

氏 名 内山 久和

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2060 号

学位授与の日付 平成 31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 The Environment of Quasars in the High Redshift Universe

論文審査委員 主 査 准教授 宮崎 聡
教授 川邊 良平
助教 今西 昌俊
准教授 嶋作 一大 東京大学大学院
理学系研究科
教授 北山 哲 東邦大学 理学部

博士論文の要旨

氏名 内山 久和

論文題目 The Environment of Quasars in the High Redshift Universe

Luminous quasars are generally thought to be formed through major mergers of gas-rich galaxies. At a high redshift, the reservoir of the gas feeding the quasars can be supplied by major (wet) mergers. This suggests that the activity of quasars and therefore, their supermassive black hole (SMBH) growth, may depend not only on their intrinsic properties but also on the surrounding environment beyond the scale of a galaxy. However, the mechanism by which the large-scale environment affects mass accretion onto the SMBH, with a scale much smaller than that of a galaxy, is not known. It is generally assumed that the most luminous quasars and galaxies are hosted by massive halos, as suggested by $M-\sigma$ relations. Therefore, if quasar activity is triggered by frequent mergers, it should preferentially occur in the peaks of the matter density, i.e., high redshift protoclusters (or clusters in the formation) that are thought to evolve into the galaxy clusters seen in the local universe. However, this topic is still controversial and a consistent picture for the environment of high- L quasars has not been achieved. In addition, the extreme rarity for both protoclusters and quasars does not allow us to derive a general picture of their relation.

Moreover, there is another aspect that makes it difficult to evaluate the quasar environment. The most luminous quasars could suppress galaxy formation in their surroundings through feedback, “photoevaporation”: photoionization heating by an intense ultra-violet (UV) radiation from the quasars can evaporate collapsed gas in the halo and further inhibit gas cooling. This phenomenon could be effective around quasars, especially in terms of preventing the formation of low-luminosity galaxies. However, the occurrence of this process is not readily apparent during observations, because in addition to the small field-of-view, previous studies have not probed deep enough to investigate galaxies with sufficiently low luminosity or low mass, where more effective photoevaporation is expected.

In this thesis, the advantages of the wide-field imaging capability of a Subaru telescope was exploited to characterize the large-scale environment of high-redshift quasars by systematically investigating (1) the number of galaxies that are clustered around quasars, and (2) the extent of the influence of the radiation effect of quasar on these surrounding galaxies. Two wide-field images dataset produced by Subaru were used. One is the 1st release data (DR1) of the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program (HSC-SSP) of 121 square degrees to statistically characterize the environment of a large number of optically selected quasars at $z\sim 4$ from the Sloan Digital Sky Survey (SDSS). The other is the narrow-band images obtained using the Suprime-Cam to target 11 fields of quasars at $z\sim 2-3$, to systematically study the radiative feedback effects on the surrounding low-luminosity galaxies.

Firstly, a cross-correlation between the positions of the SDSS quasars at $z\sim 4$ and the bias-free wide-field protocluster catalog was performed, which is produced by HSC-SSP DR1 data at the same redshift. It was found that only two out of 151 quasars reside in regions with galaxy overdensity significance of more than 4σ , compared to the field. The distributions of the distance between quasars and the nearest protoclusters are statistically identical to those found in the g-dropout galaxies (star-forming galaxies at $z\sim 4$). In addition, the overdense significance at the position of the quasars are also the same as those of g-dropout galaxies. These results suggest that quasars tend to reside in almost the same environment as star-forming galaxies at this redshift. Using stacking analysis, it was found that the average density of the g-dropout galaxies in the vicinity of quasars is slightly higher than that in the region of g-dropout galaxies over 1.0-2.5 pMpc scales. However, at < 0.5 pMpc, the values in the vicinity of quasars tend to be lower. I also found that quasars with higher UV-luminosity or with more massive black holes tended to avoid the most overdense regions. These findings are consistent with a scenario in which the luminous quasar at $z\sim 4$ resides in structures that are less massive than those expected for the progenitors of the current rich clusters of galaxies.

Next, I focused on the Lyman alpha emitters (LAEs) to systematically study the possible photoevaporation effect of quasar radiation on surrounding low mass galaxies at $z = 2-3$. I selected LAEs using Suprime-Cam narrow-band images at the same redshifts as the quasars at $z\sim 2$. The proximity zone of a quasar is defined by the region where the local UV radiation from this entity is comparable to the UV background. It was found that LAEs with high a rest-frame equivalent width of Lyman alpha emission (EW) of $> 150\text{\AA}$ with low stellar mass

$< 10^8$ solar mass, are scarce in the quasar proximity zones. This suggests that quasar photoevaporation effects may be occurring. The halo mass of LAEs with $EW > 150\text{\AA}$ is estimated to be 3.6×10^9 solar mass, either from the Spectral Energy Distribution (SED) fitting or the main sequence. Based on a hydrodynamical simulation, the predicted delay in star formation under a local UV background intensity with $J = 10^{-21}$ erg/s/cm²/Hz/sr for galaxies with less than this halo mass is approximately > 20 Myr. This is longer than the expected age of LAEs with $EW > 150\text{\AA}$. However, photoevaporation seems to be less effective in the vicinity of very luminous quasars, which is consistent with the idea that these quasars are still in an early stage of quasar activity.

These findings imply that most quasars appear in individual galaxies and not by major mergers. Once they appear, low-mass galaxy formation around the quasar will be suppressed because of the intense UV radiation from the quasar, photoevaporation. Therefore, for the first time, the environment of quasars at high redshifts throughout their lifetime is statistically and observationally revealed.

博士論文審査結果

Name in Full
氏名 内山 久和Title
論文題目 The Environment of Quasars in the High Redshift Universe

最近の観測的宇宙論の進展により、現在の宇宙のエネルギー密度の約 7 割が暗黒エネルギー、2 割 5 分は暗黒物質が占め、通常物質はわずか数%に過ぎないことが分かってきた。暗黒物質の重力によるクラスタリングが、宇宙における物質構造の骨格を形作り、通常物質は暗黒物質の作る重力ポテンシャルにより集積し、銀河や銀河団などの天体が形成されてきたと考えられている。このように、天体形成のアウトラインは理解されつつあるものの、その中で実際に起こっている多彩な物理過程には、まだ未解明の問題が多い。例えば、出願者がテーマに選んだ QSO(準恒星状天体)という、莫大なエネルギーを放出するコンパクトな天体がある。その正体は、周囲に降着円盤を伴う太陽質量の 100 万倍以上の超巨大ブラックホールであることが解明されてきている。これが母銀河の中心部で、ある時期に発現し、活発に活動し、再び休止しているようであるが、どのようなメカニズムでこの一連の QSO 進化が起こっているのかは、現代天文学が解明すべき重要課題の一つとなっている。

QSO 発現の有力モデルのひとつとして、母銀河の合体説がある。星間空間ガスを多く持つ銀河同士が衝突・合体し、その際に大量のガスがブラックホールに流れ込めば、QSO 活動の活発化を説明できる。この仮説に基づくと、宇宙の中で銀河の衝突頻度が高い領域、すなわち、高密度な領域で、より多くの QSO が観測されるはずである。QSO とその周囲の天体との相関を調べる観測は従来も行われてきているものの、相関の検出・未検出両方の報告がそれぞれ複数され、混沌とした状況にあった。はっきりした結論が得られない原因の一つとして、QSO からの明るい放射が、周囲の銀河の形成を抑制してしまっている可能性が考えられた。また、QSO に比較してその周囲にある遠方の銀河は非常に暗いため、QSO の周囲を広く探査してこのような銀河を探すことは、観測的なハードルも高かった。

そこで、QSO と環境の関係を観測的に明らかにするために、出願者は以下の二つの研究を行った。

(1) 原始銀河団と QSO の関係

比較的大質量であると考えられ、その結果進化が QSO 放射の影響を受けにくいラインマンブレイク銀河(LBG)の分布を調べ、それが集中している領域(原始銀河団)と QSO の空間相関を調べる。

(2) QSO の周りのラインマン・アルファ輝線銀河(LAE)の分布

比較的軽いと考えられ、その進化が QSO 放射の影響(光蒸発効果)を受けやすい LAE が、QSO の周囲にどのように分布しているかを調べる。

このように、性質の異なる二種類の銀河に着目することで、QSO が周囲から受ける影響と、QSO が周囲へ与える影響とを明確に切り分ける工夫をしている。

(1)においては、出願者等が観測に用いたすばる望遠鏡広視野カメラ(Hyper Suprime-Cam: HSC)は、口径 8.2 m の大望遠鏡において、直径 1.5 度角という例外的に広い広視野を実現したカメラで、微光天体の広視野探査に適している。HSC により、広く LBG を探査し、そのクラスタリング解析から、従来の 10 倍以上のサンプル数である 151 個の原始銀河団候補が特定された。QSO との相関を調べた結果、原始銀河団に所属している QSO はほとんどないことが明らかになった。このように LBG でトレースした高密度領域と QSO の発現頻度を系統的に調べた研究例はこれまでになく、量・質共に、この手法での観測結果の決定版と言える。QSO をホストする暗黒物質ハローの質量を、約 $1 \times 10^{12} M_{\odot}$ 程度以下であると仮定すると、これが $z=0$ において銀河団スケールである $1 \times 10^{14} M_{\odot}$ 程度を超えるのは、せいぜい 1-2 % であることから、QSO と原始銀河団の場所の不一致は説明された。一方、この観測からは QSO の発現が銀河の合体が主要因かどうかは明確には判別できなかった。なぜなら、合体が起こる空間スケールと原始銀河団の空間スケールが大きく異なるからである。この課題に関しては、今後さらに詳しい観測とシミュレーションを行うという方向性が本論文には明確に示されていた。

(2)においては、HSC の一世代前の Suprime-Cam を用いることにより、既知の 11 個の QSO について、LAE の分布を調べた。LAE の光度関数を QSO の近傍と離れたところで調べて見たところ、暗い LAE ($M_{uv} > -17$) は、QSO の近傍において欠落していることを発見した。これは、QSO による光蒸発効果が系統的に確認された初めての例である。

このように、最新のデータに基づき、QSO をホストする暗黒物質ハローの質量及び QSO の光蒸発効果を明らかにしたことは高く評価できる。

本研究は発想から研究の立案、ターゲットの選定、観測、データの解析、得られた結果に基づく考察、論文の執筆に至るまで、出願者が主体的に行ったものであり QSO 進化のメカニズムの理解に大きく貢献するものであった。従って、審査委員全員一致で博士論文として合格であると判断した。

以上