

氏 名 尾上 匡房

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1983 号

学位授与の日付 平成 30 年 3 月 23 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 Exploration of the Cosmic Dawn with High-Redshift Quasars

論文審査委員 主 査 准教授 高田 唯史  
教授 本間 希樹  
准教授 岩田 生  
教授 和田 桂一 鹿児島大学 大学院  
理工学研究科  
准教授 嶋作 一大 東京大学 大学院  
理学系研究科

Summary (Abstract) of doctoral thesis contents

Quasars are one of the unique probes of the early universe. We can learn from the observations of high-redshift quasars, for example, the reionization history, the early growth of the super massive black holes (SMBHs), and the build-up of the SMBH co-evolutionary growth with host galaxies. However, the observations of quasars in the reionization epoch have been difficult due to their small number density compared to galaxies at the same redshift. Moreover, the number of  $z > 6$  quasars has been increased to more than 200 thanks to recent tremendous observational efforts with wide-field surveys, but most of them are the extremely luminous quasars limited by the survey depths, which may bias the understanding of the SMBH growth history. This thesis explores the relatively unexplored, low-luminosity quasars at  $z > 6$  to investigate the roles of high-redshift quasars from unique points of views exploiting wide and deep optical surveys of the 8.2m Subaru telescope, especially the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program covering 1400 deg<sup>2</sup>.

First, we address the quasar contribution to cosmic reionization with our deep imaging survey of  $z \sim 6$  low-luminosity quasars with Subaru/Suprime-Cam down to  $Z_R = 24.15$  mag in the UKIDSS-DXS fields covering 6.5 deg<sup>2</sup>. From our photometric color selection, we select 17 candidates and identify two quasars from our follow-up spectroscopy and additional deeper photometry with the HSC-SSP, while one of the two could be a galaxy due to its narrow Ly $\alpha$  emission line as a type-I quasar. Thanks to the deep imaging, we put a unique constraint on the faint-end ( $M_{1450} \sim -23$ ) of the  $z = 6$  quasar luminosity function (QLF), which has been poorly constrained due to the survey depths of most of the previous quasar surveys. From the QLF, the quasar photon budget of ionizing photons is found to be only 1–12% required for reionization at  $z \sim 6$  with  $2\sigma$  confidence. Even taking into account several systematic uncertainties such as the clumping factor of intergalactic medium and the minimum magnitude of the QLF, we for the first time derive the firm evidence that quasars are only the minor contributors of reionization, based on the complete identification of faint quasar candidates.

Next, the search for  $z > 6$  low-luminosity quasars is extended with the much wider HSC-SSP. From the first-year data of the HSC-SSP, we have identified more than 70 quasars at  $z \sim 6 - 7$  in  $> 400$  deg<sup>2</sup>, which has already exceeded the number of the SDSS  $z \sim 6$  quasars. Since those samples are  $\sim 2$  magnitude fainter than most of the other quasars discovered through shallow surveys such as the SDSS, we have succeeded in probing down the tip of the iceberg. In this thesis work, we took deep near-infrared spectroscopy for five new low-luminosity quasars from the HSC-SSP in

(別紙様式 2)  
(Separate Form 2)

Gemini/GNIRS and VLT/X-SHOOTER. From the obtained spectra, we detected broad emission lines of MgII and CIV with underlying continuum. We serendipitously found a highest-redshift red quasar at  $z=6.71$  characterized by its unusually red broad-band color of  $y_{\text{HSC}} - W2 \sim 3$ , which is in the transitional phase from starburst to type-I quasar.

We measure their black hole mass with the so-called single-epoch method utilizing the emission line widths and the continuum luminosity obtained from the spectra. The estimated virial black hole mass is in the range of  $2 \times 10^7 M_{\text{sun}} \leq M_{\text{BH}} \leq 9 \times 10^9 M_{\text{sun}}$  with the Eddington ratio of  $0.2 \leq L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}} \leq 3.6$ . Such a variation in the Eddington ratio was not seen in the most luminous  $z > 6$  quasars. The black hole masses of those with sub-Eddington accretion rates cannot be explained from seed BH models with the current growth rates due to the short timescale from their birth. We suggest that those two are already in the post-active phase of their initial mass growth even at such high redshift; they would be in the build-up phase of the galaxy-BH co-evolutionary growth known in the local universe, while it would not be the case for the exceptionally luminous quasars. The one red quasar has a super-Eddington ratio, which is consistent with the picture that SMBHs experience intense mass growth in the red quasar phase. Moreover, 37 quasars at  $z > 6$  are compiled from the literatures and this study to obtain the Eddington ratio distribution of  $z > 6$  quasars. Dividing into two luminosity bins at  $L_{\text{bol}} = 10^{47} \text{ erg s}^{-1}$ , we find that the average Eddington ratio is  $\langle \log L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}} \rangle = -0.10 \pm 0.20$  in the luminous bin, while quasars in the less luminous bin have  $\langle \log L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}} \rangle = -0.14 \pm 0.41$ . While the high Eddington ratio is characteristic in  $z > 6$  quasars, the large scatter in the less luminous bin shows that the low-luminosity range of  $z > 6$  quasars are the mixture of the most active black holes and the quenched black holes. The absence of  $M_{\text{BH}} \sim 10^{10} M_{\text{sun}}$  black holes with the sub-Eddington ratio implies a cut off in the black hole mass function at  $z > 6$  perhaps limited by the timescale and accretion disk physics.

This work paves the way for various future studies. We will address the  $z \sim 6 - 7$  QLF with the HSC-SSP, which enables us to further examine the redshift evolution of the QLF faint-end with its large samples size. The detailed study on the classification of the ambiguous populations found in the optical follow-up observation with narrow Ly $\alpha$  is crucial in the QLF estimate and has a possibility to identify new populations at  $z > 6$  such as type-II quasars and galaxies with young stellar populations. The complete BH mass estimate for flux-limited HSC quasar samples yields to the understanding of the entire SMBH growth history up to  $z \sim 7$ , with the determination of several key statistical quantities such as black hole mass function and Eddington ratio distribution function at low-mass and low-accretion rate end.

Summary of the results of the doctoral thesis screening

初期宇宙を研究する上で重要な天体の一つにクエーサーが挙げられる。高赤方偏移 ( $z$ ) に存在するクエーサーを観測することで、宇宙の再電離の歴史や超巨大ブラックホールの成長やその母銀河との共進化に関する重要な知見を得ることが可能になる。一方、宇宙再電離期に存在するクエーサーはその密度の低さから銀河に比べて探査による発見が難しかった。本研究では、地上 8m 級望遠鏡の集光能力と、すばる望遠鏡の広視野撮像能力を最大限に生かすことで、宇宙再電離期の典型的なクエーサーの探査とそれらの性質の解明に取り組んだ。本論文の目的は、

- (1)  $z \sim 6$  よりも大きな遠方宇宙において、クエーサーの光度関数が低光度側で定まっていなかった事によって、宇宙の再電離に対するクエーサーの寄与に大きな不定性がある、という問題を解決すること
- (2) 既存の  $z \sim 6$  を超えるクエーサーで、より低光度のクエーサーを含めて探査することで、超巨大ブラックホールの初期成長はどれだけ活発か、また、母銀河との共進化はどのようになっているかを解明すること

の 2 つである。

出願者は、まず、すばる望遠鏡の広視野カメラである Suprime-Cam を用いた 6.5 平方度における探査を行い、17 個の  $z \sim 6$  の周囲に存在するクエーサー候補を検出し、その後のフォローアップ分光観測及びすばる望遠鏡次世代超広視野カメラである Hyper Suprime-Cam (HSC) によるより深い撮像観測により、そのサンプル中から 2 つのクエーサーを確認した。この結果、 $z \sim 6$  におけるクエーサーの光度関数について、絶対等級で  $-23$  等という、今までにない暗い側について初めて決定することに成功した。これはすばる望遠鏡の大集光力と広視野の組み合わせによって初めて実現したものである。これにより  $z \sim 6$  周辺におけるクエーサーの宇宙の再電離への寄与を計算することが可能となり、この赤方偏移においては、クエーサーの発する紫外光の宇宙再電離に対する寄与は  $1 \sim 12\%$  であると結論し、その寄与はそれほど大きくない事を示した。

出願者は、また、HSC による 400 平方度を超える探査データを用いて、70 個を超える  $z = 6 \sim 7$  に存在するクエーサーを発見した。このサンプルは先行研究による探査データに比べて 2 等ほど暗い天体までを検出できることから、今まで困難であった  $z = 6 \sim 7$  に存在する低光度のクエーサーを数多く発見することに成功した。それらのうちの 5 個について Gemini 及び VLT という 8メートルクラスの望遠鏡を用いたフォローアップ分光観測を行い、クエーサー特有の MgII や CIV の広い輝線の検出に成功した。この輝線幅を用いて中心の超巨大ブラックホールの質量を推定したところ、 $2 \times 10^7 \sim 9 \times 10^9$  太陽質量の範囲であることが分かった。ここから導かれるエディントン比も  $0.2 \sim 4$  の範囲であり、今まで知られていた高光度の  $z = 6 \sim 7$  のクエーサーに関する値に比べると、範囲が広く、多様な状態のクエーサーを発見した可能性が高いことが示された。特に、エディントン比の値が小さかった 2 つについては、既に成長期を終えてしまったブラックホールを保持している可能性が高いことを示したことは、非常に価値の高い結果であると言える。

本研究において、分光データの取得から解析は、出願者が中心になって遂行したものであ

(別紙様式 3)

(Separate Form 3)

る。その他の撮像データを含めた結果のとりまとめ、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  $z \sim 6$  以上の宇宙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。