

HSCとJWSTで迫る大質量ブラックホール ——母銀河共進化関係の起源



尾上 匡房^{1,2,3}

〈¹ 北京大学カブリ天文与天体物理研究所 (KIAA), Beijing 100871, P. R. China〉

〈² 東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構 (Kavli IPMU) 〒277-8582 千葉県柏市柏の葉 5-1-5〉

〈³ マックスプランク天文学研究所 (MPIA), Koenigstuhl 17, D-69117 Heidelberg, Germany〉

e-mail: ¹ onoue@mpia.de

10億太陽質量の大質量ブラックホールが宇宙年齢10億年未満の初期宇宙に発見されて久しい。キューサーとして観測されるこれらの遠方ブラックホールの多くはエディントン限界付近の高い質量降着率で活動しており、さらに近年のアルマ観測から母銀河の星形成も非常に活発であることがわかってきた。近傍宇宙で知られるブラックホールと母銀河との共進化関係を考えれば両者の進化が密接に関係していることは明らかである一方、その起源は赤方偏移 $z>1$ での観測、特に明るい中心核に隠れた母銀河観測の難しさによって未だによく理解されていない。本稿ではJWST Cycle 1 GOプログラムの1つである、すばる望遠鏡Hyper Suprime-Cam戦略枠プログラムにより発見された赤方偏移 $z=6$ の低光度キューサーのNIRSpec分光、NIRCam撮像観測について紹介する。

1. はじめに

連星ブラックホールからの重力波検出やEvent Horizon Telescopeによるブラックホールシャドウの検出、さらには天の川銀河中心の大質量ブラックホール観測に対するノーベル物理学賞贈呈など、近年ブラックホールを巡る大ニュースが続いている。まさにブラックホール観測黄金期とも言えるかもしれない。

そんな昨今ではあるが銀河中心の大質量ブラックホール (10^{6-10} 太陽質量 (M_{\odot})) の起源とその初期成長の様子については未だ解決していない問題が多い。まず赤方偏移6-7 (宇宙年齢7-9億年) でキューサーとして観測される遠方大質量ブラックホールのほとんどが $10^9 M_{\odot}$ 程度を持っていることが知られている [1]。これは全時代の中でみても最重量級であり、若い宇宙にこれらが存在することは驚くべき事実だ。またこれらの多くはエディン

トン限界付近の高い活動性を示す。大質量ブラックホールの種がどのような過程、初期質量で生まれたかは大きな議論的になっており、 $10-100 M_{\odot}$ 程度から $10^6 M_{\odot}$ 程度にわたるまで、複数の理論シナリオが異なる予測をしている [2]。

大質量ブラックホールと母銀河との共進化関係の起源の理解も重要未解決問題の1つだ。近傍銀河の観測から銀河のバルジ成分の速度分散および質量と中心ブラックホールの質量の間に強い正の相関がみられることが知られている [3]。だが、重さもサイズも全く異なる両者がどのようにしてお互いの連携を取っているのだろうか。宇宙論的シミュレーションによれば中心ブラックホールからの強い輻射が母銀河の星形成を抑制する、いわゆるAGNフィードバックが共進化関係の確立に必要な機構であることが示唆されている [4]。一方で銀河とブラックホールのどちらが先に成長したのかは先述の種ブラックホール質量の不定性とも相まって十分な

理解が得られていない。これは宇宙史における「鶏が先か、卵が先か」問題とも言えるだろう。

2. JWSTによる高赤方偏移クェーサー観測

まだ謎の多い大質量ブラックホールの形成、初期成長について、JWSTが何を教えてくれるだろうか。Cycle 1では高赤方偏移 ($z \geq 6$) クェーサーに関する観測提案が数多く採択されたが、それらにはいくつか共通する科学目的がある。その中でも一番注目を集めるのが母銀河の検出だ。中心核が明るいI型のAGNの場合、明るいブラックホールに隠れた母銀河の星からの光を検出することは容易でない。赤方偏移 $z \leq 2$ ではハッブルや地上望遠鏡による高空間分解能の撮像データを用いて、中心のAGN成分を画像から差し引くことにより広がった母銀河を検出し母銀河星質量の測定がされてきた [5, 6]。しかし、こういった観測を赤方偏移 $z > 2$ で行うことは難しく、クェーサー母銀河の星質量や星種族といった性質の直接測定は成功していない [7]。この点で近赤外線の高空間分解能・高感度観測を実現するJWSTはクェーサー母銀河の性質や共進化関係の起源を探るうえで非常に強力な観測手段となる。

クェーサー周囲の銀河の密集度の測定から遠方クェーサーの発現する環境を調べることも可能だ。この種の観測はすばる等の地上望遠鏡でも試みられてきたが、高い観測コストや観測ごとの銀河の選択手法の違いにより未だ結論は得られていない。JWST/NIRCamは $z \geq 6$ クェーサーのバルマー輝線を捉えられる狭帯域フィルターやスリットレス分光機能が備えられており、 ≥ 10 領域でクェーサー周囲の銀河を同定すれば遠方に存在する $10^9 M_{\odot}$ の大質量ブラックホールが原始銀河団のような高密度環境で生まれたかを十分検証できるだろう。他にも、広い観測波長域と多様な観測モードを活かせばAGNの広・狭輝線領域の物理・化学的性質、中心核から銀河スケールにわた

るアウトフロー、あるいは静止系紫外観測では検出の難しいダストに隠されたII型AGNの探査など、これまで実現できなかった魅力的なサイエンスがJWSTによって可能になると期待される。また最新の理論研究では $M_{\text{BH}} \sim 10^5 M_{\odot}$ の種ブラックホールが $\sim 2\text{Myr}$ 程度のタイムスケールで超エディントン降着を起こしJWSTによって検出可能になるという予測もある [8]。

3. すばるが見つけた遠方クェーサーとJWST

今回我々がJWST Cycle 1に提案したのは“Full Census of Super Massive Black Holes and Host Galaxies at $z=6$ ” というミディアムカテゴリのプログラムだ [9]。本観測では赤方偏移 $z \sim 6$ で知られている最も暗いクェーサー 12個をNIRSpec, NIRCamの2つの装置でそれぞれ分光、撮像観測し、初期宇宙での大質量ブラックホール成長と母銀河との共進化関係について包括的な描像を得ることを目指す。観測チームは筆者をPIとする国際チーム (45人) で、これまで協力して研究を進めてきたHSCすばる戦略枠プログラム (HSC-SSP) の共同研究者の方々に加え、筆者がMPIAに所属していた際に交流のあった欧米の観測、理論家にも協力していただいた。

今回のターゲットはすべてすばる望遠鏡Hyper Suprime-Camによる広視野サーベイ観測*1の中から見つかったものだ。HSC-SSPは可視光で広さと深さが両立した現時点で唯一無二のサーベイであり、空間的に稀な ($\sim 1 \text{Gpc}^{-3} \text{mag}^{-1}$) クェーサーを広い光度範囲で探査できる点で非常に強力である。これまでに報告されている $z > 5.8$ クェーサーの分布 (図1) を見ると低光度側 (紫外絶対等級 $M_{1450} \geq -25 \text{mag}$) をHSCクェーサーが独占している様子がわかる [11, 12]。今回の観測ではHSC-SSPでクェーサー探査が完了している 650deg^2 の領域 [13] にある $M_{1450} < -24$ かつ赤方偏移 $6.18 \leq z \leq 6.40$ のクェーサー 10個と、速度幅の広い

$\text{Ly}\alpha$ 輝線が見えている中で最も暗い2つを合わせた計12個をターゲットサンプルとした。

低光度キューサーに着目した理由はいくつかある。明るいキューサーに関しては地上望遠鏡による近赤外分光観測からブラックホール質量の測定が行われてきた [1, 14]。しかし、これら氷山の一角の観測だけでは最も質量が重く、かつ活動性も高いような極端なブラックホール種族しか捉えられない。我々はこれまでも地上8m級望遠鏡を使ってHSCキューサーのブラックホール質量測定を行ってきた [15] が、背景光が明るい地上近赤外観測の感度限界のためHSC y バンド23-24等のキューサーについては興味深いターゲットではあるものの近赤外分光追観測が不可能だった。それゆえに、これらの遠方で最も暗いキューサーはJWSTターゲットとして最適である。また相対的に中心核が暗い分、明るいキューサーを狙う他プロジェクトと比べて隠れた母銀河の検出可能性が高いと期待される。

4. NIRSpec, NIRCам追観測

4.1 NIRSpecによるブラックホール質量測定

NIRSpecでは感度の高いFixed Slitモードを使ってターゲットのスペクトル（静止波長4000–7300 Å）を得る。主目的は $\text{H}\beta$ 輝線を使ったブラックホール質量の推定だ*²。図2にこれまでブラックホール質量が測定されている $z > 5.8$ キューサーの質量-全光度分布を示す。先述した地上観測の感度の限界はあるものの、全光度 $L_{\text{bol}} \sim 10^{46} \text{ erg s}^{-1}$ の比較的low光度側では質量の分散が大きくなっており、急速に成長する若いブラックホールから逆に成長が終わり活動性が弱まった重いブラックホールまで幅広い種族が存在している様子がわかる [15]。

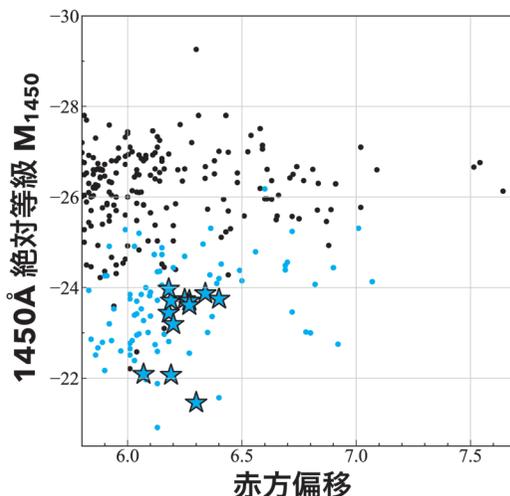


図1 これまでに発見された $z > 5.8$ キューサーの赤方偏移-静止系紫外絶対等級 (M_{1450}) 分布。青点がHSC-SSPによって発見された天体。そのうちJWSTターゲット12個を青星で示した。

図2に示したように今回のJWST観測では低赤方偏移でのSDSS観測と同程度まで光度範囲を広げることができる。JWSTターゲットを選んだ同じ領域に存在する $M_{1450} > -24$ 等のキューサーについては地上観測によりブラックホール質量測定が完了しており、JWSTと地上追観測のターゲットを合わせた計33天体のサンプルから統計的に赤方偏移 $z \sim 6$ でのブラックホール質量とエディントン比の分布、さらにそれらの赤方偏移進化を議論可能だ。またエディントン限界を遙かに超えた激しい降着を起こしている $M_{\text{BH}} \sim 10^7 M_{\odot}$ のブラックホールが1つでも同定されれば大質量ブラックホールの種質量や初期成長過程の理解に対して大きなインパクトをもたらすだろう。

4.2 NIRCамによる母銀河星質量測定

NIRCамではF150WとF356Wの2つのフィルターによる同時撮像を行い、中心核由来の点源成

*¹ HSC-SSPの詳細や初期成果については天文月報特集号（2019年2-4号）参照。HSC-SSPにおける $z > 6$ キューサー探索の詳細については松岡良樹氏による天文月報記事 [10] 参照。

*² 遠方でのブラックホール質量測定はsingle epoch methodという、中心核に束縛されて高速運動している広輝線領域ガスからの輝線の速度幅と連続光の強度を用いる手法が主流だ [16]。

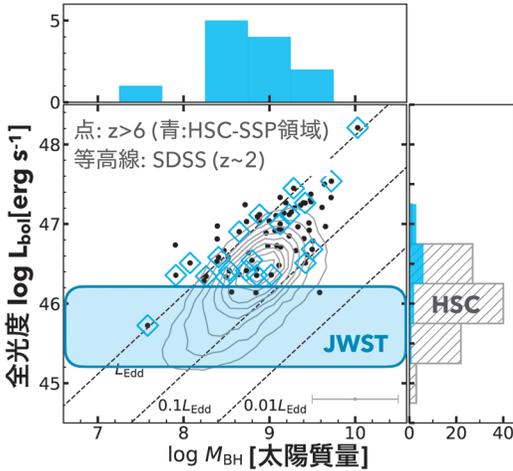


図2 赤方偏移 $z > 5.8$ キューサーのブラックホール質量と紫外光度から換算した全光度の分布図(黒点). Matsuoka, et al. [13] で定義された HSC-SSP 観測領域 650 deg^2 内の天体を青で重ねて示した. 等高線は低赤方偏移 ($z \sim 2$) の SDSS サンプル. 斜線はエディントン比 (左上から 1, 0.1, 0.01). 全 HSC キューサーの全光度分布を右のヒストグラムに示した (灰斜線).

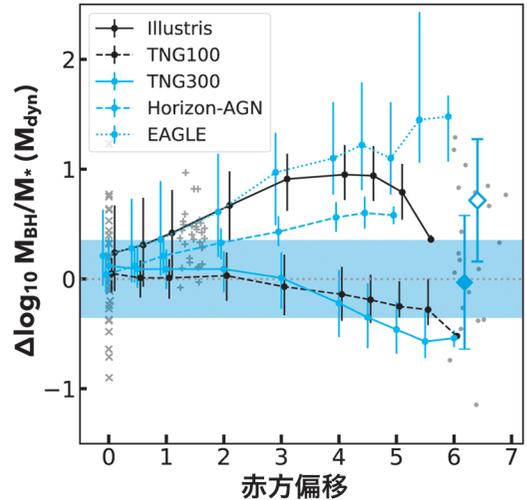


図3 ブラックホール質量 vs 母銀河星質量比の赤方偏移進化 ($z=0$ での値で規格化). 線は5つの宇宙論的シミュレーションによる理論予測[19]で, 観測データは灰色で示した. $z > 6$ はALMAによる力学的質量を基にした測定であり, $M_{1450} = -25$ より明るいサンプルと暗いサンプルの中央値と分散を青菱点(それぞれ中抜き, 中塗り)で示した[20]. 本観測から干0.35 dex以上のずれを 3σ で検出できる.

分と母銀河由来の広がった成分に切り分けることで埋もれた母銀河検出を目指す. これらのフィルターはターゲット母銀河の 4000\AA ブレイクを跨ぐため, 2つの画像で検出された母銀河の明るさから星質量とサイズ, 星種族を推定することができる. 銀河合体の兆候や直近に付随する銀河についても検証できるだろう. また十分明るければバルジ成分を分離できる可能性もある. 母銀河検出については STScI が提供している webbPSF というツールを用いて画像シミュレーションを行っており, 低赤方偏移キューサーの HST データに対して適用されている手法 [6] を応用することで NIRCам 1 時間積分で母銀河光度を十分推定できることを確かめている.

高赤方偏移のキューサー母銀河の星質量は, これまで母銀河のガスの運動から求まる力学的質量によって $M_{\text{dyn}} \sim 10^{10-11} M_{\odot}$ と非常に重いことが言われている [17, 18]. しかし, この近似にはガスやダークマター等の影響やディスクの観測者に対

する傾きといった不定性が伴うため, JWST による直接的な星質量 (M_*) 測定が必須だ. また JADES 等の他プロジェクトで観測される同時代の銀河との性質の比較も重要だろう.

4.3 ブラックホール—母銀河共進化関係の起源

これらの2つの観測を合わせることで12個の低光度キューサーに対してブラックホール質量と母銀河星質量との比が得られる. 図3は赤方偏移 $z \leq 6$ でブラックホールと母銀河のどちらが早く進化したのか, あるいは両者が常に一定の相対速度で成長したのかの予測が宇宙論的シミュレーションによって大きく異なることを示す [19]. これはシミュレーション空間が大きいと AGN フィードバックのような小スケールの現象まで厳密に追うことはできず, 仮定するフィードバックの機構や強さによって振る舞いが大きく影響されることに起因する. これに対して, 我々は12個のターゲットの M_{BH}/M_* 比の平

均を求めることで近傍からの ± 0.35 dexのオフセット (3σ) を検出できる (図3).

赤方偏移 $z \lesssim 2$ での同様の観測では近傍宇宙よりブラックホールが相対的に約3倍重い傾向が見られているものの、ターゲット選択の光度バイアスを含めて考慮すると $0 \leq z \leq 2$ の間で無進化でも矛盾ない結果となっている [6]. アルマによる母銀河力学的質量測定から推測される $M_{\text{BH}}/M_{\text{dyn}}$ 比を見ると $L_{\text{bol}} \gtrsim 10^{46}$ erg s $^{-1}$ の低光度側では近傍と変わらず共進化関係が $z \sim 6-7$ で既に成立していた可能性が議論されている [20]. 今回のJWST観測によって先行研究より暗いキューサーの正確なブラックホール質量と母銀河星質量が測定できるので、これによりブラックホール—母銀河共進化の起源についてバイアスの少ない信頼できる知見が得られるだろう.

謝 辞

この原稿を作るにあたっては、2021年度の天文月報編集委員の方々大変お世話になった。ここでお礼を申しあげる。また日頃よりお世話になっている松岡良樹、泉拓磨両氏をはじめとするSHELLQsチームの皆様、さらにMPIAをはじめとする欧米の他の観測提案チームのメンバーの皆様には今回の観測提案策定にあたり非常に多くの助けをいただいた。院生時代から絶対に関わりたと思っていたJWSTの最初の観測時間を獲得できたことに対して、この場を借りて改めて感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Wang, F., et al., 2021, ApJ, 907, L1
- [2] Inayoshi, K., et al., 2020, ARA&A, 58, 27
- [3] Kormendy, J., & Ho, L. C., 2013, ARA&A, 51, 511
- [4] Di Matteo, T., et al., 2005, Nature, 433, 604
- [5] Jahnke, K., et al., 2009, ApJ, 706, L215
- [6] Ding, X., et al., 2020, ApJ, 888, 37
- [7] Marshall, M. A., et al., 2020, ApJ, 900, 21
- [8] Inayoshi, K., et al., 2021, arXiv e-prints, arXiv:2110.10693
- [9] Onoue, M., et al., 2021, JWST Proposal. Cycle 1, 1967
- [10] 松岡良樹 2018, 天文月報 111, 11, 760
- [11] Matsuoka, Y., et al., 2016, ApJ, 828, 26
- [12] Matsuoka, Y., et al., 2019, ApJ, 883, 183
- [13] Matsuoka, Y., et al., 2018, ApJ, 869, 150
- [14] Shen, Y., et al., 2019, ApJ, 873, 35
- [15] Onoue, M., et al., 2019, ApJ, 880, 77
- [16] Vestergaard, M., & Peterson, B. M., 2006, ApJ, 641, 689
- [17] Walter, F., et al., 2004, ApJ, 615, L17
- [18] Neeleman, M., et al., 2021, ApJ, 911, 141
- [19] Habouzit, M., et al., 2021, MNRAS, 503, 1940
- [20] Izumi, T., et al., 2019, PASJ, 71, 111

A Complete Census of Supermassive Black Holes and Host Galaxies at $z=6$

Masafusa ONOUE

Max-Planck-Institut fuer Astronomie,
Koenigstuhl 17, D-69117 Heidelberg, Germany

Abstract: There existed billion-solar-mass supermassive black holes (SMBHs) within the first years of the universe. How could such massive systems form in the early universe? Did SMBHs grow faster than their host stellar contents compared to what is known in the local universe? In this article, one of the JWST Cycle 1 GO programs that aims to derive a comprehensive picture of SMBHs and their host galaxies at $z \sim 6$ is introduced, in which 12 of the lowest-luminosity quasars will be observed by NIRSpc Fixed-Slit spectroscopy and NIRCcam broad-band imaging.