

すばる望遠鏡を用いた大規模クエーサー探査による 巨大ブラックホール進化の研究

Revealing the cosmological evolution of supermassive black holes through a wide-field quasar survey with the Subaru Telescope

(日本天文学会推薦)

代表研究者	愛媛大学	長尾 透	Ehime University	Tohru NAGAO
協同研究者	プリンストン大学	マイケル シュトラウス	Princeton University	Michael STRAUSS
	鹿児島大学	和田 桂一	Kagoshima University	Keiichi WADA
	東京大学	諸隈 智貴	The University of Tokyo	Tomoki MOROKUMA

It has been observationally reported that supermassive black holes (SMBHs) reside at the nucleus of most massive galaxies, and their typical mass reaches up to a billion times the solar mass. Though the SMBH plays an important role in the evolution of galaxies, the physics behind the formation and evolution of SMBHs is totally unclear. For tackling this problem, we focus on quasars, that are very bright objects powered by the gravitational energy of SMBHs. Previous quasar surveys have found many quasars at various redshifts up to $z \sim 6-7$, but their relatively shallow sensitivities prevented us from detecting less-luminous quasars. Consequently the whole picture of the SMBH evolution during the cosmological timescale is not understood. This problematic situation is now completely resolved by a new wide-field camera, Hyper Suprime Cam (HSC) on the Subaru Telescope. We are now promoting a new quasar survey, based on the HSC legacy imaging campaign that started in March 2014 and will spend 300 nights of the Subaru telescope time. Using the initial dataset of the HSC observation for ~ 10 square degree, we successfully found 48 IR-luminous Dust-Obscured Galaxies (DOGs) that are dust-obscured quasars with a rapidly evolving SMBH.

研究目的

宇宙の基本構成要素である銀河の進化を考えようとしたとき、銀河中心核部に存在する巨大ブラックホールが重要な役割を担っていることが近年の観測により分かってきた。すなわち、銀河から中心核に流入するガスが巨大ブラックホールの質量成長を決める一方、その際に形成される降着円盤から莫大な放射エネルギーが発生して銀河全体での星形成の促進や抑制につながるなど、銀河と巨大ブラックホールは互いに影響を及ぼし合いながら進化してきたと考えられている。しかし現状では、

- (1) 太陽の数億倍もの質量を持つ巨大ブラックホールが宇宙のどの時代から存在するのか
- (2) 巨大ブラックホールが宇宙 138 億年の歴史の中でどのように進化を遂げてきたのか

(3) 空間スケールの全く違う銀河と巨大ブラックホールがどのように影響を及ぼし合うのかといった基本的問題でさえ全く理解が得られていない。

そこで我々は、巨大ブラックホールがガス降着により明るく輝いている天体であるクエーサーに注目し、以下に挙げる条件を全て満たす新しいクエーサー探査観測を展開することで、これまで不可能だった巨大ブラックホールに関する統計的議論を一気に進めて当該研究分野にブレイクスルーを起こすことを目的とする研究を推進した。

- (a) 極めて数密度の低いクエーサーも発見可能な程度に充分広い探査面積 (1000 平方度以上)
- (b) 130 億光年以遠の遠方天体選出に必要な、可視最長波長 (約 $1\mu\text{m}$) でも低下しない検出器感度

- (c) 遠方宇宙における暗い天体も検出可能なデータクオリティ（観測感度）

研究経過

上記の (a) (b) (c) で挙げた条件を全て満たす観測を遂行するために最も適した観測装置は、すばる望遠鏡の次世代超広視野カメラ Hyper Suprime-Cam (HSC) である。HSC は既存の地上大口径望遠鏡の中ですばる望遠鏡だけが有する主焦点に取り付けられることにより、直径 1.5 度という驚異的な視野の広さを実現した撮像カメラである。すばる望遠鏡の集光力と合わせることで、キューサーのような極めて数密度の低い天体の高感度探査で圧倒的な威力を発揮することができる点が HSC の最大の特徴である。

世界に比類のない装置である HSC から迅速に素晴らしい成果を世界に発信するため、日本・プリンストン大学・台湾中央研究院からなる国際コラボレーションに基づく大規模サーベイ計画が立案され、5 年間ですばる望遠鏡を 300 晩もの期間に渡って占有して約 1400 平方度（全天の数%）という広大な領域に対して観測を行う「すばる戦略枠観測（Subaru Strategic Program; SSP）」プログラムが国立天文台から認められた。この SSP は百数十人が参加する巨大なコンソーシアムであり、観測的宇宙論・銀河進化・天の川銀河構造・太陽系小天体といった様々な観測対象に対してこれまでにない新たなデータをもたらすようにデザインされたものである。このコンソーシアムの中で本研究の代表研究者である長尾は巨大ブラックホール研究のワーキンググループの責任者となり、HSC で得られる広視野可視撮像データに基づく巨大ブラックホール研究の推進を担当した。

HSC による SSP サーベイは 2014 年 3 月に開始し、2019 年 1 月頃のサーベイ完遂に向け今も断続的に観測を続けている。本研究では、SSP サーベイで得られる HSC 初期データから巨大ブラックホール進化に関する情報を得るため、具体的なトピックとして

- ・ 既存データを用いた遠方キューサーと銀河の空間相互相関関数の調査
- ・ HSC データから遠方キューサーを選出する方法論の確立と HSC 初期データへの応用
- ・ HSC 初期データと既存の多波長サーベイデータを組み合わせる特別な種類のキューサーを選出する方法の確立とその HSC 初期データ

への応用

の 3 点に取り組んだ。

遠方キューサーと銀河の空間相互相関関数の調査は、巨大ブラックホールが宇宙のダークマター分布の中のどういった環境で成長を遂げるのかを明らかにするために行うものである。キューサーの周辺部にどのくらいの数の銀河が群れているかを定量的に調査することにより、そのキューサーが所属するダークマターハローの質量を（目に見えないダークマターを直接観測しなくても）知ることができるが、遠方銀河は一般に暗いため、キューサーを複数調べられるような視野の広さとその周辺の銀河を調べられるような感度の高さを両立させることが従来は難しかった。そこで我々は台湾中央研究院の池田浩之氏（現・国立天文台）と協力して、2 平方度という比較的広い視野に対して深い可視光多色データが得られている COSMOS 領域と呼ばれる天域を調べることで、赤方偏移 4 程度（約 120 億光年彼方、ビッグバン後 20 億年足らずの宇宙に相当）に存在するキューサーおよびその周辺部に存在する銀河を探索した。赤方偏移が 3.1 から 4.5 にある 25 天体の低光度キューサーおよび同赤方偏移帯にある 835 天体の銀河の空間分布を調べ、相互相関関数を測定することにより、赤方偏移 4 の低光度キューサーが属するダークマターハローの典型的質量が太陽質量の 10^{12} 倍程度であることが分かった。これは既に調べられている赤方偏移 4 程度における高光度キューサーや、より低赤方偏移（より現代に近い宇宙）のキューサーと同程度の値であり、高光度キューサーと低光度キューサーで巨大ブラックホールの活動性発現メカニズムが大きくは変わらないことを示唆する結果である。ただし、COSMOS 領域のデータは赤方偏移 4 のキューサーを多数調べるには領域が狭すぎるため、示唆されたダークマターハロー質量には 1 桁以上の誤差がある状況である。また COSMOS 領域の広さでは赤方偏移 5（約 125 億光年彼方、ビッグバン後 10 億年余りの宇宙に相当）のキューサーを調べるには探索体積が小さすぎるため、より初期の宇宙における巨大ブラックホールの統計的性質に迫ることができない。COSMOS データと同程度の観測感度で 1000 平方度以上を探索する SSP サーベイを行うことによりキューサーと銀河の相互相関関数の精度が格段に向上し、キューサーの環境と活動性発現メカニズムの理解が一気に進むはずであるということが、

この COSMOS データを用いた研究により明確に示された (Ikeda, Nagao, et al., 論文投稿中)。

この COSMOS 領域における研究の注意点として、高赤方偏移の低光度クェーサーを探索する際に従来の高光度クェーサーに対する探索方法と基本的には同じ方法を採用していることが挙げられる。実は高光度クェーサーと低光度クェーサーでは単に明るさだけが違うのではなく、スペクトル中に見られる様々なイオンの輝線放射の相対強度が顕著に (光度に応じて) 違っていることが知られている。輝線強度が違えば見かけの色が変わるため、高光度クェーサーと低光度クェーサーで同じ選択基準を採用して探索を行うことが妥当かどうかは全く自明ではない。そこで愛媛大学大学院修士課程の仁井田真奈氏による修士論文研究として、高光度クェーサーと低光度クェーサーのスペクトルデータを使い、クェーサー探索効率 (特にノイズの効果で探索の完全性が低下する効果) を調査するシミュレーションを行った。その結果、輝線強度の光度依存性を無視する従来の方法では高赤方偏移の低光度クェーサーを探索する際に数十%の系統誤差が生じてしまうことが判明した。この系統誤差は、各種イオンが放射する輝線の強度の光度依存性を正しく補正すれば除去できるため、HSC を用いた SSP サーベイで大規模に高赤方偏移の低光度クェーサーを探索する際に採用すべき方法について重要な指針を得ることができた (Niida, Nagao, et al., 論文執筆中)。

HSC を用いた SSP サーベイは開始からまだ間がなく、かつてない規模の高赤方偏移クェーサー探索を一気に進める段階にはまだ至っていない。この状況を踏まえて我々は、約 10 平方度の SSP サーベイ初期データと既存の多波長サーベイデータを組み合わせることで、これまで調査が進んでいない特別な種類のクェーサーを探索することを試みた。具体的には、NASA による Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE) 衛星が行った中間赤外線での広域撮像観測と SSP 初期データを合わせ、ダストに深く覆われているために可視光だけでは見つけられない Dust-Obscured Galaxies (DOGs) と呼ばれる種族の天体の探索を試みた。可視光はダスト微粒子に吸収されやすい一方で中間赤外線はダスト微粒子の影響をほぼ受けないため、ダストに深く覆われた天体は可視光で非常に暗く、中間赤外線では明るい天体として認識される。特に DOGs の中でも中間赤外線光度が

高いものは、巨大ブラックホールが急成長中のクェーサーがダストに深く覆われた天体に相当すると指摘されているため興味を持たれているが、数密度の小ささと可視光での暗さのためにこれまで系統的探索ができていない。そこで我々は、愛媛大学研究員の鳥羽儀樹氏と協力し、HSC による SSP サーベイの初期データと WISE データを組み合わせることにより可視光で非常に暗く中間赤外線では高光度な天体を系統的に探索して、48 天体の DOGs を約 10 平方度の領域内で検出することに成功した。これらの天体の赤方偏移はおよそ 2 程度 (約 100 億光年彼方、ビッグバン後 30 - 40 億年の宇宙に相当) であると見積もられる。これらの天体の可視光から近赤外線を含み中間赤外線までのスペクトルエネルギー分布を調査したところ、48 天体のうち少なくとも 31 天体にはダストに深く覆われたクェーサーが潜んでいることが示唆された。これらの赤外線光度は太陽光度の 10 兆倍以上に達し、人類が知る最も高光度の赤外線源に相当する。こうした特に赤外線光度の高い DOGs の天体数密度は約 $10^{-6.6} \text{ Mpc}^{-3}$ であると見積もられたが、約 10 平方度という広い天域に対する系統的探索により最高赤外線光度を持つ DOGs の数密度を得たのは本研究が初めてである。こうした天体は急成長中の巨大ブラックホールを有するクェーサーに相当するため、SSP サーベイでこうした興味深い天体を数十倍のサンプルサイズで得ることができることを立証した本研究は当該分野における今後の研究の方向性を検討する上でインパクトの大きいものとなった (Toba, Nagao, Strauss, et al., 論文印刷中)。

考察

系統的なクェーサー探索の歴史はケンブリッジ大学による 1960 年頃の 3C および 4C サーベイまで遡るが、現代天文学におけるクェーサー研究および巨大ブラックホール研究に最大のインパクトを与えた探索はプリンストン大学などが 1990 年代から 2000 年代にかけて推進した Sloan Digital Sky Survey (SDSS) である。この SDSS およびその後継の BOSS プロジェクトにより数万天体という規模でクェーサーが発見され、最遠方のクェーサーの赤方偏移は 6.4 に達する。SDSS および BOSS が大成功を収めた最大の理由は充分広い視野に対して比較的高感度の多色撮像観測を遂行した点にあるが、口径 2.5m の望遠鏡による撮像観測では感度に限界があり、このため

に SDSS および BOSS では低光度の高赤方偏移クェーサーや赤方偏移 6.4 を超えるクェーサーを探索することはできなかった。この SDSS と BOSS の限界を越えて先に進むことが当該領域に課せられた課題であったが、我々による本研究により、口径 8m 級の地上望遠鏡（すばる望遠鏡）の集光力と HSC の極めて広い視野を組み合わせばクェーサー探索および巨大ブラックホール進化の研究にブレイクスルーをもたらすことが十分に可能であることを示すことができた。特に SSP データのユニークなサーベイパラメータを活かして、HSC 撮像データと可視光以外の広視野撮像サーベイデータを組み合わせることで個数密度の低い特別な種類のクェーサーを探索できるという点は興味深い。本研究では WISE が取得した中間赤外線サーベイデータと HSC による SSP データの組合せを調査したが、1.4 GHz 帯（20 cm 帯）での広視野電波サーベイと HSC による SSP データの組合せにより電波ジェットの活動性を示すクェーサーの系統的探索も十分に可能だと予想される。本研究で得た経験を踏まえ、そうした電波で明るいクェーサーの系統的探索も今後試みていきたい。

HSC による SSP サーベイで見つかる様々な種類のクェーサーはいずれも非常に興味深い研究対象だが、それらは可視光で非常に暗い天体（口径 8m 級の望遠鏡を用いてようやく撮像観測が可能になる天体）であるため、すばる望遠鏡などの地上大型望遠鏡をもってしても詳細な物理化学状態や巨大ブラックホール質量を計測するための分光観測を行うことは困難を極める。これは換言すると、日本も参画する国際プロジェクトであり現在ハワイにて建設が進められている次世代超大型望遠鏡 Thirty Meter Telescope (TMT) に向けた格好のターゲットを HSC によるクェーサー探索から供給することができるということを意味する。また 2020 年代後半になると我が国が欧州と協力して検討を進めている次世代赤外線宇宙望遠鏡 SPICA が実現していると期待されるが、本研究で発見した DOGs のように深くダストに覆われて可視光では情報がほとんど得られないような天体の詳細分光観測は SPICA が担当することになる。こうした大型将来計画のサイエンス戦略を現段階から立案していくために HSC によるクェーサー探索が大いに貢献できるということについても、本研究で示すことができたと考えている。

なお、このような本研究を進めるにあたり、当該

分野の研究者の経験と知識を結集して巨大ブラックホール進化の研究を進めるために、複数の研究会を開催して当該分野の研究者間での継続的な議論が可能になる場面を設けたことは、本研究推進に際して行った工夫のひとつである。HSC による SSP サーベイの巨大ブラックホール研究ワーキンググループに参加する日本・プリンストン大学・台湾中央研究院の研究者が台北で議論を行うための国際研究会については、2014 年 1 月および同年 12 月の 2 回に分けて行った（いずれも参加者数は約 50 名）。また、日本国内で巨大ブラックホールの理論研究を行っている研究者からモデル構築の面で貢献をいただくため、理論班検討会を継続的に行った（2014 年 3 月は理化学研究所計算科学研究機構にて、同年 9 月は北海道大学にて、また 2015 年 3 月は愛媛大学にて開催し、参加者数はいずれも 10 - 20 名）。あえて直接顔を合わせて意見交換を行うことで初めて得られる新たなアイデアなどが多く、インターネットが発達した現代においてもこうした直接顔を合わせての議論の場面を大切にすることが大規模なプロジェクトを進める上では本質的に重要であることをここで指摘しておきたい。

研究の発表

口頭発表

1. T. Nagao: “Subaru Wide-Field AGN Survey with HSC”, International Conference “Quasar science with HSC”, Taipei, Taiwan, January 2014.
2. 長尾透: “Synergy between Subaru and large surveys in 2020’s: The case for high-*z* AGN/SMBH” (invited), 研究会「2020 年代の銀河サーベイ計画とすばる望遠鏡のシナジー」, 国立天文台三鷹, 2014 年 1 月.
3. 長尾透: “Observational studies on super-massive black holes: Recent hot topics and the next steps” (invited), 初代星・初代銀河研究会, 鹿児島大学, 2014 年 1 月.
4. 池田浩之, 長尾透, et al.: “Statistical properties of low-luminosity quasars in the early Universe”, SWANS 理論班検討会, 理化学研究所計算科学研究機構, 2014 年 3 月.
5. 尾上匡房, 柏川伸成, 田中賢幸, 新納 悠, 長尾透, et al.: “SED fitting を用いた高赤方偏移クェーサーの検出”, 日本天文学会 2014 年春期年会, 国

際基督教大学, 2014年3月.

6. 仁井田真奈, 長尾透, et al.: 「高赤方偏移クエーサー光度関数の正確な測定に向けた BOSS クエーサースペクトルの光度依存性の調査」, 日本天文学会 2014 年秋期年会, 山形大学, 2014 年 9 月.
7. 池田浩之, 長尾透, et al.: 「AGN と銀河の相互相関関数の研究」, SWANS 理論班検討会, 北海道大学, 2014 年 9 月.
8. 長尾透: “Subaru Wide-Field AGN Survey with Hyper Suprime Cam” (invited), 超巨大ブラックホール研究推進連絡会第 2 回ワークショップ, 筑波大学, 2014 年 11 月.
9. 鳥羽儀樹, 長尾透, et al.: 「中間赤外線と可視光線を併用した AGN/銀河研究」, 超巨大ブラックホール研究推進連絡会第 2 回ワークショップ, 筑波大学, 2014 年 11 月.
10. T. Nagao: “Observational studies of the quasar evolution” (invited), International Conference “China-Subaru workshop 2014”, Shanghai, China, November 2014.
11. T. Nagao: “HSC-SSP and the AGN WG activities”, International Conference “Evolution of SMBHs with HSC: First results from initial dataset”, Taipei, Taiwan, December 2014.
12. H. Ikeda, T. Nagao, et al.: “Quasar-LBG two-point angular cross-correlation function at $z\sim 4$ in the COSMOS field”, International Conference “Evolution of SMBHs with HSC: First results from initial dataset”, Taipei, Taiwan, December 2014.
13. Y. Toba, T. Nagao, et al.: “Photometric properties of IR-bright dust-obscured galaxies”, International Conference “Evolution of SMBHs with HSC: First results from initial dataset”, Taipei, Taiwan, December 2014.
14. M. Niida, T. Nagao, et al.: “Completeness estimates for high- z low-luminosity quasar surveys, and implications for the quasar luminosity function at high redshifts”, International Conference “Evolution of SMBHs with HSC: First results from initial dataset”, Taipei, Taiwan, December 2014.
15. 長尾透: “Low-metallicity active galactic nuclei: Challenges toward identifying young SMBHs” (invited), 初代星・初代銀河研究会, 東北大学, 2015 年 1 月.
16. Y. Toba, T. Nagao, M. A. Strauss, et al.: “Photometric properties of IR-bright dust-obscured galaxies discovered by the Hyper Suprime-Cam on Subaru and WISE”, International Conference “Unveiling the AGN/galaxy evolution connection”, Puerto Varas, Chile, March 2015.
17. 長尾透: “Subaru Wide-Field AGN Survey with HSC”, 日本天文学会 2015 年春期年会, 大阪大学, 2015 年 3 月.
18. 鳥羽儀樹, 長尾透, et al.: 「HSC 初期データと WISE を併用した Dust Obscured Galaxies 探査」, 日本天文学会 2015 年春期年会, 大阪大学, 2015 年 3 月.
19. 尾上匡房, 柏川伸成, 松岡良樹, 田中賢幸, 新納悠, 長尾透, et al.: 「HSC サーベイを用いた高赤方偏移クエーサー探査」, 日本天文学会 2015 年春期年会, 大阪大学, 2015 年 3 月.
20. 仁井田真奈, 長尾透, et al.: 「高赤方偏移の低光度クエーサー探査におけるコンプライトネスと光度関数の再評価」, SWANS 理論班検討会, 愛媛大学, 2015 年 3 月.

誌上発表

1. Y. Toba, T. Nagao, M. A. Strauss, et al.: “Hyper-luminous dust obscured galaxies discovered by the Hyper Suprime-Cam on Subaru and WISE”, Publication of the Astronomical Society of Japan, in press.
2. H. Ikeda, T. Nagao, et al.: “Quasar-LBG two-point angular cross-correlation function at $z\sim 4$ in the COSMOS field”, The Astrophysical Journal, submitted.