

令和元年5月21日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H03645

研究課題名(和文) 超遠方クェーサーを用いた初代ブラックホール形成と宇宙再電離の解明

研究課題名(英文) Study of early black hole formation and cosmic reionization using high-z quasars

研究代表者

柏川 伸成 (Kashikawa, Nobunari)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・教授

研究者番号：00290883

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,080,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、すばる望遠鏡の大集光力と広視野撮像機能を駆使した系統的かつ独創的な手法によって、I)赤方偏移 z を超える超遠方QS0を多数発見し、またII)赤方偏移 z 付近の遠方QS0の特に暗い種族の統計的サンプルを構築することを狙った。本研究によって、従来の研究に比べて100倍暗い遠方クェーサーを89個発見した。これらのサンプルをもとに光度関数の評価、宇宙再電離に与える示唆、また赤方偏移 z を超える超遠方QS0の発見、また電波および近赤外追観測によって母銀河の力学的質量の測定とブラックホール質量測定を行い、銀河との共進化、および初期ブラックホール進化についての知見も成果論文として出版した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

巨大ブラックホールの誕生過程は謎に包まれており、宇宙初期にどの程度普遍的に存在するのか、そしてその個数密度はどれくらいか、といった基本的な事も分かっていなかった。これまでの探査では、現在の宇宙では珍しいような、最重量級の巨大ブラックホールに限られていた。本研究では、最新鋭の超広視野主焦点カメラHSCを用いた300夜に渡る大規模な探査観測を通じて、83個の超遠方クェーサーを新発見することに成功した。これらは従来知られていたクェーサーのわずか数パーセント程度の明るさで、今回初めてその微弱な光をとらえ、普通の重さの巨大ブラックホールが超遠方宇宙にも多数存在することを初めて明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This study aimed to I) discover high- z quasars at $z > 7$, and II) construct a statistical sample of $z \sim 6$ quasars at $z \sim 6$, by using both a great light-gathering power and a wide-field imaging capability of Subaru telescope. In this study, we found 89 quasars, which is 100 times fainter than the previous sample, at $z \sim 6$, increasing significantly the number of quasars at this epoch. Based on the sample, we measured the luminosity function, estimate the photon budget to the reionization, and discovery of a $z \sim 7$ quasar. We also measure the dynamical mass and black hole mass by the following radio and near-infrared observations, and published the papers on the coevolution with galaxies, and the initial evolution of black holes.

研究分野：初期宇宙、銀河天文学

キーワード：初期宇宙 ブラックホール 宇宙再電離 銀河形成 銀河共進化

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

1) 研究の背景

クエーサー (以下 QSO) とは、宇宙で最も明るく輝く天体の 1 つで、その銀河の約 100 倍もの明るさゆえ、はるか遠方にあっても観測可能な、遠方 (初期) 宇宙を探る上で欠かせない重要な天体となっている。近年、スローンデジタルスカイサーベイ (Sloan Digital Sky Survey: 以下 SDSS) 計画によって赤方偏移 6 (127 億年前) 付近の遠方 QSO が数多く発見された。これら遠方 QSO は初期宇宙における超巨大ブラックホール (Super Massive Black Hole: 以下 SMBH) の形成過程を理解するための重要な観測対象である。一般的に QSO のその明るく輝く活動性は、太陽の 108.9 倍の質量を持つ SMBH への質量降着によって維持されると考えられているが、宇宙が誕生して 10 億年という短い間にどうやってこれだけの大質量天体が生まれたのかは大きな謎となっている。QSO の質量降着率にはある上限があり、仮にこの上限の降着率を保持したとしても 10 億年の間にはこれほど大質量にはなりえないからである。このパラドックスを説明するための QSO および SMBH 形成モデルがいくつか提唱されているが、残念ながらそれらの妥当性を観測的に制限するためには暗い遠方 QSO の数がまだまだ少なく、同時にさらに遠方の QSO の存在が重要な決め手となる。

一方、遠方 QSO は手前の宇宙を照らし出す明るい「灯台」としての役割も果たしている。ビッグバン後、宇宙の断熱膨張によって宇宙空間のガスはいったん冷えて、陽子と電子が結合し電氣的に中性化するが、やがて登場する原始天体から発生する強い紫外線によって、再び陽子と電子に分かれる再電離という現象をおこしたと考えられている。この宇宙再電離は間違いなく宇宙の歴史上の一大イベントであるが、それがいつどのように始まり、どのように進行したかは未だに解明されていない。宇宙初期の QSO の手前の銀河間空間に未だ電離していない中性水素が充満していると、QSO からの光は連続的に吸収を受け、逆にこの吸収量を測定すれば宇宙空間の「電離度」を知ることができる。SDSS の観測結果によると、赤方偏移 6 の時期を境にしてこの宇宙の電離度が飛躍的に変化することがわかり (Fan et al. 2006, AJ, 132, 117)、この時期に急激に宇宙再電離が終焉を迎えたことがわかってきた。さらに、この電離度の測定値が QSO によってかなりまちまちであることからこの再電離という過程が空間的に非一様に進行したことが示唆されている。宇宙再電離を理解するためには、さらに遠方の QSO を使った電離度の進化や、多数の遠方 QSO を用いた電離度の空間的非一様性の定量化が急務となっている。

このように遠方 QSO に関する初期宇宙の研究は、確かに SDSS によって飛躍的に進歩をとげたが、2m 望遠鏡を使ったこの計画で見つかった QSO は非常に明るいものに限られており、しかも可視光の観測に限定されている。現在でも、赤方偏移 7 の QSO はわずか 4 天体しか発見されていない。QSO の個数密度は赤方偏移 2 (100 億年前) をピークとし、過去に遡るにつれて急激に減少する (図 1 左)。したがって赤方偏移 7 の超超遠方 QSO を多数見つけるためには、より大きな望遠鏡による広視野観測が不可欠となっている。

2. 研究の目的

本研究では、I) 赤方偏移 7 を超える超遠方 QSO を多数発見し、また II) 赤方偏移 6 付近の遠方 QSO の暗い種族の統計的サンプルを構築することを目的とする。最終的に次の 2 点を明らかにしたい。

1) 初代 SMBH 形成過程の観測的制限

宇宙で最初にできた SMBH は、質量の小さな「ブラックホールの種」が合体してできたと考えられている。この種としてどんな天体を想定するかによって、赤方偏移 6 における暗い遠方 QSO の数 (Hopkins et al. 2007, APJ, 654, 731)、あるいは赤方偏移 6.5 を超える超遠方 QSO の個数 (Volonteri 2013, Science, 337, 544) が大きく異なることが予想されている。つまり SMBH 形成の理解のためには I と II の目的達成が本質的に重要であることがわかる。本研究の観測によってこれらを初めて観測的に明らかにしたい。

2) 宇宙再電離過程の観測的制限

多数の暗い遠方 QSO が見つければ、その中性銀河間ガスによる吸収量の測定によって、空間的に宇宙の電離度がどのようなばらつきと相関を持っており、電離源としての QSO や銀河の分布とどのように関係しているのかを知ることができる。これは II のサンプルを用いて宇宙再電離の空間的非一様性を定量化する初めての試みである。また I と II のサンプルを組み合わせることで時代を遡り、一貫した手法で電離度の進化を追うことによって、宇宙再電離の歴史を明らかにしたい。

3. 研究の方法

本研究では SDSS 計画よりも約 5 等級 (100 倍暗い) 深いところまで撮像観測する予定である。また研究対象の極めて低い個数密度を考えると広視野観測が必須であり、現在ではこの機能を

持つ日本のすばる望遠鏡だけがこの科学目標を獲得できる唯一の地上大型望遠鏡である。超遠方 QSO を検出するためには、そのスペクトル上の最大の特徴であるライマンブレイクを同定するために、通常は天体の色を用いる。ところが、晩期型星も QSO とほぼ同じ赤い色を持つために、この色選択では、その混在が致命的な問題となっていた。これらの晩期型星の個数密度は QSO とほぼ同程度であり、QSO 検出の大きな妨げとなる。そこで研究代表者らは、多色撮像データを有効に活用し、スペクトルモデルと直接比較することによって QSO と晩期型星を区別する手法を編み出した。平成 26 年 3 月から、すばる望遠鏡の新しい観測装置ハイパーシュープリームカム (HSC) を用いた大規模かつ系統的な宇宙探査計画 (以下「HSC サーベイ」) サーベイが開始された。この装置はこれまでのすばるの広視野撮像観測の効率を約 5 倍に高めるものである。本研究はこの HSC サーベイに同期させており、の研究分野で集中的な研究成果を得ることを狙っている。

以上のように本研究では、すばる望遠鏡の 1) 集光力と 2) 広視野撮像機能、及び 3) 効率的な選択手法を用いて I・II の目的を達成したい。この 3 つの有効な手段を組み合わせる計画を持っているのは本研究グループだけであるが、世界的には同種の研究を計画しているグループもあるが (アメリカの LSST、PAN-STARRS)、本研究が先行している。広視野観測によってその発見確率を十分高めた上で遠方クェーサーの個数を量的に見積もることこそが、SMBH 形成モデルへの観測的制限を与える。以上のように、観測としては、1) QSO 候補を見つけるための HSC による広視野撮像観測、2) QSO であることを確定するための分光観測が大きな柱となっている。

4. 研究成果

本研究では、すばる望遠鏡の大集光力と広視野撮像機能を駆使した系統的かつ独創的な手法によって、I) 赤方偏移 7 を超える超遠方 QSO を多数発見し、また II) 赤方偏移 6 付近の遠方 QSO の特に暗い種族の統計的サンプルを構築することを目的とする。これらはいずれも技術的な問題によりこれまでその達成が不可能であった。これにより、現代天文学の大問題となっている、1) 初代ブラックホールの形成過程、及び、2) 宇宙再電離の過程、を解明する。これら初期宇宙に関する 2 つの未解決過程について初めて実効的な観測のメスを入れ、飛躍的な理解を得ることが、本研究の 2 本の大きな柱である。海外の同様な観測計画に対して既にリードしているこれまでの研究をさらに発展させ、周辺分野に波及するような初期宇宙の研究におけるブレークスルーを狙う。

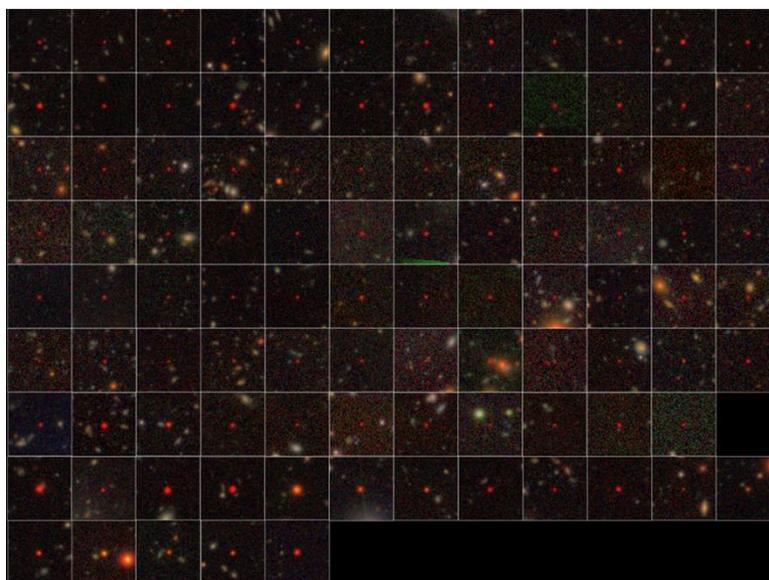


図 1 : 本研究で発見した約 100 個の超遠方クェーサーの画像。各パネルの中央に写っている赤い点がクェーサー。画像は全て、すばる望遠鏡の超広視野主焦点カメラ HSC による探査観測で得られたもの。

HSC サーベイ観測は当初予定に比べて若干の遅れがあるものの概ね順調に進行した。しかしながら、2018 年 1-3 月にかけての観測が記録的な天候不順によりほとんど実行されなかった。追観測について時間獲得にも成功しており、すばる望遠鏡以外での観測結果は得られているものの、すばるによる観測はいずれも悪天候によってストップされている。それでも撮像観測から効率的にクェーサー候補を選択するためのプロセスを確立し、HSC データに適用し初期成果として 15 個の遠方クェーサーならびに遠方銀河を発見することができた。このプロセス、取得されたデータの解析、近赤外撮像データとの照合、分光追観測について成果論文にまとめた。

2017 年以降は撮像観測からクェーサー候補を選択し、追観測することによって確定されたクェーサーサンプルを増やすという作業を精力的に行った。追観測は、すばる望遠鏡、大カナリア望遠鏡、ジェミニ望遠鏡という 3 つの大口径望遠鏡を用いて行った。その結果、従来の研究に比べて 100 倍暗い遠方クェーサーを 89 個 (これまで見つかった個数は 2 個) に大きく増加させることができた (図 1)。従来知られていたクェーサーのわずか数パーセント程度の明るさの

クェーサーの微弱な光をとらえ、普通の重さの巨大ブラックホールが超遠方宇宙にも多数存在することを初めて明らかにした。これらのサンプルをもとに光度関数の評価を行い、宇宙再電離に与える示唆、また赤方偏移 7 を超える超遠方 QSO の発見 (図 2) を成果論文としてまとめた。今回の探査によって個数密度が初めて精密測定され、宇宙空間全体をプラズマ化できるほど多数の超遠方クェーサーは存在しないことが明らかとなり、クェーサーによる再電離の仮説は棄却されることになった。再電離を引き起こした

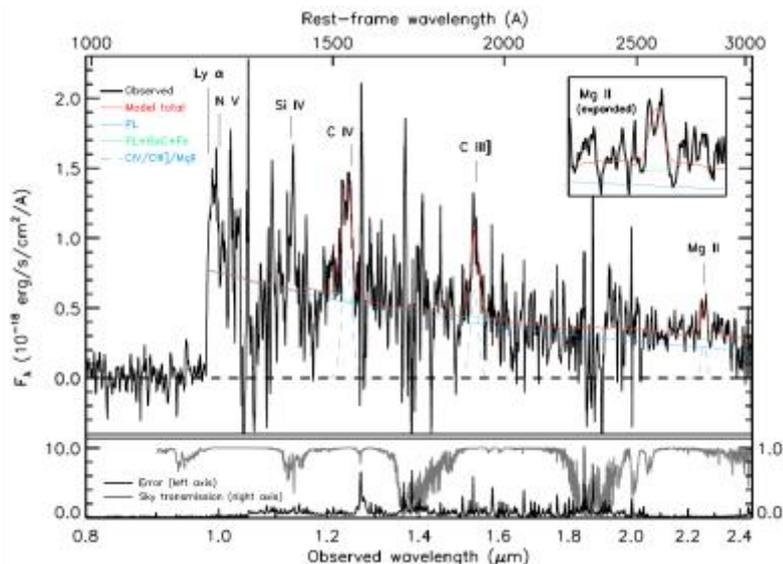


図 2 : 本研究で発見した超遠方クェーサー ($z=7.07$) のスペクトル。

のは別のエネルギー源、おそらくは初期の宇宙で誕生しつつある多数の銀河ではないかと推測される。また電波追観測および近赤外追観測によって、母銀河の力学的質量の測定とブラックホール質量測定を行い、銀河との共進化、および初期ブラックホール進化についての知見を成果論文として出版した。 $z=6$ の時代のクェーサーは従来指摘されていたほど極端に降着率が大きいものや銀河質量が大きいものばかりではないことを初めて系統的に示した。

一方、平行して進めている初期銀河団探査についてもさらにサンプルを増やし、分光対観測を行った。HSC 初期データからのサンプルに基づいて、サンプルの構築・性質、AGN との相関、ペアクェーサーとの相関、をそれぞれテーマに 3 本の査読論文を受理させた。内外で高い評価を得ており、すばる望遠鏡のホームページで一般社会に向けてウェブリリースを行った。さらにサブミリ銀河との相関、銀河団中心銀河についての研究をスタートさせ、現在論文準備中である。2 年前から開始した新たな発展研究として、クェーサー吸収線系から探る原始銀河団探査、クェーサー周辺環境における銀河形成、なども海外の研究者と協力しながら継続して行っている。当初、観測トラブルなどにより期待以下の品質のデータしか獲得されなかったが、今年に入って良質のデータが得られ、期待通りの成果があがりつつある。

3 年前から新たな着想に基づいた赤方偏移 7 を超えるより遠いクェーサーを検出するための観測装置開発計画を進めている。検出器に対して多くの問題点を洗い出すとともに、将来的なサブベイ計画の検討を開始した。検出器の最終目標スペックはまだ得られていないものの、一定の検出器性能を達成することができた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 44 件)

- ① Izumi Takuma, Onoue Masafusa, Shirakata Hikari, Nagao Tohru, Kohno Kotaro, Matsuoka Yoshiki, Imanishi Masatoshi, Strauss Michael A, Kashikawa Nobunari et al. “Subaru High- z Exploration of Low-Luminosity Quasars (SHELLQs). III. Star formation properties of the host galaxies at $z \sim 6$ studied with ALMA”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 2019, 70, 36, DOI 10.1093/pasj/psy026
- ② Matsuoka Yoshiki, Iwasawa Kazushi, Onoue Masafusa, Kashikawa Nobunari et al., “Subaru High- z Exploration of Low-luminosity Quasars (SHELLQs). IV. Discovery of 41 Quasars and Luminous Galaxies at $5.7 < z < 6.9$ ”, The Astrophysical Journal Supplement Series, 査読有, 2019, 237, 5, DOI 10.3847/1538-4365/aac724
- ③ Matsuoka Yoshiki, Strauss Michael A., Kashikawa Nobunari et al., “Subaru High- z Exploration of Low-luminosity Quasars (SHELLQs). V. Quasar Luminosity Function and Contribution to Cosmic Reionization at $z = 6$ ”, The Astrophysical Journal, 査読有, 2019, 869, 150, DOI 10.3847/1538-4357/aaee7a
- ④ Matsuoka Yoshiki, Onoue Masafusa, Kashikawa Nobunari et al. “Discovery of the First Low-luminosity Quasar at $z > 7$ ”, The Astrophysical Journal, 査読有, 2019, 872, L2, DOI 10.3847/1538-4357/aadfe4
- ⑤ Matsuoka Yoshiki, Strauss Michael A., Kashikawa Nobunari et al., “Subaru High- z

Exploration of Low-luminosity Quasars (SHELLQs). V. Quasar Luminosity Function and Contribution to Cosmic Reionization at $z = 6$ ", The Astrophysical Journal, 査読有, 2018, 869, 150, DOI 10.3847/1538-4357/aaee7a

[学会発表] (計 17 件)

- ① Nobunari Kashikawa, "High- z protocluster survey by Subaru/HSC", Chile-Japan Academic Forum 2018, 2018
- ② Kashikawa, Nobunari, "High- Z Protocluster Survey by Subaru/HSC", Early stages of Galaxy Cluster Formation (GCF) 2017: Mergers, Protoclusters, and Star Formation in Overdense Environments, 2017
- ③ Nobunari Kashikawa, "Wide survey for early universe by Subaru/HSC", Dawn of galaxies 2017, 2017
- ④ Nobunari Kashikawa, "IGM/CGM probed by PFS", PFS-SSP galaxy survey workshop, 2015

[その他]

超遠方宇宙に大量の巨大ブラックホールを発見 すばる望遠鏡の最新鋭カメラで稀少天体を発見

https://www.u-tokyo.ac.jp/focus/ja/articles/z0508_00112.html

超遠方宇宙に大量の巨大ブラックホールを発見

<https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/info/6291/>

研究室の扉「初期の宇宙に大量のブラックホールがあった」

<https://youtu.be/3EjFB4kAJFw>

宇宙は原始銀河団であふれている

https://www.subarutelescope.org/Pressrelease/2018/03/04/j_index.html

6. 研究組織

研究代表者のみ

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。