

氏 名 澁谷 隆俊

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1577 号

学位授与の日付 平成25年3月22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 Cosmic Reionization Revealed by Distant Galaxies and Role of  
Extragalactic Outflow

論文審査委員 主 査 准教授 高田 唯史  
准教授 伊王野 大介  
准教授 宮崎 聡  
准教授 本原 顕太郎 東京大学  
教授 梅村 雅之 筑波大学

## 論文内容の要旨

The cosmic reionization started at about 0.2 billion yrs after the Big Bang is one of the major unresolved astrophysical phenomena in the early Universe. Revealing how and when this key event started and ended is crucially important for understanding the phase change in the intergalactic medium and the physical processes of formation of the first stars and galaxies. However, the detailed reionizing process remains unclear, even with remarkable improvements in observational instruments during the past few decades. To obtain new knowledge on cosmic reionization, we took two observational approaches by probing distant galaxies. One is the direct survey for distant galaxies during reionization, another is to investigate the galactic-scale outflow, which is directly linked to the photon emissivity of distant galaxies.

The Ly $\alpha$  emission from galaxies in the reionizing epoch is absorbed and scattered by remaining neutral hydrogen gas, thereby its flux decreases and the number density of observable galaxies decreases accordingly. The number count of distant galaxies therefore tells us the average ionized fraction of neutral hydrogen atoms in the surveyed volume.

One of the uncertainty of the photon budget is the degree of ionizing photon emissivity of these galaxies. Galactic wind and the dust attenuation of the galaxy are the possible physical processes that directly affect ionizing photon emissivity. The galactic wind is expected to help ionizing photons escape from the galaxy by sweeping away many interstellar absorbers. Hence, the detailed process of reionization can be unveiled by taking this effect into account when estimating the ionizing photon budget. In this thesis, we report the survey for galaxies at  $z \sim 7.3$  and investigate the effect of the outflow from a galaxy at  $z \sim 4$  using various powerful instruments on the Subaru telescope.

First, we have performed deep imaging surveys for LAEs at redshift  $\sim 7.3$  in two blank fields, the Subaru Deep Field (SDF) and the Subaru/XMM-Newton Deep survey Field (SXDF), using the Subaru/Suprime-Cam equipped with new red-sensitive CCDs and a new narrow-band filter, NB1006. This target redshift is the highest among the LAE survey using the Suprime-Cam. We identified four objects as  $z \sim 7.3$  LAE candidates that exhibit luminosity excess in NB1006. By carrying out deep follow-up spectroscopy for three of them, a definitively asymmetric emission line, typical for high redshift LAE, was detected for one of them, SXDF-NB1006-2. Assuming this line is Ly $\alpha$ , this object is at  $z = 7.215$  with Ly $\alpha$  luminosity of  $L(\text{Ly}\alpha) = 1.2 \pm 1.5 \cdot 0.6 \times 10^{43} \text{ erg s}^{-1}$ . Another object,

SDF-NB1006-2, shows photometrical variability and is thus probably a QSO or an active galactic nucleus. It shows an asymmetric emission line at 10076 Å, which may be due to either Ly  $\alpha$  at  $z=7.288$  or [O II] at  $z=1.703$ . The third object, SDF-NB1006-1, is likely a galaxy with temporal luminosity enhancement associated with a supernova explosion, as the brightness of this object significantly varies during the observed epochs. Its spectrum does not show any emission lines. We conclude SXDF-NB1006-2 as a real  $z\sim 7.3$  LAE, and compare the LAE number density at  $z\sim 7.3$  with those at lower- $z$ . The inferred decrease in the number density of LAEs toward higher redshift is  $n_{\text{Ly}\alpha} z=7.3/n_{\text{Ly}\alpha} z=5.7 = 0.05 \pm 0.11 \pm 0.05$  from  $z=5.7$  to 7.3 down to  $L(\text{Ly}\alpha)=1.0 \times 10^{43}$  erg s $^{-1}$ . The present result is consistent with the interpretation in previous studies (Ouchi et al. 2010, Kashikawa et al. 2006, 2011) that the neutral hydrogen fraction is rapidly increasing from  $z=5.7$  to 7.0, and this study, for the first time, confirmed that the trend continues up to  $z=7.3$ .

Second, we conducted deep spectroscopy for a gravitationally lensed Lyman Break Galaxy (LBG), A1689\_1, at  $z\sim 3.77$  with the Laser Guide Star Adaptive Optics (LGSAO) system on the Subaru Telescope. We successfully detected a [O III] doublet from the galaxy. Compared with the redshift of [O III], which traces the systemic velocity of the galaxy, the interstellar absorption lines are blueshifted to  $464 \pm 80$  km/s. This large velocity offset indicates the presence of a strong gaseous outflow from the galaxy. The dynamical mass of the galaxy was estimated by the [O III] line width to be  $2.84 \pm 15.4 \pm 2.84 \times 10^8 M_{\odot}$ , which is the lowest mass among the galaxies whose outflow is detected in the previous studies, taking advantages of the combination of gravitational lensing and LGSAO. Compilation of the datasets of galaxies with outflow measurements, allows us to investigate the correlation between the galactic properties and outflow speed at high- $z$ . The strongest correlation between the velocity offset and the dynamical mass is found out of all physical quantities, suggesting that the speed of outflow becomes faster for lower mass galaxies. This correlation is consistent with the idea that the shallower gravitational potential makes the gaseous outflow easier. We also found a possible redshift evolution of galactic outflow, implying that the velocity offset becomes larger toward higher- $z$ . This may result from the dynamical mass evolution of galaxies, as found in the negative correlation between the outflow and the dynamical mass.

If low mass galaxies have efficient outflow, the escape of the Lyman Continuum (LyC) ionizing photon is expected to be enhanced by their outflow, meaning that numerous less massive objects at high- $z$  may well contribute to ionize the IGM hydrogen. Motivated by this, we reconsidered the photon budget required for reionization in the

$z=7$  Universe by adapting the differential LyC escape fraction as a function of UV magnitude,  $f_{\text{LyC esc}}(\text{MUV})$ . Using the possible correlation between  $f_{\text{LyC esc}}$  and outflow measured in the local Universe, we derived a relation between  $f_{\text{LyC esc}}$  and the dynamical mass. The LyC escape fraction could be enhanced from 0.05 up to  $\sim 0.3$  in low mass galaxies. However, the revised photon budget was found to be still insufficient, even if we adopt the differential  $f_{\text{LyC esc}}(\text{MUV})$ . This requires a high- $z$  relation between the LyC escape and outflow for more robust assessment.

## 博士論文の審査結果の要旨

本研究論文では、宇宙の再電離のメカニズムに迫ることを目的として、赤方偏移 7.3 近辺のライマン $\alpha$ 輝線天体 (Lyman Alpha Emitter: 以下 LAE) の探査を行い、そこから求められる光度関数を用いて、宇宙再電離に対する LAE の寄与について調査することと、赤方偏移が 4 程度の重力レンズを受けた天体からのガスの流出 (アウトフロー) を詳細に調べ、銀河からの電離光子の離脱率を計算することによりガスの流出が宇宙再電離に与える影響について議論が行われている。

赤方偏移 7.3 近辺の LAE 探査は、すばる望遠鏡の主焦点広視野可視光カメラ (SuprimeCam) に赤方偏移 7.3 近辺のライマン $\alpha$ 輝線の検出を目的として制作された狭帯域フィルターを装着し、総計 1.5 平方度について非常に深い撮像観測を行うことで進められた。また、その探査で検出された LAE 候補天体 4 つのうち 2 つを分光し、その 1 つからはライマン $\alpha$ 輝線と判断して間違いのない輝線を赤方偏移 7.215 に検出することに成功した。これは現在、分光で確認された中では宇宙で最遠の天体である。この探査結果から光度関数を求めたところ、より近い宇宙 (例えば赤方偏移 5 や 6) に比べても明らかな個数密度の欠乏が認められた。この結果を中性水素原子による共鳴散乱と解釈すると、赤方偏移 7.3 近辺の宇宙では、水素の中性度は約 80% という結論を得た。探査体積がまだ小さく発見された LAE が一つしかないため、探査を拡大して統計的誤差の評価を今後慎重に行う必要はあるものの、赤方偏移 7.3 という現在の天文学においても最遠の領域に対する非常に重要な情報を含む研究である。この研究は既に Shibuya et al. (2012) ApJ 752:114 として発表されている。もう一つの柱となる研究は、視線上の銀河団による強い重力レンズを受けた赤方偏移 3.77 の Lyman Break Galaxy (以下 LBG) を分光観測し、その天体の星雲輝線ガスの赤方偏移を測定したもので、その銀河の力学的重心の赤方偏移と、既に測定されていた星間物質による吸収線の赤方偏移を比較して、その速度差からガスの流出の存在を実証している。流出ガスのドップラー効果による波長偏移が共鳴散乱を回避する効果があり、銀河周辺の再電離を助長するメカニズムになりうるかどうかを観測的に検証しようとしたものである。観測はすばる望遠鏡に補償光学 (Adaptive Optics: 以下 AO) 機器を装着した上で近赤外線撮像分光器 (IRCS) を用いて行われた。AO の高解像度撮像性能と重力レンズによる増光効果を利用することで、元来は暗すぎて観測が困難であった LBG について観測を行い、赤方偏移 3.77 の [OIII] ( $\lambda$  500.7nm) 輝線と思われる輝線を検出することに成功した。この [OIII] 輝線と星間物質による吸収線の赤方偏移の差と [OIII] 輝線の幅から推測される銀河の力学的質量の関係を、他の赤方偏移 2-3 を中心とする星形成銀河の情報も併せて調べたところ、この 2 つの物理量には有意な相関があるのではないかと結論 (軽い銀河ほど強いガス流出を示す) に達した。また、その相関と赤方偏移が 7 近辺の LBG の光度関数から、ガス流出の効果を考慮した電離光子の銀河からの離脱率を計算し、ガス流出が赤方偏移 7 の宇宙の再電離にどの程度寄与する可能性があるかを議論している。この方法は今までにないア

アプローチであり、結果としては、LBG からのライマン光子離脱は、ガス流出を考慮しても宇宙を完全に再電離するためには不十分であるとの結論に達しているが、今後、より多くのサンプルを用いて測定精度を上げることと、物理的な裏付けを伴ったモデルとの比較によって、宇宙再電離の物理的理解が進む可能性がある。

このように、本研究は、宇宙再電離の起源の研究における根本的な問題に挑戦し、優れた成果を上げたものであり、出願者が観測、解析から議論にいたるまで主体的に研究を進めたものと認められる。従って、審査委員会は全会一致で本論文が博士論文として優れており、合格であると判断する。