imaging have identified 54 low-mass HAEs with stellar mass lower than $1E9$ Msun. Some of those show remarkably high star-forming activities higher than $(0.1 \text{ Gyr})^{-1}$ in specific SFR, and significantly deviate from the typical star-forming main sequence. While such very active star-forming activities do not involve dusty star-bursts, they have surprisingly high H-Alpha/UV luminosity ratios. This may suggest that they have exceptionally hard ionisation fields due to their young ages and low metallicities.

This work has found that the protocluster's dense cores tend to have larger numbers of more massive and/or more active star-forming galaxies, and yet they are not significantly deviated from the star-forming main sequence on the stellar mass versus SFR diagram. On the other hand, dependencies of the physical properties on the environment are diverse among different cluster/group structures. This may

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

suggest that the environmental effects on galaxy formation depend on the stage of cluster formation and evolution in the course of the cosmic mass-assembly history.

We also find that the large-scale structures traced by Ly-Alpha emitters (LAEs) around the protocluster core nicely follow the overdensities of HAEs on a large scale. The peak of LAE number density corresponds to a four sigma overdensity which coincides to the core of the USS 1558 protocluster on a large scale. On a smaller scale, however, we do not see any excess of number density of LAEs in the densest groups of HAEs within the protocluster. Rather, LAEs are remarkably missing in those very dense regions. The fraction of Ly-Alpha emitting HAEs among the entire HAE sample is only one percent in the high-density regions, which is an order of magnitude lower than that in low-density regions (\sim ten percent. This is consistent with the LAE fraction in the general field). This sampling effect cautions that the past protocluster surveys using LAEs as tracers would miss the densest structures where we can expect any important environmental dependence may be occurring. Moreover, the stacking analyses suggest that HAEs in high density regions have a lower escape fraction of Ly-Alpha photons than those in low-density regions. These phenomena suggest that denser circumgalactic/intergalactic matters associated with protocluster cores may deplete the Ly-Alpha emission lines from star-forming galaxies in the dense groups of the protocluster.

Based on all these results, this Thesis concludes that massive structures at high redshift can establish very massive systems expected to grow into the passive early-type galaxies at the bright end of the red sequence seen in present-day massive galaxy clusters. Such phenomena could be supported by the cold-mode stream scenario as predicted by the modern cosmological simulations, which is also inferred from the depletion of Ly-Alpha emission line in the protocluster cores by our dual H-Alpha and Ly-Alpha narrowband study. This first result combining with H-Alpha and Ly-Alpha line imaging for the protocluster environments have succeeded in providing the unique insights into the physical mechanisms in the early phase of galaxy cluster formation at the peak epoch of cosmic star formation.

Summary of the results of the doctoral thesis screening

現在の宇宙には多数の銀河が密集する銀河団が存在し、そこに属する銀河と一般的な天域の銀河には形態を始めとして明確な差異がある。環境による銀河の性質の違いの起源を理解することは、銀河形成史を理解する上で重要な課題の一つである。遠方銀河の観測が進む中で、原始銀河団と呼ばれる銀河の集中領域も見つかってきた。本論文は、赤方偏移 2 よりも遠い二つの原始銀河団領域で、狭帯域撮像による星形成銀河サンプルを構築しこれらの性質を調べることで、銀河進化における環境効果の起源を探ることを目指したものである。

本研究は大きく分けて二つの観測を行っている。まず、すばる望遠鏡の近赤外線撮像分光装置 M0IRCS による狭帯域撮像で、赤方偏移 2.15 の PKS1138 および赤方偏移 2.53 の USS1558 という既知の原始銀河団領域の $H\alpha$ 輝線銀河を探索した。過去の研究でこれらの領域の $H\alpha$ 輝線銀河探索は行われているが、本研究ではより深い狭帯域撮像観測を行うことで、星形成率の小さい銀河まで捉えることができた。また、多色撮像のデータを用いた SED fitting により、星質量やダストによる減光率などを求めている。この観測で得られた主な知見は以下である。(1) 低星質量の星形成銀河では $H\alpha$ /UV の光度比が大きい。ダスト減光との相関は見られないことから、相対的に電離光子が多い(硬い)放射であることが示唆される。(2) PKS1138 では、高密度領域に星質量が大きい銀河が集中する傾向がみられ、一方 USS1558 では高密度領域に星形成率が大きい銀河が集中する傾向がみられる。

もう一つの観測は、すばる望遠鏡 Suprime-Cam の狭帯域フィルタを用いた、USS1558 に対する $Ly\alpha$ 輝線銀河の探索である。 $Ly\alpha$ 輝線は赤方偏移 2.2 以遠の宇宙の星形成銀河探索によく用いられ、原始銀河探索も行われているが、星間ガスやダストによる吸収・散乱を受けやすいことが知られている。本研究では原始銀河団領域の $H\alpha$ 輝線銀河と $Ly\alpha$ 輝線銀河を初めて併せて系統的に探索した。これによる主な知見は以下である。(3) $H\alpha$ 輝線銀河での高密度領域は $Ly\alpha$ 輝線銀河の大局的な空間分布でも検出されているが、 $H\alpha$ 輝線銀河が特に密集している部分において $Ly\alpha$ 輝線銀河は検出されず、むしろ密集領域を避けるように分布している。(4) 高密度領域とそうでない領域の $H\alpha$ 銀河それぞれについて $Ly\alpha$ 輝線 flux を測定し、ダスト吸収補正した $H\alpha$ 輝線 flux との比をとることで $Ly\alpha$ の平均的な脱出率を調べると、高密度領域の方が有意に $Ly\alpha$ の脱出率が小さかった。(3) (4) の解釈としては、高密度領域の星形成銀河の方がダストによる減光をより大きく受けている可能性も考えられるが、中性水素の柱密度がより高い可能性も示唆される。

本研究ではこれらの観測結果を受けて、原始銀河団の形成過程について考察し、これらの結果を説明し得る描像として、数値シミュレーションなどで予言されている銀河間空間から銀河に注ぐ低温ガス流 (cold gas stream) を軸にしたシナリオを提示している。赤方偏移 2.5 では、原始銀河団の中心部でも cold stream がハローの中心部まで到達し、活発な星形成を行う $H\alpha$ 輝線銀河が銀河分布の集中領域において存在している。かつ、銀河周辺には低温ガスが大量に存在しているため、 $Ly\alpha$ 輝線は吸収される。時間が経過すると、原始銀河団のハローが成長し、cold stream が中心領域まで到達しなくなり、星形成が持

(別紙様式 3)

(Separate Form 3)

続できなくなる。これにより集中領域では passive な進化を行う銀河が出現し、現在の銀河団銀河にみられるような red sequence を形成する。観測された $z=2.1$ の原始銀河団は、このような進化の途上にあると考えることができる。この描像は本研究で得られた結果を説明できるが、ほかのシナリオの可能性を排除できるものではない。本学位論文では、サンプルの原始銀河団の数を増やしていくことに加え、静止系紫外線での深い分光によって水素吸収線を検出することで HI のマッピングを行うなどして、上述の描像を検証する将来の研究についても述べている。

本研究で得られた知見はいずれも銀河形成の最盛期での銀河形成過程における環境の影響を理解する上で重要な示唆を与えるものである。特に Ly α 輝線銀河と H α 輝線銀河を同じ原始銀河団で系統的に探査し、その分布や Ly α 輝線脱出率について明らかにした点は、今後の原始銀河団研究に大きな影響を与えうるものであると考えられる。本研究において出願者は観測計画の立案(一部について)、データ解析、解釈、査読論文としてのとりまとめという一連の過程を主体的に実行している。よって審査委員は全員一致で、博士論文として合格であると判定した。