

多波長にわたる大望遠鏡群を駆使した 巨大ブラックホールが宇宙の歴史に果たした役割の解明

Cosmic Roles of Supermassive Black Holes Revealed with Multi-Waveband Large Telescopes

(日本天文学会推薦)

代表研究者	尾道市立大学	川口 俊宏	Onomichi City University	Toshihiro KAWAGUCHI
協同研究者	国立天文台	尾崎 忍夫	National Astronomical Observatory of Japan	Shinobu OZAKI
	信州大学	三澤 透	Shinshu University	Toru MISAWA
	東京大学	河野 考太郎	The University of Tokyo	Kotaro KOHNO

We are carrying out the integral-field-unit observations on active galactic nuclei that show signatures of large-velocity gas outflow, using the latest adaptive-optics assistance on the largest 8-10m class optical telescopes (Subaru and Very Large Telescope). Although the nucleus has been supposed to be the major emission source in the central region of an active galaxy, we found, through the data analysis, that the nucleus is not a point source, rather there are a couple of discrete emission line regions around the central supermassive black hole. Also, we measure and set an upper-limit on the size of the outflowing region, finding that the past report (obtained by a conventional slit spectroscopy with a much worse spatial resolution) suggesting the extended outflowing region is unlikely. Laser tomography adaptive optics is found to be very powerful, though we need much care to handle the data.

研究目的

2019年、ついに直接撮像され話題を呼んだM87銀河中心のような巨大ブラックホールが、ほとんど全ての銀河の中心にも存在することがわかってきた。ところが、138億年という宇宙の歴史の中で、巨大ブラックホールがいかに誕生し、銀河と共にどのように成長し、どのような役割を担ってきたか、いまだ解明されていない。

現在もっとも有力なシナリオは、ブラックホールへ大量のガスが落ち込み急成長する際に、強力な輻射と共にガス噴出流が発生し、銀河内の星形成活動と銀河中心へのさらなるガス流入を抑制・制御する過程である。

しかし実は、十分な空間分解能でガス動力学を計測した観測例は実在しない。

本研究の目的は、「銀河中心からのガス噴出による母銀河での星形成活動を制御する効果は実在するか? もしくは、広く流布されているものの、単な

る仮説でしかなかったのか?」という問いに答えることである。

我々はこれまで、高速ガス流が銀河スケールまで噴き出す条件を明らかにし、高速ガス噴出が銀河スケールの大きさで発生している活動銀河核の中で最も近傍に居る天体群について、世界最大級の望遠鏡群を用いて噴出流を計測してきた。

本研究では、ガス流が星形成を抑制するのに十分なのか定量的に明らかにすることで、「活動銀河核による母銀河星形成抑制」仮説を現在世界最高の空間分解能で検証することを試みた。

研究経過

近年、我々が住む天の川銀河を含め全ての銀河が、それぞれの中心に太陽の十万倍から何十億倍もの質量を持つ巨大ブラックホールを宿すことがわかってきた。ありふれた天体であるにもかかわらず、138億年の宇宙の歴史の中で、巨大ブラックホールがいか

に誕生し、銀河とどのような相互作用をしながら成長し、どのような役割を担ってきたか、いまだ解明されていない。

現在もっとも有力なシナリオは、ブラックホールへ落ち込む大量のガスが放つ輻射によるガス噴出流が銀河内の星形成活動を制御する過程である(フィードバック現象)。実際、酸素・炭素イオンや一酸化炭素分子の輝線、可視光から X 線にわたる吸収線など、ガス噴出現象が多く波長帯で観測されている。

しかし実は、十分な空間分解能でのガス噴出量の観測的測定は行われておらず、理論的にもフィードバック現象を肯定・否定する研究がどちらも発表されており混沌としている。つまり、銀河中心からのガス噴出が、母銀河の星形成活動を抑制するだけ十分パワフルなのか、宇宙の歴史にブラックホールはどの程度影響を及ぼしたのかは依然として不明である。

そこで本課題は、世界最高性能の装置群を活用し、ブラックホール噴出流が銀河進化史へどれだけ影響を与えるのか定量的に明らかにすることを目指した。多くの銀河形成・進化モデルで用いられている「銀河中心ブラックホールによる星形成制御」仮説の初めての観測的検証、又は、仮説の見直しをせまる事が期待される成果である。

本研究では主に、撮像と分光を同時に行う面分光という観測技術を突破口に用いている。電波・X 線波長帯と同様に、可視光赤外線分野においても近年ついに可能になった。また、補償光学とは、大気揺らぎによる天体画像のぼやけを逐次補正することでハッブル宇宙望遠鏡に勝る角度分解能を得る技術

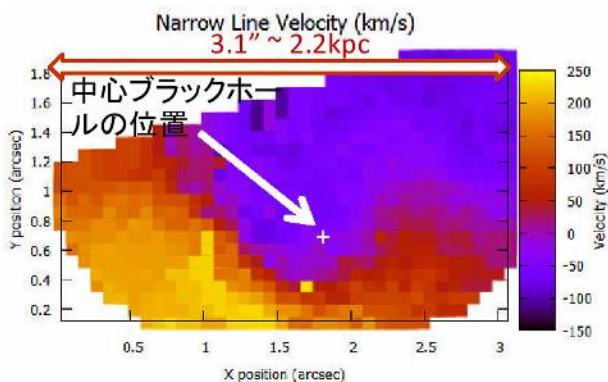


Figure 1: Map of emission lines ([N II], [S II] etc) around an active galactic nucleus with galactic-scale outflow.

であり、眼科医療や生体分子の研究などにも応用されている。

これまで、世界最大の口径(直径 8-10m 鏡)を持つ可視光望遠鏡の中で、大気揺らぎによる像のぼやけを逐次補正する補償光学性能と面分光を可視光の波長帯で行う機能の両者をあわせ持つのは、日本が保有するすばる望遠鏡が世界初、かつ長年にわたり唯一であった。我々は、装置の特性に精通した面分光装置開発者と協同して観測を行い、科学成果を挙げてきた (Kawaguchi et al. 2018; 1)。具体的には、補償光学機能で角度分解能を向上させたすばる望遠鏡の可視光面分光装置(京都 3 次元分光器 2 号機)を用いて、銀河スケールの大きさで高速ガス噴出が起きている銀河中心部について観測を行い、「母銀河星形成抑制」仮説の検証を行った。当時の最高角度分解能をもってしても十分に構造を明らかにすることはできなかったものの、約 900km/s の青方偏移速度を持つ高い密度(>3000/cc)の噴出ガスの発見などの初期成果を査読論文として発表した (Figure 1; 1)。

その後 2019 年から、欧州南天文台の Very Large Telescope (VLT)がレーザートモグラフィ補償光学を活用した新世代の面分光器 MUSE Narrow-Field-Mode での共用観測を開始し、0.1 秒角を切る超高角度分解能を可能にした。そこで我々は、すばる望遠鏡の成果を基に国際共同チームを構築し、第 1 期公募期に観測提案を行い(Principal Investigator: T. Kawaguchi)、観測データを得ることに成功した (Figure 2)。レーザートモグラフィ補償光学 (GALACSI)により約 0.1—0.2 秒角の解像度(半値幅)で得られているデータを用いて、ブラックホール噴出流が銀河での星形成(銀河進化)へどれだけ影響を与えるのかを定量的に明らかにするべく解析を進めた。

また、我々がすばる望遠鏡と VLT を用いて面分光観測した天体について、視線上の噴出流の速度とガス柱密度をすばる望遠鏡の高分散分光装置 HDS を用いた吸収線の観測により明らかにする観測提案も行い、観測計画が採択された。天候状況が整い次第観測される事が決まっている状況が続いたが、2022 年 1 月について観測され、現在急ぎデータ解析に取り組み始めている。

面分光観測の輝線を用いた研究では、中心核が明る過ぎる為に巨大ブラックホールのごく近傍を調べるのが困難である弱点があるが、吸収線による観測

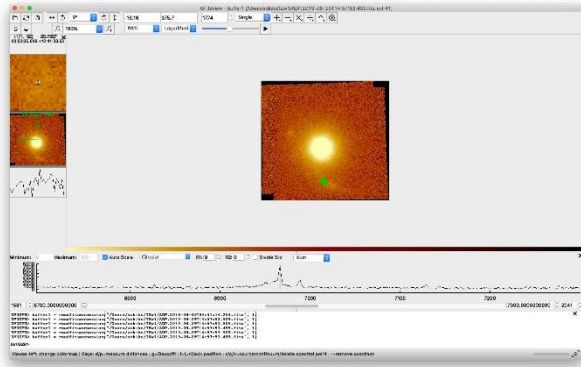


Figure 2: Data cube obtained by our Integral-Field-Unit observation with MUSE.

は逆に中心部を調べることができるため、相補的な探求手段である。

すばる望遠鏡と VLT の、補償光学と可視光面分光の両機能を用いて得た観測データの解析からは、以下のような進展が得られた。

I. 波長ごとの画像を繋げて動画表示することで、母銀河の形状と速度構造、および補償光学付面分光データの威力の大きさが明瞭に確認できた。

II. 両望遠鏡で得たスペクトルデータについて、過去の活動銀河核分光観測に関する諸文献の輝線同定を集約し、鉄イオン Fe II 遷移群やカルシウムイオン Ca II, 酸素原子 O I 輝線等の合計約 100 本の遷移について同定を行った。

III. 中心ブラックホールから離れた位置に、輝線を放射する領域が存在することを発見した。イオンによっては、中心核(中心ブラックホールのごく近傍領域)よりももっぱら中心から離れたこの領域で放射されていることが判明した。過去のスリット分光データを報告している文献(2004 年)では他の細い輝線と共に、同じ成分として解析され発表されていたが、補償光学を利用して空間分解した面分光を行うことで、輝線によって放射領域が異なり、データの解釈等を慎重に再吟味する必要があることがわかった。

IV. 中心核からの放射(降着円盤の連続光と広輝線領域からの輝線)は点源とみなせるほど十分小さいが、中心ピクセルだけでなく周辺の位置のピクセルにも、Point Spread Function (PSF)の強度分布で漏れ出す。点源である広輝線領域から放射されている輝線の強度分布を用いて PSF の大きさを測ると、半値幅 FWHM は観測波長 5150Å (H β)で約 0.21 秒角、7000Å (H α)で約 0.14 秒角、9000Å 付近で約 0.09 秒角であっ

た。補償光学機能が有効に働いた結果、この PSF の波長依存性が特に VLT のデータで想定以上に大きい事がわかった。すばる望遠鏡のデータにも、同様の傾向が観えることもわかった。

この波長依存性は、中心から離れた位置のスペクトルから中心光をスケールして差引く伝統的な解析手法や、多ピクセルを空間 bin して異なる位置のスペクトルを比較する際に、誤った期線比を得るなどの誤分析を避ける為に慎重な取り扱いが必要な事を意味する。

V. 1.5 秒角のシーイング時のスリット観測をもとに、酸素イオン[O III]放射領域が H β よりも広がっている可能性が示唆されていたが(1990 年)、我々の MUSE データでは酸素イオン[O III]放射領域の位置と拡がりに H β 輝線と有意な差は見られなかった。

この結果、高速ガス噴出領域の大きさと中心からのオフセットが PSF の大きさ(FWHM = 0.21 秒角 ~ 約 230pc)より十分小さい事がわかった。銀河中心ブラックホールから約 120pc 離れた位置に約 290pc 広がった高速(約 860km/s)ガス噴出を示す IRAS04576 (1)に比べて、さらにコンパクトなガス噴出領域であることを意味すると考えられる。

VI. 補償光学を用いて約 0.25 秒角の角度分解能で得た我々のすばる望遠鏡/可視光面分光観測で観えていた輝線の放射が点源(中心核)よりも広がっている様子は、VLT のこの観測データでも確認され、視野内での速度変化も観ることができた。

また、可視光データの視野全面にわたり銀河回転が検出できていることもわかり、電波帯域の一酸化炭素分子 CO 分子輝線による銀河回転の測定と同傾向であることが確認できた。論文発表へ向けて解析と議論を急ぎ進めている。

すばる/MUSE 両望遠鏡を用いた面分光以外の成果として、ガス噴出流が観えている活動銀河核の時間変動の特性や宇宙の歴史における巨大ブラックホールの活動史についての発表を行った。

また、巨大ブラックホールへのガス供給に関する Nature Astronomy 誌での論文発表について、記者会見と報道発表を行った。

考察

面分光データの解析の結果得られた、高速ガス噴出領域の大きさの計測と、複数発見された輝線放射領域の分布や起源の特定を慎重に進めている。

未確定ながら、銀河中心の巨大ブラックホール付近でのガス噴出を様々な手法で探査した結果、非点対称の高速ガス噴出の兆候を見つけている。検出の真偽を検証する精査と噴出速度やガスの形状の計測、および論文発表へ向けて解析と議論を急ぎ進めている。

さらに、補償光学機能がよく性能を発揮した結果判明した事として、中心から周辺ピクセルへの光の漏れ込み量が点対称ではなく、かつその異方性も波長依存性が大きいことがわかった。サイエンス目的の解析と併せて、レーザートモグラフィー補償光学の実際の振る舞いを装置開発チームへ報告する事を目指して情報を集約中である。

参考文献

1. Kawaguchi T., Ozaki S., Sugai H., et al. 2018, PASJ, 70, 93 (1-8), A 100 pc-scale fast and dense outflow in the narrow-line Seyfert 1 galaxy IRAS 04576+0912

研究の発表

口頭発表

1. T. Horiuchi, T. Morokuma, T. Misawa, H. Hanayama, and T. Kawaguchi, “The Correlation between Broad Absorption Line Variability and Quasar Properties”,

Galaxy Evolution Workshop 2020, 2021 Feb 2--5-

2. 記者会見及び、研究成果解説の公開：「冬眠するブラックホール ～銀河衝突がもたらす大質量ブラックホールのエネルギー源の流失～」, 三木洋平, 森正夫, 川口俊宏; 2021年1月, 東京大学, 筑波大学, 尾道市立大学, 国立天文台のホームページにおいてリリース, 朝日新聞、読売新聞、産経新聞、中国新聞、日経新聞などで掲載
3. 大木平, 石山智明, 長島雅裕, 川口俊宏, 岡本崇, 榎基宏, 白方光, “Uchuu simulation と準解析的モデルで探る高赤方偏移クエーサー形成”, 日本天文学会年会, 2021年9月13--15日

誌上発表

1. "NuSTAR Non-detection of a Faint Active Galactic Nucleus in an Ultraluminous IR Galaxy with Kpc-scale Fast Wind", X. Chen, K. Ichikawa, H. Noda, T. Kawamuro, T. Kawaguchi, Y. Toba, and M. Akiyama, 2020年12月, The Astrophysical Journal 誌, 905巻, 2頁
2. "Destruction of the central black hole gas reservoir through head-on galaxy collisions", Y. Miki, M. Mori and T. Kawaguchi, 2021年1月, Nature Astronomy 誌, 5巻, 478—484頁