

すばる望遠鏡広視野サーベイ観測で探る 赤方偏移6,7クェーサーの性質



尾上 匡房

〈マックス・プランク天文学研究所 Königstuhl 17, Heidelberg 69117, Germany〉

e-mail: onoue@mpia-hd.mpg.de

宇宙年齢10億年未満の時代に存在するクェーサーは初期宇宙を探るうえで重要な観測対象の一つである。空間的に稀な赤方偏移 $z\sim 6,7$ クェーサーは2000年代のSDSSを代表とする広視野可視・近赤外サーベイ観測により発見され、宇宙再電離史や超巨大ブラックホールの初期進化について重要な観測的知見を与えてきた。一方で、これまで発見されてきたこれらのクェーサーは特異的に明るいものばかりであり、宇宙再電離へクェーサーがどれだけ寄与したかやこの時代の一般的な超巨大ブラックホールの性質を理解するには不十分な面もあった。このような背景の下、すばる望遠鏡を用いた低光度 $z\sim 6,7$ クェーサー探査が現在進んでいる。本稿では本プロジェクトのうち、筆者が主たる貢献をした部分について最新成果を報告する。

1. はじめに

天文学において遠方宇宙の観測研究は、われわれの生きる宇宙の起源や成り立ちに迫ることができるという意味でたいへん魅力的な分野である。中でも観測的最遠方の時代の天体探査はどの時代でも常に活発に行われてきており、大型地上望遠鏡や宇宙望遠鏡を用いて世界中の研究者たちが宇宙開闢後10億年未満の初期宇宙探査を行っている。日本も例外ではなく、すばる望遠鏡の活躍によって何度も最遠方銀河記録が塗り替えられてきたことは周知の事実であろう¹⁾⁻⁴⁾。2018年5月現在、分光観測によって同定された最遠方天体は赤方偏移 $z=11.1$ (宇宙年齢4億年)の銀河⁵⁾であり、今後James Webb Space Telescope (JWST)等の大型宇宙望遠鏡や地上30 m望遠鏡が実現すれば最遠方記録は飛躍的に更新され、いよいよ初代天体を直接観測できる時代に突入すると期待されている。

現在の観測技術で到達可能な最遠方の時代は宇

宙晴れ上がり後の中性水素で満たされた「暗黒宇宙」から星や銀河に満ちた現在の宇宙への転換期、いわゆる「宇宙再電離期」に対応している。後に述べるようにクェーサーの観測から赤方偏移 $z\sim 6$ (宇宙年齢9億年)で再電離が終了したことが知られており⁶⁾、さらに近年のライマンアルファ輝線銀河やガンマ線バースト、宇宙マイクロ波背景放射等の観測によって $z=10$ から $z=6$ にかけて宇宙空間(銀河間物質)の中性度が急激に下がっていく様子も徐々にわかってきた。宇宙再電離は初代天体の放出する電離光子が引き起こすため、宇宙再電離史を観測的に制限することは初代天体形成の理解にとって非常に重要である。しかし一方で具体的な再電離源や再電離進行の空間的非一様性など、その全貌はいまだ十分に理解されているとは言えず宇宙再電離史は多くの研究者の興味の対象となっている。

2. 遠方クェーサー観測

クェーサー (Quasi-stellar object, 準恒星状天体)

は宇宙再電離史や超巨大ブラックホール (Super Massive Black Holes, 以下SMBH) 形成を理解するうえで重要な観測対象の一つである。クエーサーは銀河中心のSMBHへの質量降着活動によって静止波長紫外の波長域では一般に母銀河をもしのぐ明るさで輝く。ゆえに再電離期ではクエーサー周囲の再電離はいち早く進行し巨大な泡状の電離領域が形成されたと考えられる。また、遠方クエーサーは時代ごとの再電離進行度合いの測定にも用いられる。Sloan Digital Sky Survey (SDSS) によって発見された $z \sim 6$ クエーサーのスペクトルを基に視線上手前の時代のライマンアルファ吸収の強さを測定した結果、宇宙再電離が赤方偏移 $z \sim 6$ で完了したこと、また同じ時代でも視線ごとに再電離の進行度合いにばらつきがあることが知られている^{6), 7)}。特に、後者は空間的にまばらに存在する初代天体によって再電離が引き起こされていることを間接的に示唆する結果と言えるだろう。

次に遠方クエーサーのブラックホールとしての性質について、重要な観測結果をいくつか紹介する。まず、モンスター級のSMBHが最遠方の宇宙に発見されている。これまで発見された $z > 7$ クエーサーは二つしかないが、それらは共に10億太陽質量 ($M_{\text{BH}} \sim 10^9 M_{\odot}$) という、全時代の中で見ても最重量級のSMBHによって明るく輝いている^{8), 9)}。Pop-III星起源の種ブラックホール ($M_{\text{seed}} = 10^{-3} M_{\odot}$) からの成長時間を考えると、ビッグバン後約8億年の $z \sim 7$ の時代に $M_{\text{BH}} \sim 10^9 M_{\odot}$ まで定常的に成長するためには、この時代の宇宙年齢と同程度の時間が必要になってしまう。そこで原始ガス雲の重力的崩壊により $M_{\text{seed}} = 10^{5-6} M_{\odot}$ の巨大な種から成長した (“Direct collapse”), あるいはPop-III星起源の種ブラックホールが間欠的

に非常に効率的な (超エディントン) 質量降着段階を経て進化したというシナリオが理論的に提唱されている。最近の種ブラックホール形成理論についての議論の詳細は2015年5月の稲吉恒平氏の記事¹⁰⁾を参照されたい。

もう一つ興味深いのは、これまで発見されてきた $z > 6$ SMBHの質量が重いことに加えて質量降着率も軒並みエディントン限界^{*1}付近と非常に高いことである¹¹⁾。より低赤方偏移 ($z < 4$) で観測されたSMBHは典型的にエディントン降着率の1-10%程度で輝いており、分布に大きな赤方偏移進化、光度依存性はない¹²⁾。よって、これまで観測された $z > 6$ SMBHは低赤方偏移SMBHと比べて異常に活発であり、宇宙再電離期までにその質量進化の大半が完了してしまったような種族を見ていることになる。さらにSMBHと母銀河という、スケールの全く異なる二つの質量進化に強い相関があることが近傍宇宙の観測から知られているが (いわゆる「共進化」), $z > 6$ クエーサーのSMBH質量を母銀河の星質量^{*2}との比として見ると、近傍宇宙で知られるBH-バルジ質量比 (およそ0.5%) よりも大きい傾向がある¹³⁾。つまり、これらの $z > 6$ SMBHは母銀河の質量進化に対しても「過成長」であり、銀河-SMBH共進化の観点からは、SMBHが活発に成長した後に母銀河成長が追いつくようなシナリオが示唆される。

3. $z > 6$ クエーサー探査

ところで、 $z > 6$ クエーサーはどのように発見されてきたのであろうか。遠方のクエーサーを発見するうえでの難しさの一つは、その数密度の小ささである。例えば、SDSSクエーサーの典型的明るさである z バンド実視等級20等では $z = 6$

*1 球対称的に質量降着が起こる場合に、降着するガスに働く重力と中心SMBHからの輻射圧が釣り合った状態の降着率をエディントン限界と呼び、中心SMBHの質量の関数として表される。

*2 正確には母銀河星形成領域に存在する電離ガスの空間的広がりから求めた力学的質量。

クエーサーの数密度は約 1 Gpc^{-3} 程度しかない。それゆえハッブル宇宙望遠鏡のような狭い視野での深観測では到底 $z > 6$ クエーサーの発見は期待できず、むしろ浅くとも ≥ 10 平方度といった広視野を観測するほうが適している。クエーサー候補天体の選択方法としては、複数バンドの撮像観測による色情報を用いるのが一般的である。どの色情報を使うかは赤方偏移によるが、例えば $z = 6$ クエーサーの場合、 $0.8\text{--}1 \mu\text{m}$ の波長帯を i, z, y バンドで観測して $i\text{--}z$ と $z\text{--}y$ の二色図を用いる。これはクエーサーのライマンブレイクが i と z のバンドの境目にくるため i と z の等級差（色）が大きく（赤く）、一方で z と y ではそれほど等級差が大きく（赤く）ない、という特徴を利用している。ただし一方で銀河系内の温度の低い褐色矮星も似た色をしており、困ったことに数密度はクエーサーよりもずっと大きい。候補天体が暗くなるほど測光誤差が大きくクエーサーと星との切り分けはより困難になるので、注意深く色選択の基準を選ばなければ大量の候補天体を分光追観測してすべてがハズレという可能性すらある。加えて $z > 7$ ではライマンアルファ輝線が可視光領域から外れてしまうため、さらなる遠方クエーサー探査のためには近赤外線観測が必須となる。よって多波長の撮像観測が広視野で必要になり一つのクエーサー発見に大きなコストがかかる。遠方クエーサー探査は言わば宇宙空間での「宝探し」のようなものであり、膨大な観測データと研究者の根性・忍耐が必要とされる分野と言えるかもしれない。

ここで、いくつかの代表的な遠方クエーサー探査プロジェクトについて紹介する。クエーサー業

界の最遠方である $z \sim 6\text{--}7$ の時代のクエーサー探査は2000年代に始まった。Xiaohui Fan と Michael Strauss, Linhua Jiang らの米国のグループは前述したSDSSを用いて約10,000平方度の中から合計52個の $z \sim 6$ クエーサーを発見し、この分野の礎を築いた¹⁴⁾。欧州のFabian Walter, Bram Venemans らのグループは複数の可視・近赤外線サーベイを駆使してクエーサー探査を進めている。クエーサーの最遠方記録は2011年に発見されたJ1152+0052⁸⁾ ($z = 7.1$) が長らく鎮座していたが、昨年、同グループのEduardo Bañados が $z = 7.5$ クエーサー J1342+0928 を発見し、7年ぶりに記録を更新した⁹⁾, *3。これら二つの $z > 7$ クエーサーは共に近赤外線サーベイであるUKIDSS^{*4} Large Area Surveyによって発見されたものである。また彼らは赤緯 -30 度以上のすべての領域を可視光で観測するPan-STARRS1サーベイを用いて77個の $z \sim 6$ クエーサーを発見している¹⁵⁾。これまで発見された合計数で見ると、筆者が大学院に入学した2013年当時には50個程度だった $z > 6$ クエーサーが、現在は200個（うち、 $z \sim 7$ は ~ 10 個）を超える数に達している。この発見数の大幅な上昇には後述する、すばる望遠鏡Hyper Suprime-Cam (HSC) の貢献も大きい。

4. 遠方クエーサーの普遍的理解へ

ここまで、先行研究によってわかった $z > 6$ クエーサーの性質とクエーサー探査について紹介してきたが、これまでの探査には大きな問題点がある。それは、これまで発見されたクエーサーの大半がこの時代で最も明るい種族であるということである。これは既存のサーベイが広視野である一方で

*3 彼ら曰く、この新しい最遠方クエーサーは数ある候補天体のうち、あまり優先度が低い候補であったという。分光追観測の際に快晴の観測で優先度の高い候補天体の分光が全て終わってしまい、時間が余ったからと残りの候補をダメ元で分光したところ大当たりだったようだ。記録的な発見が予想外のところから生まれる、というのは遠方天体探査でよく聞く話である。実際 $z \sim 7.5$ クエーサーの色は比較的星に近いので、混入天体との切り分けが特に難しい赤方偏移範囲である。

*4 The UKIRT Infrared Deep Sky Survey.

観測が浅いものばかりであることに起因する。明るいクェーサーばかりではダメな理由はいくつかある。まず、再電離の観点からするとクェーサーの光度関数（明るさごとの数密度分布）が明るい側だけ制限されている。クェーサー単体として見れば明るい遠方クェーサーほど周囲を広く電離するが、より巨視的な視点で見たときには数が多い暗いクェーサーのほうが全体で放出する電離光子の総量が多く再電離への寄与は大きい。ゆえに、暗い側まで含めて $z > 6$ クェーサー光度関数を制限しなければクェーサーの再電離への寄与はわからない。この再電離の担い手については暗い星形成銀河が主たる寄与をするという議論が主流であったが、近年低光度クェーサー（AGN）の寄与を見直すべきという議論が高まっている¹⁶⁾。銀河の場合光度関数は暗い側までよく決まっているものの、一つの銀河からどれだけの割合の電離光子が宇宙空間に抜け出てこれるのかを観測的に求めるのが難しく、対立候補であるクェーサーの寄与を見積もることはやはり重要であると言える。またブラックホールの観点からすると、特異的に明るいSMBHは質量も重く活動性も高いため初期に最も効率的な質量成長を経たSMBH種族を知るうえで重要ではあるが、この時代のより一般的なSMBH成長史を探るうえでは明るさのバイアスが存在する可能性が大いにありうる。よって、第2章で述べたエディントン比分布の偏りや、母銀河-SMBH共進化の様子は、より一般的なSMBH種族、つまりこれまでに発見されてきたクェーサーより低光度の遠方クェーサーを用いて再検証する必要がある。

5. すばるSuprime-Camによる $z \sim 6$ クェーサー探査

ここから筆者が博士論文にまとめた研究内容について紹介する。まず、われわれは $z \sim 6$ 低光度クェーサー探査のため、すばる望遠鏡Suprime-Camを用いてUKIDSS-DXSと呼ばれる合計6.5

平方度の領域で撮像観測を行った。すばる望遠鏡は主鏡口径が8.2 mであるが、集光能力の高い8 m級望遠鏡を用いて $z > 6$ クェーサー探査が行われたのは本研究が初である。Suprime-Camの広視野撮像観測能力と合わせて、すばるの強みを生かしたプロジェクトであると言えるだろう。観測は z_B, z_R という、可視光の中で最も波長が長いバンド（一般の z, y バンドに対応する）で行った。観測の 3σ 限界等級は約24等であり、これはSDSSよりも3等深い。同じ領域で少し短波長側をカバーする*i*バンドの観測データを共同研究者とアーカイブデータから取得し $i-z_B$ と z_B-z_R の二色図でクェーサー候補天体の色選択を行うことにより、合計17個の低光度クェーサー候補天体を撮像データから選び出した。

次に分光追観測である。実は撮像観測自体は筆者が大学院入学前の2009年に行われたのだが、暗くてすばるですら分光に時間がかかる候補天体ばかり、ということもあり候補天体の追観測に随分と時間がかかってしまった。11個の候補天体に対して、すばるFOCASを用いた可視分光観測を行ったところ、2個の候補天体から遠方天体の証拠であるライマンアルファ輝線と連続光を検出した。輝線プロファイルから、これらはそれぞれ $z=6.156, z=6.041$ のクェーサーと判明した。スペクトルを図1に示す。一つめのVIMOS2911001793については連続光の上に線幅の広いライマンアルファ輝線が見えており、短波長側の急激なフラックス減衰（ライマンブレイク）と合わせて典型的な $z \sim 6$ クェーサーのスペクトルと言える。一方で二つめのELAIS1091000446についてはライマンアルファ輝線の線幅が 400 km s^{-1} 、とクェーサーにしては比較的狭く、むしろ近年高赤方偏移で発見されている明るいライマンアルファ輝線銀河のそれに近い。この天体については現状のノイズの大きいスペクトルからだけではクェーサーか銀河か判別することはできなかった。

さて17個の候補天体中残りの6個については

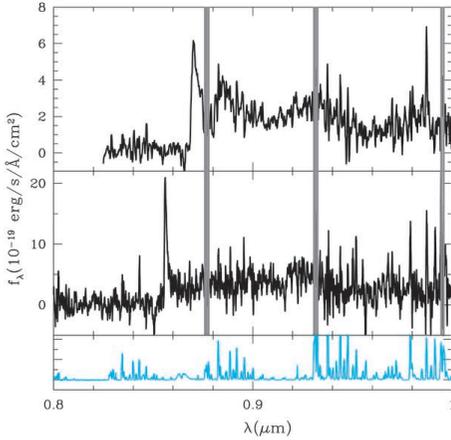


図1 Suprime-Camによる探査で発見されたクェーサーのFOCASスペクトル（上：VIMOS2911001793，中：ELAIS1091000446）。0.8 μm 付近のライマンアルファ輝線から求めた赤方偏移はそれぞれ $z=6.156, z=6.041$ 。下段はノイズスペクトル。

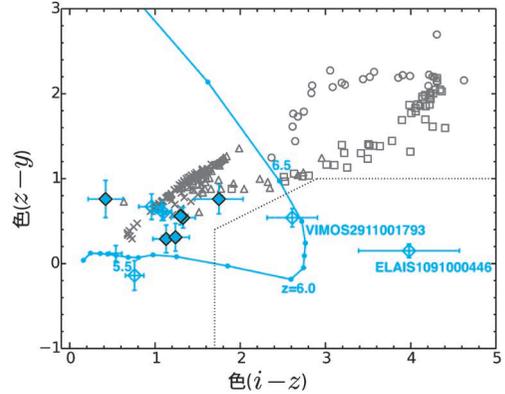


図2 HSC-SSP領域の候補天体16個の*i-z* vs. *z-y*二色図。FOCASで分光した候補を青白抜き、未分光の候補天体を青塗りの菱形で示した（灰色はモデルから期待される銀河系内の褐色矮星の色）。青実線は期待される $z\sim 5-7$ クェーサーの色、点線はSuprime-Camで用いたクェーサー選択のための色選択基準を表す。

分光追観測は行わなかったものの、幸運なことにHyper Suprime-Cam ずばる戦略枠観測 (HSC-SSP) で同じ領域をより深く観測していた。図2はHSC-SSP領域にある候補天体16個のHSCを元にした*i-z*と*z-y*の二色図である。青白抜き点がFOCASで分光した候補天体であるが、ライマンアルファが受かった2天体については共にHSCでも典型的なクェーサーの色をしていることがわかる。そして青塗り点で示した未分光の6天体は*i-z*の色が1程度とそれほど赤くなく、どちらかという褐色矮星の色に近いことがわかる。この結果からわれわれは未分光の6天体はすべてクェーサーでないと判断し、結局最初に見つけた2（または1）個のみが本物のクェーサーであると結論した。

図3は発見されたクェーサーの情報をもとに評価した $z=6$ クェーサー光度関数である。横軸が静止系紫外での絶対等級、縦軸が等級ごとのクェーサー数密度であり、Suprime-Camによるデータ点は青点で示した。データ点が二つあるのは発見したクェーサーをELAIS1091000446を含めて2個とするか1個とするかで場合分けしたためである。われわれの撮像観測は非常に深いため、先行研

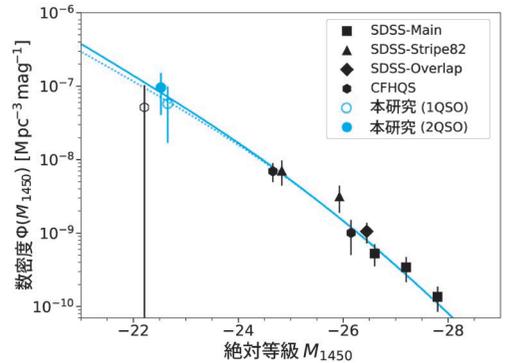


図3 $z=6$ クェーサー光度関数。横軸が1,450 Å絶対等級、縦軸がクェーサー数密度を示す。Suprime-Camによる結果を青で示した（青塗り：クェーサー2個、青白抜き：クェーサー1個）。線はSuprime-Camと他研究（黒塗り）の結果を合わせてdouble power-law関数でフィットした結果で、実線と点線はそれぞれ発見数をELAIS1091000446を含めて2個とした場合、含めずに1個とした場合を表す。

究よりもデータ点が低光度側にあることがわかる。図の線はわれわれの結果と先行研究の明るい側の結果を合わせて $z=6$ クェーサー光度関数をdouble power-law関数でフィットした結果で

ある*⁵。この光度関数を積分し、単位体積あたりの電離光子放出率を求めたところ、発見したクェーサー数が1個、2個いずれの場合でも $z=6$ での再電離に必要な量の1-12% (2σ 信頼区間)となった。また銀河間物質の局所的な疎密のばらつき (“clumping factor”) 等の系統的な不定性を加味してもクェーサーの再電離寄与はたかだか20%程度であることから、本研究によりクェーサーが再電離の主な担い手ではないことが示された。

6. HSC-SSPによる $z\sim 6, 7$ クェーサー探査と追観測

高赤方偏移クェーサー探査は現在進行中のHSC-SSPサーベイでも行われている。この章ではプロジェクトの概略とともに、発見されたクェーサーの近赤外線追観測の初期成果について述べる。HSC-SSPは視直径1.5度 (Suprime-Camの約7倍) を誇る、すばる望遠鏡の新たな主焦点装置HSCを用いた大規模可視光サーベイ観測プロジェクトである。サーベイは2014年春に開始しており、300夜を投じて約1,400平方度の領域が観測される予定である。HSC-SSPサーベイの初年度データは2017年2月に全世界公開され^{18), 19)}、このデータを用いた計40本の論文が日本天文学会欧文研究報告の特集号にまとめられた*⁶。この特集号の詳細については今後発行予定の天文月報でも紹介される予定である。

6.1 Subaru High- z Exploration of Low-Luminosity Quasars (SHELLQs)

HSC-SSPにはWide, Deep, Ultra-Deepという三つの領域と深さの異なるサーベイがあるが、そのうち最も広視野を掃くWideサーベイを用いて $z\sim 6, 7$ クェーサー探査プロジェクトが進んでいる。本プロジェクトは愛媛大学の松岡良樹氏を筆

頭に国内外の40名以上の研究者が参加しており、Subaru High- z Exploration of Low-Luminosity Quasars (SHELLQs) というプロジェクト名が付いている。本稿では詳細は割愛するが*⁷、効率的な候補選択と分光追観測の結果、2018年5月現在60個を超える $z\sim 6, 7$ クェーサーがHSC-SSP初年度データを基に発見されている²⁰⁾⁻²²⁾。この発見数はすでに欧米の $z\sim 6$ クェーサー探査での発見数に肩を並べており、さらに発見されたクェーサーの大半がSuprime-Camクェーサーと同程度に暗いという意味で非常にユニークなサンプルとなっている。

6.2 $z>6$ SMBH 質量測定

クェーサーの光度の情報だけでは中心SMBHの質量と質量降着率 (エディントン比) が縮退しているためブラックホールとしての性質を調べるためには質量測定のための追観測が必要になる。筆者は、これまで発見されたSHELLQsクェーサーのうち、合計6天体についてVLT/XSHOOTER, Gemini/GNIRSでの近赤外追観測を行ってきた。これらのターゲットは $z>6$ でBH質量が測られたサンプルとしては最も暗い。図4はVLT/XSHOOTERで観測した3天体の可視+近赤外スペクトルである。本観測の結果、ターゲットのクェーサーから連続光とC IV, Mg IIといったクェーサーの広輝線領域由来の輝線を検出した。これらは遠方クェーサーのBH質量測定によく使われる重要な輝線である。また、いくつかのクェーサーについては特徴的なスペクトルをもっていることがわかった。特に今回のターゲットの中で最も赤方偏移が大きいHSC J1205-0000 ($z=6.71$) は他の二つと比べて連続光成分がフラットであり (普通のクェーサーの場合、長波長側にかけて緩やかに減衰していく)、母銀河のダスト減光を強く受けた “red

*⁵ フィットにはS. Parsaらの分光同定されていない暗い候補天体による結果¹⁷⁾ も含めた。

*⁶ すばるウェブリリース: https://subarutelescope.org/Topics/2018/02/26/j_index.html

*⁷ 今後発行予定の天文月報での長尾透氏と松岡良樹氏の解説記事を参照されたい。

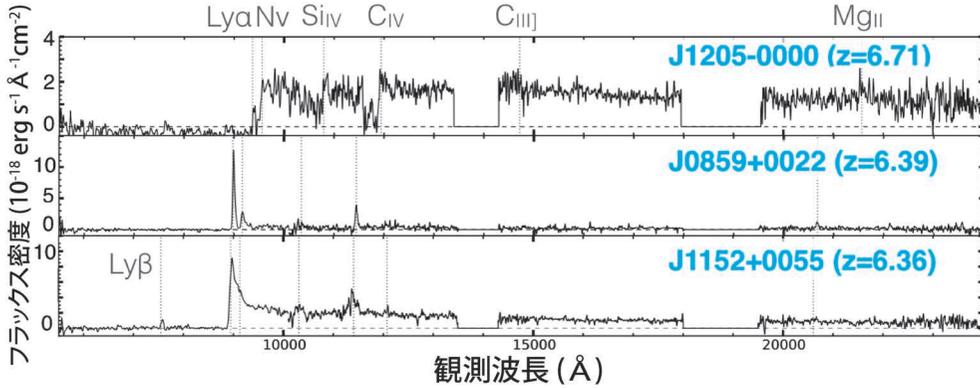


図4 VLT/XSHOOTERで取得したSHELLQsクェーサー3天体の可視+近赤外スペクトル(上段: J1205-0000, 中段: J0859+0022, 下段: J1152+0055)。大気吸収が強い観測波長~14,000-19,000 Åの範囲のスペクトルは除外した。各図の点線はクェーサーの赤方偏移から期待される代表的な輝線の位置を表す。

quasar”と呼ばれる種族である。クェーサーの進化段階の中でダストに埋もれた激しい星形成とダストが晴れた通常のクェーサーの中間段階にあり、星形成とBH成長が最も活発な段階と考えられる。実際、J1205-0000のスペクトルのC IV, N v輝線の青い側に見える強い吸収は降着円盤への激しい質量降着に伴うアウトフローの存在を示唆する。

次にBH質量測定である。遠方クェーサーの場合よく用いられるのが“single-epoch method”と呼ばれる経験的な手法で、SMBHから0.01 pcスケールに広がる広輝線領域ガスが中心ブラックホールに重力的に束縛されていると仮定すると、輝線の線幅と連続光の光度からSMBH質量が推定できる*8。図5(上)がこの手法を使った測定結果を示す。得られたBH質量は $M_{BH} \sim 10^{7-9} M_{\odot}$ となり、 $z > 6$ 低光度クェーサーであるSHELLQsクェーサーは多様なBH質量(および質量降着率)をもっていることがわかった。これは $z > 6$ の明るいクェーサーで知られていた傾向とは異なる。前述したJ1205-0000のエディントン比は大きくエディントン限界を超えており、red quasarの段階

でSMBHが非常に効率よく成長するというシナリオと合致する。もう一つ興味深いのはBH質量 $M_{BH} \sim 10^9 M_{\odot}$ でエディントン比が低い(~ 0.1)の種族が $z > 6$ で初めて見つかったことである。これらは観測されたエディントン比で連続的に質量成長したとすると初代天体が生まれたとされる $z \sim 30$ までさかのぼっても種ブラックホールで期待される質量範囲に入らない(図5下)。よってこれらについては常に低い降着率でゆっくり成長してきたと言うよりは、むしろ昔はエディントン限界付近(あるいはそれ以上)で活発に成長していたものの、 $z > 6$ のどこかで成長がすでに落ち着いてしまった段階にあると考えられる。これらは同じ時代に発見されている $M_{BH} \sim 10^{10} M_{\odot}$ のSMBHと同様に初期宇宙で最も早く成長したBH種族であり、 $z > 6$ でもすでにSMBH成長の抑制が働いていたと言う意味で、SMBH初期進化について新たな疑問を投げかける結果である。

7. 今後の展開

われわれはすばる望遠鏡、特にHSC-SSPを用いて $z > 6$ 低光度クェーサー探査を進めており、

*8 本研究ではMg II輝線を用いた手法²⁵⁾を用いた。

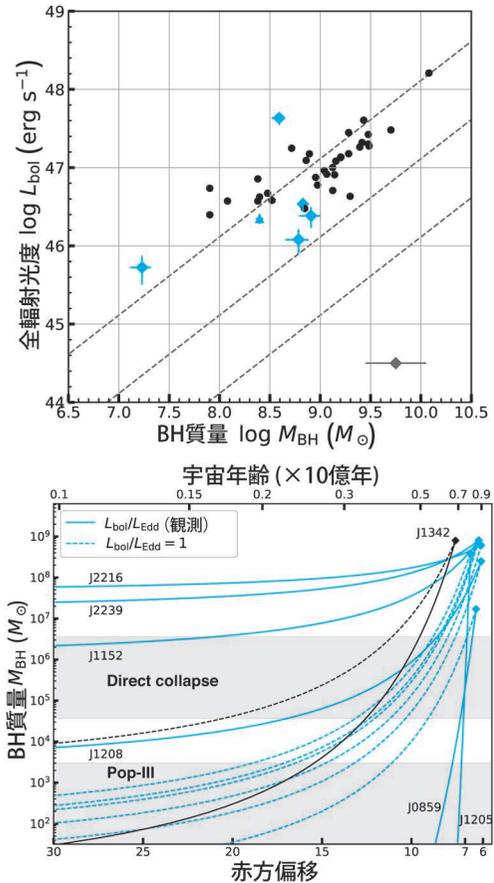


図5 SHELLQsクェーサーのBH質量測定の結果. 上段: 得られたBH質量と光度の分布 (青: SHELLQsクェーサー, 黒: 他のサーベイで発見されたSMBH質量が測られた $z > 6$ クェーサー). Single-epoch methodによるSMBH質量測定の見かけの系統誤差 (0.3 dex) を右下に示した. 図の斜線は各 M_{BH} に対応するエディントン比 (左上から1, 0.1, 0.01). なお, 低赤方偏移SDSSクェーサーのエディントン比は典型的に0.01-0.1程度である. 下段: 定常的な質量降着を仮定したときの $z \sim 6-30$ での質量進化. 青はSHELLQsクェーサー, 黒は最遠方の $z = 7.5$ クェーサー (J1342+0928). 実線は観測されたエディントン比, 破線はエディントン比1の場合をそれぞれ表す. 原始ガス雲の重力崩壊から生まれる種ブラックホールの質量範囲 ($M_{\text{seed}} = 10^{5-6} M_{\odot}$) とPop-III星起源の種ブラックホールの質量範囲 ($M_{\text{seed}} \lesssim 10^3 M_{\odot}$) を灰で示した.

宇宙空間で稀な遠方クェーサーの大量発見に成功している. 今後は構築した大サンプルから $z > 6$ クェーサーの性質について統計的に迫ることが期待される. 第5章で示したように, $z > 6$ クェーサー光度関数の制限は再電離の理解にとって非常に重要である. また, これらのBH質量測定によって $z > 6$ でのBH質量関数を低質量側まで制限することができればSMBHの初期進化や種ブラックホールについての情報が引き出せるだろう. 本稿で述べた近赤外線追観測以外にも, SHELLQsクェーサーの多波長追観測は活発に進んでいる. 例えば, ALMAを用いたクェーサー母銀河観測から $z \sim 6$ 低光度クェーサーの母銀河の星形成活動は明るいクェーサーと対照的に穏やかで, またSMBH-母銀河質量比が近傍の関係と同程度である傾向が見えている²³⁾. よって, どうやら先行研究で言われていた $z > 6$ クェーサーの特異的な性質はサンプルの明るさに大きくバイアスされていたようである. 今後はJWSTなどの次世代望遠鏡も含めてSHELLQsクェーサーのさらなる多波長追観測を展開し, 再電離史やSMBH初期成長史の理解を深めることを目指す.

謝辞

本稿の科学的な内容は, 筆者の博士論文, および投稿論文^{24), 25)}に基づいている. HSC-SSPの観測が始まる直前という非常に良いタイミングで大学院に入学し, プロジェクトを通じて国内外の著名な研究者の方々とともに研究活動ができたことはたいへんな幸運である. 特に指導教官である柏川伸成氏, 宮崎聡氏, 田中賢幸氏, ならびに松岡良樹氏をはじめとするSHELLQsプロジェクトメンバーの方々に, 筆者が大学院生として過ごした5年間を支えてくださったことへの感謝を申し上げます. また, 今回の執筆の機会を与えてくださった小宮山裕氏にも感謝申し上げます.

参考文献

- 1) Iye, M., et al., 2006, Nature, 443, 186
- 2) Ono, Y., et al., 2012, ApJ, 744, 83
- 3) Shibuya, T., et al., 2012, ApJ, 752, 114
- 4) Kodaira, K., et al., 2003, PASJ, 55, L17
- 5) Oesch, P. A., et al., 2016, ApJ, 819, 129
- 6) Fan, X., et al., 2006, AJ, 132, 117
- 7) Becker, G. D., et al., 2015, MNRAS, 447, 3402
- 8) Mortlock, D. J., et al., 2011, Nature, 474, 616
- 9) Bañados, E., et al., 2018, Nature, 553, 473
- 10) 稲吉恒平, 2015, 天文月報, 108, 5
- 11) Wu, X.-B., et al., 2015, Nature, 518, 512
- 12) Shen, Y., et al., 2008, ApJ, 680, 169
- 13) Venemans, B. P., et al., 2016, ApJ, 816, 37
- 14) Jiang, L., et al., 2016, ApJ, 833, 222
- 15) Bañados, E., et al., 2016, ApJS, 227, 11
- 16) Giallongo, E., et al., 2015, A&A, 578, A83
- 17) Parsa, S., et al., 2018, MNRAS, 474, 2904
- 18) Aihara, H., et al., 2018, PASJ, 70, S4
- 19) Aihara, H., et al., 2018, PASJ, 70, S8
- 20) Matsuoka, Y., et al., 2016, ApJ, 828, 26
- 21) Matsuoka, Y., et al., 2018, PASJ, 70, S35
- 22) Matsuoka, Y., et al., 2018, ApJS, 237, 5
- 23) Izumi, T., et al., 2018, PASJ, 70, 36
- 24) Kashikawa, N., et al., 2015, ApJ, 798, 28
- 25) Onoue, M., et al., 2017, ApJ, 847, L15
- 26) Vestergaard, M., & Osmer, P. S., 2009, ApJ, 609, 800

Exploration of the Reionization Epoch with Low-Luminosity Quasars Based on Wide Field Surveys

Masafusa ONOUE

Max Planck Institute for Astronomy, Königstuhl 17, Heidelberg 69117, Germany

Abstract: A quasar within the first billion years of the universe is one of the key observational probes of the early universe. The efforts to find high-redshift quasars at $z \sim 6, 7$, which are quite rare, have started in the 2000's with the SDSS, which have provided knowledge about the cosmic reionization history and the early growth of super massive black holes. However, most of the previous $z > 6$ quasars known were the most luminous populations limited by the survey depths, which may bias our understanding of the reionization and the black hole growth. To overcome the situation, we have searched for low-luminosity quasars at $z \sim 6, 7$ based on the wide-field surveys with the Subaru telescope. In this article, I present the status of our quasar search projects and the recent results of the multi-wavelength follow-up observations.