

氏 名 鈴木 智子

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1906 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 Accelerated Star-Forming Activity before the Peak Epoch as
Revealed by Galaxies Emitting Strong Lines of Doubly
Ionized Oxygen

論文審査委員 主 査 教授 有本 信雄
准教授 柏川 伸成
准教授 中西 康一郎
教授 松下 恭子 東京理科大学
教授 犬塚 修一郎 名古屋大学

論文の要旨

Summary (Abstract) of doctoral thesis contents

The star-forming activity of galaxies in the Universe comes to its peak about ten billion years ago from the present-day Universe (redshift $z \sim 2$). This epoch is called the "cosmic high noon". In order to understand how the star-forming activity of galaxies is peaked towards the cosmic noon, we go further back in time to $z \sim 3-3.6$ which is 1-2 Gyr prior to $z \sim 2$. We aim to reveal what physical processes are involved in such a rapid increase of star formation rates (SFRs). So far, the ultraviolet (UV)-selected galaxies, such as Lyman Break Galaxies (LBGs), have been commonly used to probe the pre-peak epoch at $z > 3$. However, the UV-selected galaxies tend to be biased to bluer, less dusty star-forming galaxies due to strong dust extinction in the rest-frame UV regime. On the other hand, the rest-frame optical emission lines are less affected by dust extinction, and thus the optical emission line selected galaxies are more representing the star-forming galaxies including dusty ones. We focus on the [Oiii] λ 5007 emission line instead of H α to trace star-forming galaxies at $z = 3-3.6$ because H α is no longer accessible at $z > 2.6$ from the ground. Recent studies have reported that high redshift normal star-forming galaxies tend to show strong [Oiii] emission as compared to the local counterparts. It is expected that we can use the [Oiii] emission line as a good tracer of star-forming galaxies at $z > 3$.

Imaging observation with a narrow-band (NB) filter, which can capture the redshifted strong emission lines from galaxies, is a powerful method to construct a sample of star-forming galaxies in a particular redshift slice. It provides us with a clean sample of star-forming galaxies down to a certain flux and equivalent-width (EW) limits. In this *Thesis*, we use the samples of NB-selected [Oiii] emission line galaxies at $z > 3$ obtained by the two systematic NB imaging surveys, namely Mahalo-Subaru and HiZELS.

In the first place, we want to confirm that the [Oiii] emitters actually trace star-forming galaxies at high redshifts with little bias. For this purpose, we compare [Oiii] emitters with H α emitters at the same redshift ($z=2.23$) selected by the NB filters at *H* and *K*-band, respectively. We find no significant difference on the global physical quantities between the two samples. This indicates that the [Oiii] emitters are not biased towards a particular population with respect to the H α emitters at $z=2.23$. We have thus confirmed that the [Oiii] emission line can be a useful tracer of star-forming galaxies at high redshifts.

With the [Oiii] emitters at $z > 3$ in the general fields, we investigate the star-forming activity of galaxies before the peak epoch. Stellar masses and SFRs of the [Oiii] emitters show a positive correlation, which is known as the "main sequence" of star-forming galaxies. By comparing the stellar mass- SFR relation of

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

the [Oiii] emitters with that of the NB-selected galaxies at $z \sim 2$, we find that there is little evolution in the normalization of the main sequence between the two epochs, but that there is an offset along the constant main sequence towards the lower stellar masses with respect to the $z \sim 2$ star-forming galaxies. Based on the assumption that the galaxies evolve along the constant sequence, we can estimate the stellar mass growth of star-forming galaxies from $z=3.2$ to 2.2 . As a result, a significant mass growth of galaxies during just 1 Gyr interval is suggested. Moreover, by dividing the samples at $z=3.2$ and 2.2 into three stellar mass bins, we find that, from $z=3.2$ to 2.2 , the fraction of massive galaxies with relatively high sSFRs and high dust extinctions increases in the highest stellar mass bin. This suggests that the dusty star formation phase becomes more common among massive galaxies since $z=3.2$ towards the peak epoch.

We also carried out the NIR spectroscopic observations of the [Oiii] emitters at $z=3.24$ with Keck/MOSFIRE. Comparing the excitation and ionization states and gaseous metallicities of the [Oiii] emitters at $z=3.24$ with those of other samples at the same epoch, we find that the [Oiii] emitters have similar ISM conditions to those of the UV continuum-selected galaxies, which are different from those of LAEs. We also compare the gaseous metallicities of the [Oiii] emitters with those of the star-forming galaxies at $z \sim 2$ from the literature. Their gaseous metallicities are almost the same at a fixed stellar mass, and the mass-metallicity relation does not show a strong evolution between the two epochs.

In this *Thesis*, based on our unique NB-selected [Oiii] emitters, we investigate the physical properties of star-forming galaxies at $z > 3$. Our results infer that the stellar mass-SFR relation and the mass-metallicity relation are almost constant between $z \sim 3.2$ and 2.2 . The stellar masses are likely to determine the evolutionary stage (star-forming activity and ISM conditions) of star-forming galaxies between the two epochs. While the scaling relations are almost constant, our results also suggest that the individual galaxies show a significant stellar mass growth between the two epochs (1 Gyr interval). The star-forming activity of galaxies is accelerated since $z > 3$ towards the peak epoch.

In order to reveal the physical mechanisms behind such a rapid galaxy growth, it is required to investigate their internal structures, kinematics, and molecular gas components with the AO-assisted imaging, integral field spectroscopy, and ALMA.

Summary of the results of the doctoral thesis screening

宇宙における星生成は赤方偏移 $z \sim 2$ でピークを迎え、その後は減衰しながら現在に至っている。この時期になぜ星生成が極大となるのか、それを明らかにするためには $z \sim 2$ よりも更に昔の銀河を調べ、星生成を活発にする物理過程は何かを知る必要がある。しかしながら、星生成の有力な指標となる水素バルマー系列の $H\alpha$ 輝線は宇宙膨張の影響により、遠方宇宙では長波長側に偏移するために、 $z > 2.6$ では地上からの観測が不可能である。出願者はこの困難を克服するために、波長 5007 \AA の酸素の禁制線 $[OIII] \lambda 5007$ を $H\alpha$ 線の代わりに使うことを提唱している。 $H\alpha$ 輝線を有する銀河、 $[OIII] \lambda 5007$ 輝線を有する銀河は、それぞれ狭帯域フィルターを用いれば、ある特定の距離 z にある輝線銀河として検出できる。出願者は HiZELS と呼ばれる撮像観測データを用いて $z = 2.23$ という距離にある $H\alpha$ 輝線銀河と $[OIII] \lambda 5007$ 輝線銀河とをサンプリングして、両者の物理量、即ち、銀河質量、ダストによる吸収量、星生成率、単位質量当りの星生成率などに大きな違いのないことを確認した。これは $H\alpha$ 輝線の代わりに $[OIII] \lambda 5007$ 輝線を用いて、 $z > 2.6$ より遠方にある星形成銀河をサンプリングできることを世界で初めて示したものであり、本研究の特筆すべき成果と言える。

出願者は次に、 $[OIII] \lambda 5007$ 輝線でサンプリングした $z \sim 3.2$ にある星形成銀河の質量（星質量）と星生成率との関係を導き、それを $z \sim 2.2$ にある星形成銀河のそれと比較し、両者にほとんど違いが見られない、つまり、銀河の星生成活動は $z \sim 3.2$ から $z \sim 2.2$ にかけてほぼ一定であるという知見を得た。一方、 $z \sim 3.2$ では、 $z \sim 2.2$ では多数存在している大星質量の銀河（質量が太陽質量の 100 億倍以上）がほとんど存在しておらず、 $z \sim 3.2$ から $z \sim 2.2$ の時期（時間では 10 億年程度）にかけて、銀河が急激に成長して、大星質量銀河が誕生したことを示す結果を得た。これは銀河進化の知見としては新しいものであり、銀河形成・進化の観測的研究において重要となりうる指摘である。出願者は更に、 $z \sim 3.2$ と $z \sim 2.2$ にある銀河の星生成率、星間ダストによる吸収量を調べ、 $z = 3.2$ から $z \sim 2.2$ にかけて星生成率が高く、ダストによる吸収が強い大星質量銀河の割合が急激に増加することを見出した。これは宇宙における星生成が極大を迎える時期に、通常の星生成とは異なる多量のダストの生成を伴う活発な星生成が大星質量銀河で起きていることを示している。

出願者は次に、ケック望遠鏡近赤外分光装置を用いて、 $z \sim 3.24$ にある $[OIII] \lambda 5007$ 輝線銀河の分光観測を行った。一般に星形成銀河のガスの金属量は星質量が大きいほど高い。しかしながら、この相関は分散が大きく、近傍銀河ではその分散には星生成率が関与しているとされる。即ち、近傍銀河はガス金属量、質量、星生成率を三つの軸とする空間で平面上に分布し、この平面は基準平面と呼ばれている。しかしながら、 $z \sim 3.24$ の星形成銀河は近傍銀河と同じ平面には分布せず、遠方銀河での星生成が近傍銀河と異なることを示唆している。

本研究では、 $[OIII] \lambda 5007$ 輝線を $H\alpha$ 輝線に代わる指標として、遠方星形成銀河をサンプリングし、その星生成率などの物理量を測定する新たな手法を提唱し、その有効性

(別紙様式 3)

(Separate Form 3)

を実証したこと、 $z > 3$ の星形成銀河の物理量を系統的に導き、 $z \sim 3.2$ から 2.2 にかけて多量のダストを含み、高い星生成率を示す大星質量の銀河が成長していることを示したものであり、銀河の星生成活動が $z \sim 3$ から $z \sim 2$ に向かって加速度的に活発化したことが示唆されている。この知見は、本研究によって初めて明らかにされたものであり、高く評価できる。

本研究のもととなるデータ解析は出願者が中心となって行ったものであり、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、その内容は銀河進化の理解に大きく貢献するものである。従って、審査委員全員が博士論文として合格であると判断した。