

多波長観測で探る急成長中の 超巨大ブラックホール



小 淵 紗 希 子

〈早稲田大学大学院先進理工学研究所 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1〉

e-mail: buchi-13525.cjl@fuji.waseda.jp

銀河の中心に存在する超巨大ブラックホール (Supermassive Black Hole; SMBH) は、中心ブラックホールに物質が降着することで明るく輝く。なかでも明るい天体はクエーサーと呼ばれ、超巨大ブラックホールの持つ 10^{6-10} 太陽質量にも達する質量獲得の起源を探る重要天体である。筆者らは、 $z=3.43$ (約 120 億年前) に存在するクエーサーに対して、すばる / MOIRCS 近赤外線分光を行うことで MgII 輝線の速度幅観測からブラックホール質量を見積もり、本天体が超臨界降着状態で成長していることを明らかにした。さらに、本天体は超臨界降着状態の従来の予想に反して X 線でも電波でも明るく輝くという特異な性質を持っている。この性質から、本天体は超臨界降着から通常のカエーサーに遷移途中の状態である可能性を示唆していることを紹介する。

1. はじめに

近傍宇宙でバルジを持つ多くの銀河の中心には、太陽質量 (M_{\odot}) の数百万倍から数百億倍もの質量 ($M_{\text{BH}}=10^{6-10} M_{\odot}$) を持つ超巨大ブラックホール (Supermassive Black Hole; SMBH) が存在することが知られている。これほど膨大な質量がいつどのように集積してきたかはいまだ謎に包まれているが、その質量の起源を探る鍵となる種族が活動銀河核 (Active Galactic Nuclei; AGN) である。SMBH そのものは電磁波放射をしないものの、極めて強い重力を持った SMBH の周りにはときおりガスが降着し、降着円盤が形成される。これらの降着物質が重力エネルギーを解放することで SMBH は明るく輝き、AGN として観測される。

AGN の中でも、総光度 (L_{bol}) が $L_{\text{bol}}=10^{45} \text{ erg s}^{-1}$ を超えるような特に明るいものはクエーサーと呼ばれる。その明るさゆえ、クエーサーは $z=2$ を

超えるような遠方 (過去) の宇宙においても数多く発見されてきた。近年の観測結果では、宇宙誕生から 10 億年未満の初期宇宙でさえ $10^9-10 M_{\odot}$ のクエーサーが複数発見されており、宇宙最遠方のクエーサーは $z=7.6$ で $M_{\text{BH}}=1.6 \times 10^9 M_{\odot}$ もの BH 質量を持つ。 $z=7.6$ と言えば宇宙誕生からわずか約 6 億 8000 万年しか経っていない。宇宙初期にどうやってこれほど重い SMBH を成長させるかを解明することは、天文学の重要な課題の一つである。この急速な成長過程として示唆される段階のひとつが、超臨界降着と呼ばれる SMBH へのガス降着状態である。

2. 超臨界降着とは何か

球対称な質量降着において、降着する各ガス粒子には SMBH の重力場による重力と降着円盤からの放射による輻射圧がそれぞれ逆向きに働く。基本的には、多くのガスが降着するとその分降着円盤の光度も高くなるが、輻射圧が重力を上回る

とガスは外向きに吹き飛ばされ、それ以上降着できなくなってしまう。つまり、重力と輻射圧が釣り合う状態での光度がその天体の最大光度となる。このような光度はエディントン限界光度 (L_{Edd}) と呼ばれる。 L_{Edd} は SMBH のブラックホール質量 (M_{BH}) と比例関係にあり、

$$L_{\text{Edd}} = 1.3 \times 10^{38} \left(\frac{M_{\text{BH}}}{M_{\odot}} \right) \text{ ergs}^{-1} \quad (1)$$

と与えられる。さらに、天体の総光度 (L_{bol}) とエディントン光度の比はエディントン比 $\lambda_{\text{Edd}} = L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}$ として定義され、その天体が上記の球対称降着の理論限界値と比べてどのくらいの質量降着率を持っているかを表す指標として使われる。上で書いた「釣り合い状態」では、 λ_{Edd} は 1 かそれ以下となることが観測的に期待される。

しかし、実際の質量降着はこのような理想的な球対称でのみ起こるわけではなく、大量のガスが非等方的に降着すれば、放射を主に極方向に逃がすことで $\lambda_{\text{Edd}} > 1$ となり得ることが理論的に提唱されている。また、多くのガスが降着すると、光子捕捉と呼ばれる現象が発生し、降着円盤内部で発生した光子がガスと一緒に SMBH に飲み込まれてしまうことでより効率的な $\lambda_{\text{Edd}} > 1$ の質量降着が実現するとも考えられている。このような λ_{Edd} が 1 を上回る質量降着を超臨界降着と呼ぶ [1-4] が、実際に近傍宇宙では NLSy1 と呼ばれる種族では超臨界降着流が実現されていることが観測的にも示唆されている [5]。

このような超臨界降着状態が初期宇宙のクエーサーでも実現していれば、 $z=7$ に存在する SMBH に成長することが比較的容易となるため、遠方宇宙における超臨界降着状態のクエーサーを探索することは SMBH 成長を知るうえで非常に重要となる。

3. X線と電波で AGN を見る

超臨界降着状態にある AGN は決して多くはな

く、このような稀な天体を見つけるためには、より広域での探査をする必要がある。今回筆者らは、eROSITA 衛星による広域 X 線サーベイの eFEDS カタログ [6] と VLA 電波干渉計による広域電波サーベイである FIRST カタログ [7] の双方で検出された電波 AGN カタログ [8] から、超臨界降着の候補天体を探査した。X 線と電波はどちらも吸収に強く、周囲に多くのガスやダストが存在する超臨界降着天体では、AGN から放射された光がガスやダストに大幅に吸収されることなく観測できる点は非常に重要である。

当初、eROSITA/eFEDS と VLA/FIRST による X 線と電波のクロスマッチは、高い感度と広い視野を兼ね備えた eROSITA 衛星の特長を活かして、X 線で明るい電波 AGN カタログを構築することを目的として実施された。その結果、赤方偏移 $z=1-4$ に及ぶ幅広い天体が同定されたが、中でも際立って X 線光度が高かったのが $z=3.4$ に位置する eFEDS J084222.9+001000 (以下 eFEDS のカタログ ID にちなみ ID830 とする) である (図 1)。 $10^{46} \text{ erg s}^{-1}$ を超える非常に明るい X 線光度は、 $10^{10} M_{\odot}$ の SMBH 質量を持った天体のエディントン限界光度 ($\lambda_{\text{Edd}}=1$) に相当する。この宇宙に

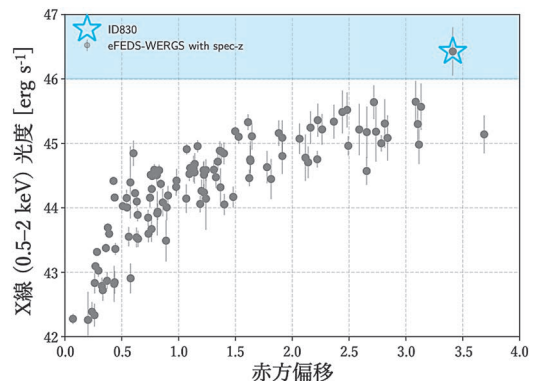


図 1 eROSITA/eFEDS と VLA/FIRST による X 線と電波のクロスマッチ結果。横軸は赤方偏移、縦軸は吸収補正された 0.5-2 keV の X 線光度 (log スケール) を表す。中でも最も X 線光度の高い天体 (星でマークされた天体) が今回の研究対象 ID830 である。

存在する SMBH の上限値は赤方偏移到依存せず $M_{\text{BH}} \sim 10^{10} M_{\odot}$ であることが知られているので、このクエーサー ID830 は、X線でも電波でも明るいにもかかわらず、 $\lambda_{\text{Edd}} > 1$ を実現しそうな極めて稀な超臨界降着天体の有力候補、もしくは $M_{\text{BH}} > 10^{10} M_{\odot}$ となるような宇宙で最も大きい SMBH 質量を持った天体のどちらかとなる興味深い天体であった。前者と後者、どちらの結果に転んでも面白いだろうということで、この天体の BH 質量を調べることとなった。

4. SMBH 質量と降着率の推定

候補天体 ID830 が実際に超臨界降着下にあるかどうかを判断するには、まず SMBH の質量を精度良く求める必要がある。本研究ではシングルエポック (Single-epoch) 手法を用いた [9]。この手法は、ブラックホール近傍のガスが強い重力場の支配下で高速に運動しているとしたとき、輝線の幅からガスの速度を、連続光光度から空間スケールを見積もり、速度とスケールから質量を推定する手法である。輝線幅と連続光光度はいずれも単一の分光観測から同時に取得できるため、分光スペクトルさえ手に入れば比較的容易に質量が推定できるというメリットがある。本研究では、中でも誤差の少ない測定が可能な MgII 輝線 (静止系 $\lambda_{\text{rest}} = 2798 \text{ \AA}$, 観測系では $\lambda = 12413 \text{ \AA}$) を用いた SMBH 質量推定を行うため、すばる望遠鏡 MOIRCS (Multi-Object Infrared Camera and Spectrograph) [10, 11] による近赤外分光観測を実施した。

MOIRCS は、すばる望遠鏡が有する多天体近赤外撮像・分光装置であり、広視野かつ深い感度での複数天体の同時分光観測が可能である。2000 年代初頭に Sloan Digital Sky Survey (SDSS) が登場したことで、可視分光によるクエーサー研究は飛躍的に発展したが、SMBH 質量の推定に必要な MgII 輝線や H β , H α 輝線は赤方偏移到 2-3 を超えるような遠方天体では近赤外帯にシフト

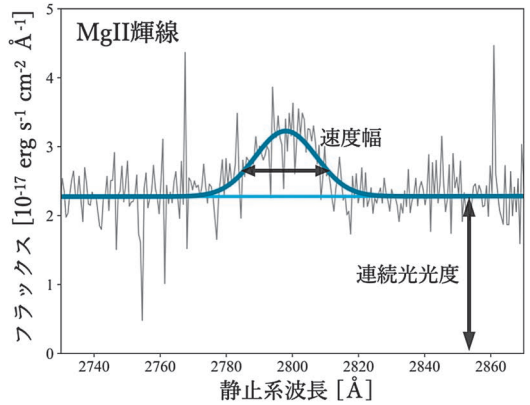


図2 すばる望遠鏡 MOIRCS によって観測された MgII 輝線のスペクトル。MgII 輝線の速度幅および連続光光度を用いて、SMBH 質量と BH 質量降着率を推定した。

してしまい、3000-10000 \AA をカバーする SDSS では観測することができない。近年、James Webb Space Telescope (JWST) の台頭により高赤方偏移クエーサーの近赤外分光観測は急速に発展しているが、その中でもすばる望遠鏡が運用する MOIRCS が果たす役割は依然として大きい。

MOIRCS 観測は天候にも恵まれ、ID830 の MgII 輝線を無事検出することができた (図2)。MgII 輝線の輝線幅と輝線付近の連続光光度から SMBH 質量を見積もった結果、 $M_{\text{BH}} = 4.4 \times 10^8 M_{\odot}$ と求まり、さらに SMBH 質量と静止系 UV (紫外線) 光度から見積もったエディントン比は $\lambda_{\text{Edd}} = 1.4 > 1$ であると判明した。つまり、超臨界降着の候補天体であった ID830 は確かに超臨界降着状態にあり、まさに急速に成長中だということがわかったのである。X線でも電波でも明るい超臨界降着クエーサーの発見は、今までにない特異な条件が重なった貴重な観測例である。

しかし、ここでもう1つ興味深い点が見つかった。推定した SMBH 質量をもとに、eROSITA/eFEDS X線観測によって得られた X線光度からも同様にエディントン比を求めたところ、 $\lambda_{\text{Edd}} = 12.8$ と求まった。すなわち、UV 光度に基づくエディントン比 ($\lambda_{\text{Edd}} = 1.4$) を、本来一致するはず

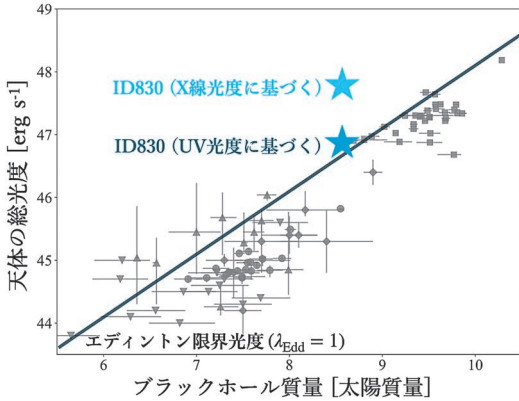


図3 ブラックホール質量 (log スケール) と天体の総光度 (log スケール) の関係. 多くの天体はエディントン限界光度 ($\lambda_{\text{Edd}}=1$) を表す直線を下回っている一方, ID830はエディントン限界光度を上回る超臨界降着を示し, さらにX線光度から求めたエディントン比 ($\lambda_{\text{Edd}}=12.8$) はUV光度から求めたエディントン比 ($\lambda_{\text{Edd}}=1.4$) を10倍近く上回っている.

のX線光度に基づくエディントン比 ($\lambda_{\text{Edd}}=12.8$) がおよそ10倍近く上回っているということである (図3). 仮にX線光度に基づくエディントン比が正しい場合, この天体はエディントン限界光度を大幅に上回る降着率で, 史上最速級に成長しているクエーサーだということになる.

5. 過剰なX線放射はどこから?

では, 異常に明るいX線はどこからきたのだろうか? この問題を深掘りするために, まずは降着円盤とコロナの関係性に着目したい. 多くのクエーサーでは, 降着円盤からUV・可視光が, より高温な内側のコロナ領域からX線が放射される. 両者のバランスを調べる上で重要となるのが, α_{OX} と呼ばれる指標である. α_{OX} は2 keVにおけるX線光度 ($L_{2\text{keV}}$) と2500 ÅにおけるUV光度 ($L_{2500\text{Å}}$) の比を表し,

$$\alpha_{\text{OX}} = 0.384 \times \log \left(\frac{L_{2\text{keV}}}{L_{2500\text{Å}}} \right) \quad (2)$$

と定義される [12]. これまでの先行研究で超臨界降着が示唆された天体では, いずれもUV光度に比べてX線光度が低いことが知られていた. 例えば, 近年JWSTにより発見され大きく注目を集める“little red dots” (LRDs) [13] は, 超臨界降着下にある可能性が示唆されているが, $\alpha_{\text{OX}} < -1.8$ を満たすこと (X線で非常に暗いという意味) が報告されている [14]. すなわち, 超臨界降着状態では, 降着円盤からのUV光度に比べてコロナからのX線放射が抑制される傾向があるということだ. この要因としては, 高い降着率のもとでは, 円盤からの激しい放射によってコロナが効率的に冷やされるという可能性が指摘されている [15]. しかし, 今回の対象天体であるID830は, 超臨界降着下にあるにもかかわらず, 従来の $\alpha_{\text{OX}} < -1.8$ という観測結果に反し $\alpha_{\text{OX}} = -1.2$ という非常に高い値を示した. つまり, 本来放射冷却によって活動が抑制されているはずのコロナが, 依然として高温な環境を保っており, その結果激しくX線を放射していると解釈できる.

このようなX線過剰が生じる原因の1つとして考えられるのが, 突発的な降着率の増加に伴う降着状態の遷移である. 近年, 光度やスペクトルの形状が多波長に渡って劇的に変化するAGNの存在が明らかになっており, これらの天体はchanging-look AGNと呼ばれている [16]. Changing-look AGNの変化は主に降着率の大きな変化によって引き起こされると考えられているが, このようなAGN特性の変化を詳細に追うためには, 長期間にわたる継続的な観測が必要である. その一例として, $z=0.019$ のchanging-look AGNである1ES 1927+654は3年間にわたる多波長モニタリング観測が実施され, 突発的な降着率の増加に伴う α_{OX} の推移が記録された [17].

報告された1ES 1927+654の α_{OX} 遷移過程は, 以下のような流れである. まず, 潮汐破壊現象 (Tidal Disruption Event; TDE) によって突如激しい質量降着が引き起こされる. TDEとは, 恒星が

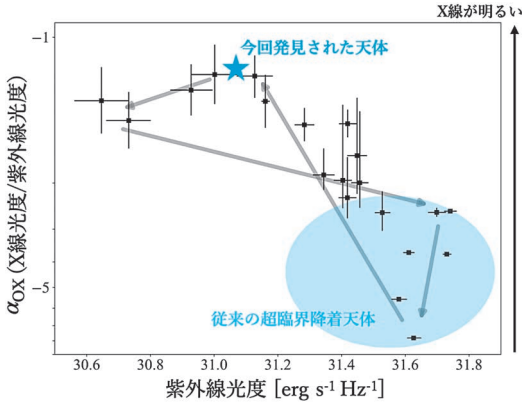


図4 UV光度 (log スケール) と α_{OX} の関係. 右下の領域は、従来のX線で暗い超臨界降着天体 ($\alpha_{OX} < -1.8$) が占める領域であり、ID830 (星でマークされたプロット) はこれらと比較して非常に高い値を持つ. 黒いプロットで表された1ES 1927+654の α_{OX} は時間経過に伴い矢印に沿って遷移し、ID830はその遷移過程の途中に位置する.

SMBHに近づいた際に、強力な潮汐力によって破壊される現象のことである. この降着バーストによって、1ES 1927+654の降着率は一時的に $\lambda_{Edd} = 4.2$ まで急増し、超臨界降着を実現する. その後、降着円盤からの激しい放射によってコロナは急激に冷却され、X線光度は著しく低下する. これが、まさしく従来の超臨界降着天体で観測されたX線で暗い性質に相当する段階である. しかし、降着率が落ち着きUV光度が低下するにつれて、冷えていたコロナは徐々に回復し、X線光度も増加していく. 最終的に $\alpha_{OX} \approx -1.0$ まで到達した後、降着率は元の $\lambda_{Edd} = 0.7$ 程度に収束する.

では本研究のID830はどうだろうか. 図4は、1ES 1927+654の α_{OX} 遷移過程と、著者らによって計算された $\alpha_{OX} = -1.2$ を示すID830を重ねたものである. その結果、ID830はまさにちょうど状態遷移の途中であるかのような位置にいることが分かった. つまり、ID830も近傍のchanging-look AGNで観測されたような遷移段階にいるとすれば、従来の観測結果にそぐわない過剰なX線放射

も説明ができる、ということである. この仮説が正しいとすると、ID830は、従来のX線で暗い超臨界降着状態と一般的な標準降着円盤モデルの間を結び付ける橋渡的存在となるといえるだろう.

一方で、1ES 1927+654の事例と今回のID830を比較する上では、両者のスケールの違いを十分に理解する必要がある. $z=0.019$ の近傍に存在し、かつ $10^7 M_{\odot}$ 程度の比較的低質量なSMBHを持つ [18] 1ES 1927+654とは異なり、ID830は $z=3.4$ という遠方であり、そのSMBH質量は $10^{8.5} M_{\odot}$ を超える. 1ES 1927+654では、TDEによって突発的に降着率が増加したと考えられているが、TDEが起こる半径はブラックホールの質量に依存しており、十分に重いSMBHでは恒星が潮汐破壊されることなくそのまま飲み込まれてしまう場合がある. ID830のような非常に重いブラックホールにおいては、一般的な主系列星ではそもそもTDEを起こすことができないのである. そのため、ID830において突発的に降着率を上げるには、非常に大きなガス雲を落とす必要がある. また、状態遷移にかかる時間も天体のスケールに応じて異なる. 1ES 1927+654の例では、1つのサイクルにおよそ650日を要したが、ID830では、赤方偏移とSMBH質量に比例して時間スケールも大きくなると仮定すると、降着バーストから元の降着率に戻るまでにおよそ300年も時間を要することになる. すなわち、この天体はおよそ300年にわたって降着状態の遷移段階にあることが予想される.

6. 隠れた母集団の可能性

ここまで、本研究で明らかにされたID830のX線特性について掘り下げてきたが、加えてこの天体の電波特性についても触れておきたい. 先述したように、電波AGNはAGN全体の約10%を占めていると考えられている [19]. そこで著者らは、電波AGNの割合が本研究の観測結果とどの程度整合的か調べるために、天体の数密度を計算

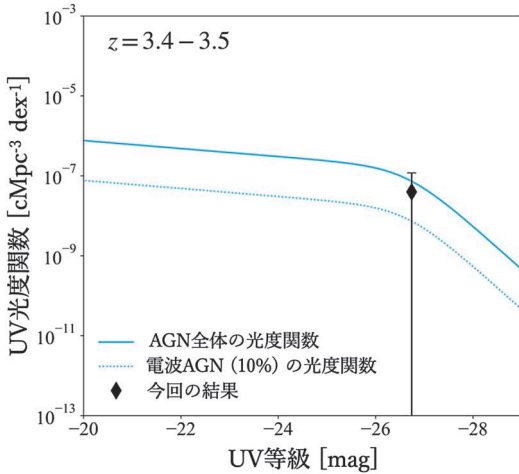


図5 AGNのUV光度関数. 実線はAGN全体の光度関数, 点線は電波AGNの割合を10%と仮定したときの電波AGN光度関数. 今回の研究結果によって得られた電波AGNの数密度は, 従来の電波AGN光度関数を大きく上回っている.

した.

eROSITA/eFEDSの65 deg²領域内で少なくとも1天体の電波クエーサーが発見されたことを踏まえ, UV光度から赤方偏移3.4-3.5における電波クエーサーの数密度を推定したところ, $n \approx 4 \times 10^{-8} \text{ Mpc}^{-3}$ と求まった. この値は, UVのAGN光度関数(光度と数密度の関係)から求めた同じUV光度におけるAGNの数密度の約57%に相当する. つまり, 今まで考えられていた約10%という電波AGNの割合を大きく上回る結果となった(図5). この結果は, 少なくとも赤方偏移3.4付近における電波AGNの数密度は, 従来のUV観測に基づく見積もりでは過小評価されている可能性が高いということを示唆している. 言い換えると, いまだ見つかっていない電波AGNが多く存在している可能性を示唆しており, 高赤方偏移において未検出の電波AGNやクエーサーを明らかにする広域電波サーベイの重要性を強く示している.

電波AGNがどのくらい多く存在するのか, という問いは, AGNとその母銀河の共進化を探る

上でも非常に重要である. AGNと母銀河は, お互いに影響を与え合って進化してきたと考えられているが, 中でもAGNの活動によって母銀河の星形成が抑制(あるいは促進)される現象をAGNフィードバックという[20]. このAGNフィードバックを引き起こす要因の1つとして考えられているのが, 電波AGNから放射される宇宙ジェットである. そのため, 電波AGNの割合を正しく理解することは, AGNと母銀河の共進化においてどの程度AGNフィードバックが効き得るのかを理解することにつながる. 今回の結果は, $z=3$ を超えるような初期宇宙において, 電波AGNによるAGNフィードバックが無視できない役割を果たす可能性を示唆しているといえるだろう.

7. 今後の展望

本稿では, eROSITA/eFEDS広域X線サーベイとVLA/FIRST広域電波サーベイのクロスマッチによって発見された, X線でも電波でも明るい超臨界降着クエーサーID830($z=3.4$)について紹介した. この天体はX線が非常に明るく, X線光度に基づくエディントン比($\lambda_{\text{Edd}}=12.8$)が正しければ, 史上最速級の成長を遂げていることとなり, SMBHの起源解明にまた一歩近づくきっかけとなる.

今後の展望としては, Very Long Baseline Array (VLBA)による高空間分解能の電波観測を予定している. 超臨界降着下でのジェット形成機構はいまだよくわかっていない部分が多い. 理論的には超臨界降着状態におけるジェット形成が可能であることが示唆されている[21]ものの, そのような天体が実際に発見された例は少なく, 観測的な理解はまだまだこれからである. VLBAはミリ秒角にもおよぶ高い分解能を有しているため, ID830のような遠方天体においてもSMBH近傍の活動を詳細に追うことができる. そのため, 今回の研究で超臨界降着状態にあることが確認され

たID830をVLBAで観測し、その電波光度がどこから来ているのかを知ることができれば、超臨界降着でのジェット形成の解明にも大きく近づくことができると思われる。また、電波ジェットの放射が、本稿でも取り上げたようなクエーサーの遷移過程や過剰なX線放射とどのように関連しているのかについても迫れるかもしれない。この観測はすでに2025年5月に実施済みであり、今後の解析によってその結果を報告できればと思う。

謝辞

本稿で紹介した研究内容は、著者らの出版論文[22]および著者の早稲田大学卒業論文に基づいています。指導教員である東北大学の市川幸平准教授には、当時天文学の知識が全くなかったにもかかわらず、一から丁寧に指導いただき、長時間にわたる議論にもお付き合いいただきました。ここに深く感謝申し上げます。また、天文月報編集委員の田中壱氏には、本稿を執筆する貴重な機会を与えてくださったこと、厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] Abramowicz, M. A., et al., 1988, ApJ, 332, 646
- [2] Ohsuga, K., et al., 2005, ApJ, 628, 368
- [3] 大須賀健, 2009, 天文月報, 102, 318
- [4] 杉村和幸, 2017, 天文月報, 110, 635
- [5] Doi, A., et al., 2012, ApJ, 760, 41
- [6] Brunner, H., et al., 2022, A&A, 661, A1

- [7] Helfand, D. J., et al., 2015, ApJ, 801, 26
- [8] Ichikawa, K., et al., 2023, A&A, 672, A171
- [9] Shen, Y., et al., 2011, ApJS, 194, 45
- [10] Ichikawa, T., et al., 2006, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, 6269, 626916
- [11] Suzuki, R., et al., 2008, PASJ, 60, 1347
- [12] Tananbaum, H., et al., 1979, ApJ, 234, L9
- [13] Matthee, J., et al., 2024, ApJ, 963, 129
- [14] Inayoshi, K., & Ichikawa, K., 2024, ApJ, 973, L49
- [15] Inayoshi, K., et al., 2025, PASJ, 77, 811
- [16] Ricci, C., & Trakhtenbrot, B., 2023, Nat. Astron., 7, 1282
- [17] Li, R., et al., 2024, ApJ, 975, 140
- [18] Trakhtenbrot, B., et al., 2019, ApJ, 883, 94
- [19] Ivezić, Ž., et al., 2002, AJ, 124, 2364
- [20] Fabian, A. C., 2012, ARA&A, 50, 455
- [21] Blandford, R., et al., 2019, ARA&A, 57, 467
- [22] Obuchi, S., et al., 2026, ApJ, 997, 156

Multiwavelength Studies of a Rapidly Growing Supermassive Black Hole

Sakiko OBUCHI

Waseda University, 3-4-1 Okubo, Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan

Abstract: Supermassive black holes (SMBHs), millions to billions of times the mass of the Sun, sit in the centers of most galaxies. They grow by accreting surrounding gas, yet a fundamental puzzle remains: how some of them became so massive at early stages of cosmic history. We have discovered an SMBH in the early universe, about 12 billion years ago, that is undergoing extremely rapid growth. Despite accreting enormous amounts of gas, this object exhibits rule-breaking properties, shining brightly in both X-rays and radio. In this article, we present the intriguing results of this source revealed by the multiwavelength observations.