

令和 5 年 5 月 8 日現在

機関番号：16301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H04830

研究課題名（和文）宇宙黎明期における巨大ブラックホールと銀河の大規模探査

研究課題名（英文）Exploration of supermassive black holes and galaxies in the early universe

研究代表者

松岡 良樹 (Matsuoka, Yoshiki)

愛媛大学・宇宙進化研究センター・准教授

研究者番号：60547545

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 18,500,000円

研究成果の概要（和文）：すばる望遠鏡の広域撮像データを用いて、宇宙黎明期（赤方偏移6-7）における巨大ブラックホールと銀河の探査を実施した。100個以上の新天体を発見し、その数密度から、赤方偏移6におけるクエーサー光度関数を決定するとともに、理論モデルとの比較からクエーサーが宇宙再電離の主要な起源ではないことを明らかにした。また各発見天体に対する多波長追観測を大規模に実施し、それらの形成・進化に関する新たな知見を獲得した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題による新天体発見数は特筆すべきもので、現在人類の知る最遠方クエーサーのうち、半数近くは本課題による発見となっている。それらの追観測・研究が世界中で計画されており、今後大きく長い研究の潮流を生むことが期待される。また光度ごとの数密度を表す「光度関数」は、あらゆる天体種族の最も基礎的な観測量であり、最遠方クエーサーでこの関数を決定したことの意義はその根本的理解の上で極めて大きい。クエーサーのエネルギー源である巨大ブラックホールについては一般市民からの関心も高く、その本質に迫る世界最先端の成果を得たことの社会的意義も大きいものと考えている。

研究成果の概要（英文）：This program has carried out a search for supermassive black holes and galaxies in the cosmic dawn (redshifts 6 - 7), using the wide-field imaging data obtained by the Subaru Hyper Suprime-Cam. We discovered more than 100 new objects in the distant universe, and established the quasar luminosity function at redshift 6. By integrating the luminosity function and comparing with theoretical models, we revealed that quasars are not a major contributor to cosmic reionization. Systematic follow-up observations have been carried out toward the individual discovered quasars with multi-wavelength facilities, shedding new light on the formation and evolution of those early quasars and their host galaxies.

研究分野：光学赤外線天文学

キーワード：遠方クエーサーの発見・調査

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

宇宙誕生直後 10 億年の黎明期には、やがて現在 (宇宙年齢 137 億年) の宇宙の姿を規定することになる多くの重要な事象が起こったと考えられている。はじめ電離状態にあった宇宙は「晴れ上がり」の時期に中性化し、天体存在前の暗黒時代を経て、やがて初代の星・銀河・巨大ブラックホールが誕生する。それら初代天体の放射によって宇宙は再電離され、現在の完全電離状態に落ち着いたとされる。この再電離前後の時期、宇宙年齢 5 - 10 億年の頃が、現代の観測天文学・宇宙物理学のフロンティアである。ハッブル宇宙望遠鏡などを用いた超高感度観測により、数密度が比較的高い小質量銀河が捉えられ始め、非常に活発な研究の対象となってきた。一方で巨大ブラックホールと大質量銀河は数密度が低く、高感度かつ超広視野の探索が必要なことから、その発見と研究は遅れていた。これら巨大ブラックホールと大質量銀河は、宇宙空間の物質密度揺らぎの極大地点に形成され、当時の宇宙において暗黒物質・バリオンの構造進化が最も進んだ場所を示す貴重な灯台と予測されている。

巨大ブラックホールは、時に太陽 10 億個分以上にも達する莫大な質量を持ち、銀河と同様に宇宙に普遍的に存在する。少なくとも近傍のほぼ全ての中・大質量銀河の中心に宿り、その進化は宿主である母銀河の進化と分ち難く結びついていることが、過去 20 年ほどの観測で明らかにされてきた(「共進化」と呼ばれる)。しかしこれほど巨大なブラックホールが、宇宙史の中のいつ、どこで、どのように誕生し、いかにして母銀河の中心に落ち着いたのかは、未だ解明されていない。その謎を直接的に解き明かすためには、宇宙黎明期における探査が不可欠である。宇宙年齢 10 億年頃にはすでに最大質量級の巨大ブラックホールが観測されることから、それらの誕生と初期成長の舞台は、より若い宇宙にあると考えられるためである。また初期成長中の巨大ブラックホールの周囲では、同時に宇宙初代の大質量銀河も形成されつつあると予測される。

その科学的意義の大きさから、宇宙黎明期の巨大ブラックホール探査はこれまでも行われて来た。ブラックホール自体は光らないが、物質を吸い込んで成長する際に、それら物質が持つ重力エネルギーの一部を変換して周辺領域から莫大な光を放つ。この現象のうち特に高光度のもの(及びその高光度現象を伴う天体)は「クエーサー」と呼ばれ、超遠方にあっても観測可能である。このクエーサー光を目印とした先行探査によって、宇宙年齢 7.5 - 10 億年頃に相当する遠方(宇宙膨張によるスペクトル赤方偏移量 $6 \leq z \leq 7$)に、数十天体の巨大ブラックホールが発見されていた。当時知られた最も遠い(最も過去の)ブラックホールは、宇宙年齢 7.5 億年 ($z = 7.085$) に存在していた。しかし先行探査はいずれも比較的小口径の望遠鏡を用いたため、観測感度の限界から、極端に明るいクエーサーを伴う特殊なブラックホールしか検出されておらず、致命的とも言える強い選択バイアスを生む結果となってきた。

2. 研究の目的

本研究は、最先端観測機器を用いたかつてない超高感度・広視野の探査観測を実現し、宇宙黎明期における巨大ブラックホールと母銀河の普遍的な姿を、世界に先駆けて解き明かそうとするものである。宇宙年齢 10 億年未満(赤方偏移 $z > 6$)の最遠方宇宙に、多数の巨大ブラックホールを検出・調査する。先行探査に比べて 10 倍近い探査感度向上を実現し、遠方クエーサーの光度関数(光度の関数として存在数密度を表す、あらゆる天体種族の最も基礎的な観測統計量)を確立する。一方で理論モデルを整備し、観測との比較を通して、巨大ブラックホールの形成・進化に関する理解の向上を目指す。さらに光度関数をもとにして、宇宙再電離に対するクエーサーの寄与を推定することを目的とする。

3. 研究の方法

宇宙黎明期の巨大ブラックホールは数密度が極めて低く、観測されるクエーサー光も微弱なため、その探索には高感度・広視野の 2 つを兼ね備えた観測データが必要である。それを生み出す世界で初めての広域観測プロジェクトが、日本のすばる望遠鏡に搭載された最新装置 HSC によって、2014 年に開始された。そのうち「HSC Wide Survey (HWS)」と呼ぶサブプロジェクトでは、透過中心波長 0.48, 0.62, 0.77, 0.89, 0.97 μm の 5 つの波長フィルターを通して、広域 1200 平方度の空が観測された。HWS はすばるの世界最大級の口径を生かし、波長 0.77 μm で 26 等級という優れた観測感度を実現している。これは様々な先行広域探査に比べて、およそ 10 倍以上もの感度向上に相当する。本研究はこのデータを基礎として、遠方クエーサー探査を実施した。遠方の巨大ブラックホールを検出する唯一の方法は、そのクエーサー光を捉えることである。クエーサーは銀河系の星々と同じく、固有の広がり観測解像度よりも小さい点状天体として観測される。しかし星々とは大きく異なるスペクトルを持ち、可視光 - 近赤外線のある波長を境に、長波長側で突然明るくなるという特徴を示す。短波長側で暗いのは、遠方から宇宙空間を伝播してくる間に水素由来の強い吸収を受けるためである。従って観測される複数バンドの画像を精査し、このような明るさの特徴を示す点源を見つければ、それが遠方クエーサーの候補となる。本研究ではさらに進んで、地球から観測される星とクエーサーのスペクトルと光度・空間分布をモデル化し、実際に検出される個々の天体について、その各バンドでの明るさが遠方クエー

サー光で説明されるベイズ確率を導出した。次に有意なベイズ確率を持つ遠方クエーサー候補に対して、追分光観測を実施し、スペクトルを計測した。クエーサー光は巨大ブラックホールに吸い込まれる高温物質からの黒体放射、周辺電離領域からの輝線、宇宙空間を伝播中に受ける吸収などの重ね合わせにより、非常に特徴的なスペクトルを示す。このスペクトルにより、候補天体が巨大ブラックホール由来のクエーサーであることを確定させ、その存在した時代の宇宙年齢、ブラックホール質量などを決定することができる。一方でクエーサーの経験的モデルを作成して擬似的な観測・候補抽出を実施し、本研究による探査の完全性を、赤方偏移と光度の関数として推定した。この完全性と実際の発見天体の統計から、遠方クエーサーの光度関数を決定し、さらにその積分値によって、宇宙再電離への寄与を明らかにした。

4. 研究成果

本課題では非常に大きな成果を収めることができた。HWS の画像から 300 近くの最有望な候補天体を抽出し、すばる望遠鏡および大カナリア望遠鏡に潤沢な使用時間を獲得して、系統的なスペクトル測定観測を行った。その結果、200 天体近くの遠方クエーサーを新発見することに成功した。現在、最遠宇宙に人類の知るクエーサーのうち、半数近くは申請者らによる発見となっている（図 1 参照）。これら多数の発見天体により、赤方偏移 6 でのクエーサー光度関数を確立することができた。先行研究に比べ、特に低光度側ではるかに高い精度を実現している。この光度関数を積分した結果、この時代のクエーサーによる電離光子放射率は 1 立方メガパーセクあたり、1 秒あたりに $10^{48.8}$ 個であり、宇宙の完全電離状態を保つための臨界率に対して 1 桁ほど小さいことが明らかとなった。これは、クエーサーが宇宙再電離の主要な起源ではあり得ないことを強く示唆する結果である。

さらに発見天体に対して、すばる望遠鏡や欧州南天天文台の Very Large Telescopes などを用いた近赤外線観測を実施してブラックホール質量を測定し、それらのクエーサーが「緩やかに成長する大質量ブラックホール」から「急速に成長する比較的小質量のブラックホール」まで、連続的にさまざまな性質を持つことを突き止めた。加えてジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡による追観測を開始し、ブラックホール質量のみならず、母銀河に存在する星種族の年齢と質量を測定することで、初期宇宙における共進化の様子に制限を得ることができた。一方でサブミリ波帯でもアルマ望遠鏡による大規模な追観測を実施し、母銀河における星形成の様子や、銀河風によりその材料である星間物質が吹き飛ばされつつある様子などを捉えることに成功した。これらも早期の宇宙進化段階における共進化の存在を強く指し示すものである。

一方で理論モデルの構築を進め、特に N 体数値シミュレーションと準解析的モデルとの組み合わせにおいて、大きな宇宙体積の中でクエーサーの様子を精度よく追うことを可能にする新たな機構などを検討・導入した。このモデルは、観測との比較から巨大ブラックホールの形成・進化について新たな描像を得るための強力な礎となった。

なお本研究の後半に使用を予定していた東京アタカマ天文台 6.5m 望遠鏡は、建設スケジュールの遅れ等により研究期間内に運用を開始しなかったため、そのデータを得ることはできなかった。本課題成果に基づく近い将来の発展的研究において、力を発揮するだろうと期待される。

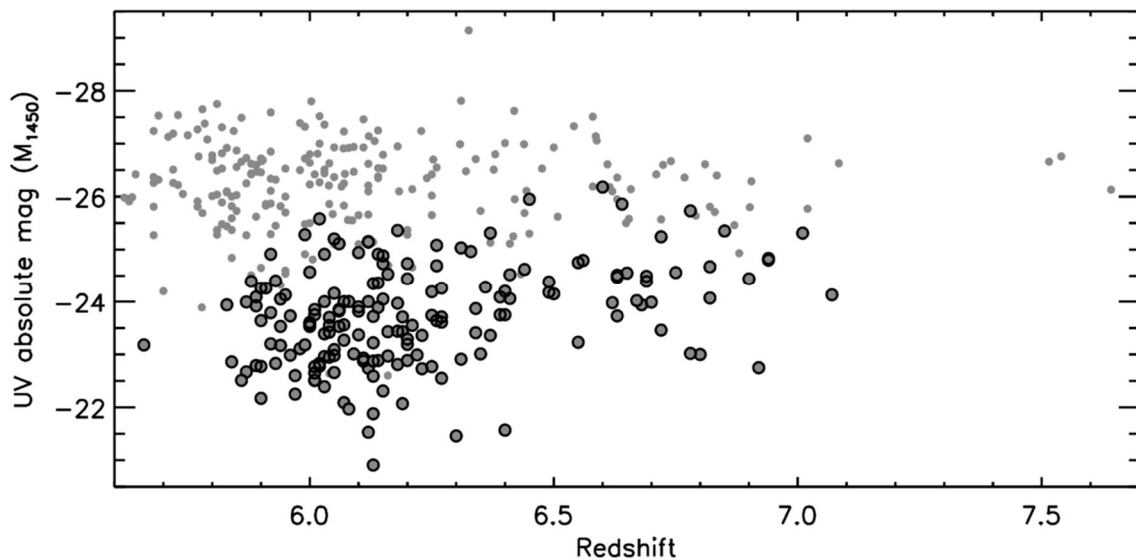


図 1：現在人類に知られる、宇宙最遠方の全てのクエーサー。横軸は赤方偏移を表し、数値が大きいほど遠方宇宙に対応する。縦軸は絶対等級であり、上ほど明るい。黒い縁取りのある濃い灰色の印が、申請者らが発見したクエーサーを表す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 9件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Izumi Takuma, Onoue Masafusa, Matsuoka Yoshiki, et al.	4. 巻 71
2. 論文標題 Subaru High-z Exploration of Low-Luminosity Quasars (SHELLQs). VIII. A less biased view of the early co-evolution of black holes and host galaxies	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 111
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz096	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Matsuoka Yoshiki, Iwasawa Kazushi, Onoue Masafusa, et al.	4. 巻 883
2. 論文標題 Subaru High-z Exploration of Low-luminosity Quasars (SHELLQs). X. Discovery of 35 Quasars and Luminous Galaxies at $5.7 < z < 7.0$	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 183 ~ 183
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab3c60	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Onoue Masafusa, Kashikawa Nobunari, Matsuoka Yoshiki, et al.	4. 巻 880
2. 論文標題 Subaru High-z Exploration of Low-luminosity Quasars (SHELLQs). VI. Black Hole Mass Measurements of Six Quasars at $6.1 < z < 6.7$	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 77 ~ 77
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab29e9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Matsuoka Yoshiki, Onoue Masafusa, Kashikawa Nobunari, et al.	4. 巻 872
2. 論文標題 Discovery of the First Low-luminosity Quasar at $z > 7$	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L2 ~ L2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab0216	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Matsuoka Yoshiki, Strauss Michael A., Kashikawa Nobunari, et al.	4. 巻 869
2. 論文標題 Subaru High-z Exploration of Low-luminosity Quasars (SHELLQs). V. Quasar Luminosity Function and Contribution to Cosmic Reionization at $z = 6$	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 150 ~ 150
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aeee7a	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Bosman Sarah E I, Fan Xiaohui, Jiang Linhua, Reed Sophie, Matsuoka Yoshiki, Becker George, Haehnelt Martin	4. 巻 479
2. 論文標題 New constraints on Lyman- opacity with a sample of 62 quasars at $z > 5.7$	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1055-1076
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty1344	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Matsuoka Yoshiki, Iwasawa Kazushi, Onoue Masafusa, et al.	4. 巻 237
2. 論文標題 Subaru High-z Exploration of Low-luminosity Quasars (SHELLQs). IV. Discovery of 41 Quasars and Luminous Galaxies at $5.7 < z < 6.9$	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Supplement Series	6. 最初と最後の頁 5 ~ 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4365/aac724	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Izumi Takuma, Onoue Masafusa, Shirakata Hikari, Nagao Tohru, Kohno Kotaro, Matsuoka Yoshiki, et al.	4. 巻 70
2. 論文標題 Subaru High-z Exploration of Low-Luminosity Quasars (SHELLQs). III. Star formation properties of the host galaxies at $z \sim 6$ studied with ALMA	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy026	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Y. Matsuoka, M. Onoue, N. Kashikawa, and 43 authors	4. 巻 70
2. 論文標題 Subaru High-z Exploration of Low-Luminosity Quasars (SHELLQs). II. Discovery of 32 quasars and luminous galaxies at $5.7 < z < 6.8$	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 id.S35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx046	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 Yoshiki Matsuoka
2. 発表標題 Quest for High-z Quasars with Subaru Hyper Suprime-Cam
3. 学会等名 Cosmic Evolution of Quasars: from the First Light to Local Relics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshiki Matsuoka
2. 発表標題 Subaru Intensive Searches for the Most Distant Quasars
3. 学会等名 Subaru User's Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshiki Matsuoka
2. 発表標題 Shedding New Light on the AGN Demographics with Prime Focus Spectrograph
3. 学会等名 Subaru Telescope 20th Anniversary Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshiki Matsuoka
2. 発表標題 SHELLQs: progress and prospects
3. 学会等名 Subaru Hyper Suprime-Cam AGN meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoshiki Matsuoka
2. 発表標題 Moving Forward from HSC to PFS
3. 学会等名 Subaru Hyper Suprime-Cam AGN meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoshiki Matsuoka
2. 発表標題 Subaru Intensive Searches for the Most Distant Quasars
3. 学会等名 Subaru User's Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshiki Matsuoka
2. 発表標題 Quest for the most distant quasars with Subaru
3. 学会等名 East Asia Observatory - Subaru Science Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshiki Matsuoka
2. 発表標題 SHELLQs: approaching 100 new quasars at $z > 6$
3. 学会等名 Formation and evolution of SMBHs revealed by 'Wide field', 'Multi-wavelength', and 'Transient' surveys with Hyper Suprime-Cam (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshiki Matsuoka
2. 発表標題 Subaru High-z Exploration of Low-Luminosity Quasars (SHELLQs): Progress report
3. 学会等名 Subaru User's Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshiki Matsuoka
2. 発表標題 Subaru wide-field survey for low-luminosity quasars in the reionization epoch
3. 学会等名 Distant Galaxies from the Far South (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yoshiki Matsuoka
2. 発表標題 Did low-luminosity quasars reionize the Universe? - A view from the Subaru HSC SSP survey -
3. 学会等名 East-Asia AGN sorkshop 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yoshiki Matsuoka
2. 発表標題 SHELLQs: contribution of low-luminosity quasars to cosmic reionization
3. 学会等名 HSC-AGN meeting (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yoshiki Matsuoka
2. 発表標題 SHELLQs: >50 high-z quasars in the first 3 years
3. 学会等名 Subaru HSC-SSP survey collaboration meeting (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>超遠方宇宙に大量の巨大ブラックホールを発見 https://cosmos.phys.sci.ehime-u.ac.jp/~yk.matsuoka/pr190313/index.html</p>

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	プリンストン大学			
スペイン	バルセロナ大学			
ドイツ	マックスプランク天文学研究所			
その他の国・地域	國立精華大学(台湾)			