

JWSTで二重クエーサーの謎に迫る

石川 雄三

〈Johns Hopkins University, 3400 N. Charles Street, Baltimore, MD 21218 USA〉

e-mail: yishika2@jhu.edu



長い年月を経てやっとJWSTの打ち上げを見届けることができる。超大質量ブラックホールと銀河の形成と進化はまだ解明されていない。銀河同士が衝突すると各銀河にあるブラックホールにどのような影響を及ぼすのか、反対に衝突合体へ進むブラックホールによるフィードバックは銀河・星・ガスにどのような影響を及ぼすのか。我々は2つの高赤方偏移近距離二重クエーサーの発見をすでに成功しており、これらの天体をJWST/NIRSpecとMIRIで観測するプロジェクト（GO2654）が第一期観測提案（Cycle 1）として採択された。二重クエーサーによるフィードバックはJWSTの極めて高い感度能力により可能な観測になる。これらのサイエンスを本稿で紹介させていただく。

1. はじめに

私はJohns Hopkins Universityで現在博士課程の学生でクエーサー・銀河の形成と進化の研究をしている。特にブラックホールの形成に興味があり、大学院で研究を始めた頃にジェームズウェッブ宇宙望遠鏡（JWST）のプロジェクトに参加したいとは思っていたものの、2020年10月に指導教員から「JWSTのproposalを書いてみないか」との提案が出るまで真剣にJWST観測提案を考えていなかった。締め切りがあとわずかという時期に全く新しいプロジェクトを始めることになってしまうが「やるぞ!」という思いで書いてみたら、信じられないことにそれが第一期General Observer（GO）プログラムに選抜された。このプロジェクトは私にとって初めてのproposalとなる。

私はアメリカで生まれ育った日系人で、本稿の依頼をいただき、日本人PIとしてこの天文月報に我々のプロジェクトを紹介させていただけることを心より感謝している。在学中の大学で多少自分の研究を紹介することはあるが、このように日本語で執筆するのは初めてとなり、今回JWSTプ

ログラムを紹介するという大変貴重な経験をさせていただく。

2021年10月にこの原稿を執筆しているのでJWSTが無事打ち上がっていることを想定し、我々のJWSTプログラムの紹介をする。本計画はブラックホールと銀河サイエンスのどちらにも焦点を当てたものとなっており、鍵となる問いは「どのようにブラックホールと銀河は共進化し、それをどのように観測で明らかにするのか」である。しかしブラックホールと銀河の形成・進化にあたるサイエンスのすべての検討を紹介するにはここでは紙面が足りないため、本稿ではこのプロジェクトのキーポイントを紹介する。これからのJWST観測による数々の発見を期待しながらお楽しみいただきたい。

2. 背景：銀河の衝突と二重クエーサー

2.1 ブラックホールと銀河の関係？

ほとんどの銀河の中心には超大質量ブラックホール（supermassive black hole: SMBH）が存在すると考えられる。我々のJWSTプログラム（GO:2654 [1]）は3つの問いに迫る。(1) SMBH

はどのように形成・進化したのか？ (2) SMBH はどのように合体するのか？ (3) SMBHと銀河形成との間の関係とは？

このように銀河と中心に存在する超大質量ブラックホールの形成と進化にどのような関係があるのかは宇宙物理学上の未解決問題である。銀河系をはじめとする数々の銀河の特質（バルジの質量）と中心に位置する超大質量ブラックホール（質量と速度分散）には強い相関が見られており、これらを説明するため銀河とブラックホールの共進化（co-evolution）の仮説（クエーサーフィードバックなど [2, 3]）が提案されているものの、その相関の起源はまだはっきりとわかっていないのが現状である。

2.2 ブラックホールの合体！

ブラックホールの成長の重要な過程のひとつとして、銀河衝突によるブラックホール同士の合体成長がある [4]。2015年にLIGO/VIRGOによる重力波の観測からブラックホール連星の合体が証明され [5]、数十個ものブラックホール同士の合体が確認されていることからブラックホール合体は宇宙で普遍的に起きている現象であることがわかる。しかし、これらは数十太陽質量のブラックホールによる合体であり、連星SMBHによる合体はいまだ観測されていない。LISA宇宙重力波望遠鏡などによる観測が待たれるが、それはまだ10年以上先の話であり、現状の望遠鏡でSMBH合体に迫る観測ができないかと我々は考えた。

その答えに至る前にまずはそれぞれの銀河に存在するSMBH同士が合体するまでの過程を紹介しよう。2つの銀河の衝突により各銀河中心のSMBHが合体へのインスパイラル軌道に進むと考えられる。この際、天体やガスによる衝突・摩擦により2つのSMBHがエネルギーを失いどんどん距離を縮めていく [4, 6-9]。このプロセスを研究するためには合体へ進むSMBH連星を色々な進化段階（SMBH同士の距離）で観測する必要がある。合体開始段階（dual: 距離 \sim 10 kpc）や、

重力に束縛された段階（binary: 距離 $<$ 10 pc）、合体直前にあたる最後の段階（距離 \sim 1 pc）など、様々な段階が存在する [10-13]。理論ではブラックホールがどのようなメカニズムにより最後の1 pcを乗り越えるかが立証されていないため（ファイナルパーセック問題）、観測が必要となる。

2.3 クエーサーによるフィードバック

SMBH同士の合体による成長に加え、ガスなどを飲み込み質量降着によるSMBH成長もある。このように物質を飲み込むとブラックホール周辺に渦巻く降着円盤内のガスなどが摩擦により強烈な光を放つ。銀河中心のSMBHがこのように活動しているものを活動銀河核と呼ぶ。クエーサーは活動銀河核の一種であり、最も明るく大きな赤方偏移を持ち遠距離に位置する天体の一つとされている。SMBHの起源の謎と同様にクエーサーがどのように点火するのかいまだ解明されていない。明らかなことは何らかのメカニズム（銀河衝突や永年質量降着など）により銀河中心部への質量降着が必要とされることである [14]。

クエーサーは銀河の数百・数千倍以上のエネルギーを放ち、あらゆる電磁波で観測されている。そして質量降着によって引き起こされる強大なエネルギーの放出・アウトフローにより銀河形成に影響を及ぼすと考えられている [15, 16]。例えば、強力なアウトフローは星形成に必要な分子ガスを銀河から排出し、星形成活動の停止を及ぼすと考えられる。このような現象をクエーサーフィードバックと呼び、クエーサー活動は銀河との共進化に繋がると考えられる。しかし、クエーサーフィードバックの影響の定量的理解はまだ進んでいない。

更に銀河衝突によって合体へ進む2つのSMBHが点火しクエーサー化する状況が非常に興味深いケースとなる。このシステムを二重クエーサーと呼び、現状では二重クエーサーの特性や銀河へのクエーサーフィードバックが不明である。よって

銀河衝突を繰り返して成長する銀河の進化過程において、SMBH同士の合体による銀河へのフィードバックの解明が不可欠となる。高赤方偏移のSMBHと銀河の共進化過程は観測的に難しいが、二重クエーサーとして観測できる場合、可能であると我々は考えた。本JWSTプログラムはこのように二重クエーサーによる銀河へのフィードバックを明らかにするユニークな提案となる。

3. 発見：100億年前の二重クエーサー

二重クエーサーの発見率は現在数個程しか発見されておらず、そのほとんどは近傍銀河での発見である。2021年に我々の研究チームは2つの二重クエーサー (J0749+2255とJ0841+4825) の発見をした [17]。この2つの二重クエーサーの角距離は $\sim 0.5''$ (物理的距離 ~ 3.5 kpc) で非常に距離が狭く、赤方偏移が $z=2.17$ と $z=2.95$ で100億年前のものとなりこれまで発見された数少ない近距離二重クエーサーのなかで最も遠方のものになる [17, 18]。赤方偏移 $z\sim 2-3$ は星形成率とクエーサー活動率がピークに達しており銀河衝突が頻繁に起こる銀河の形成史のなかで興味深い時期となる。この2つの二重クエーサーが今回のJWST観測のターゲットである。

二重クエーサーはどのように発見するのか？ 様々な発見方法があるが [19, 20]、今までの方法

を簡単に説明すると大量の撮像データから見かけの距離の短い連星候補をまず選び分光法などの追加観測で候補を絞る。しかし、このようなプロセスの候補発見率は低く時間もかかる。

さらに、我々が対象としているターゲットは合体がさらに進んだ段階の二重クエーサー (dual/binary) のため、従来の望遠鏡・手法では空間分解が非常に難しい。この問題に対処するためHwang氏の研究により我々は新たな検出方法を開発した [21, 22]。Hwang氏は近距離連星はその回転中に光の重心が微妙に揺れ動き、しかもこの揺れ幅が連星の角距離と相関することを明らかにした (図1)。このような観測は位置天文衛星ガイアで可能となり [23]、'varstrometry' と呼ばれる手法の開発に至ったのである。ちなみに varstrometry は variable+astrometry を合わせた造語となる。

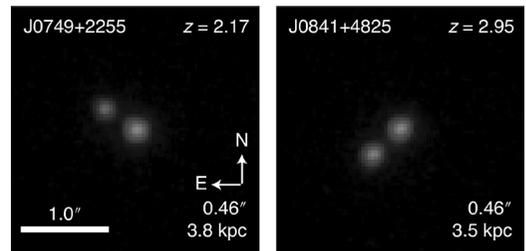


図2 ハッブル望遠鏡によって撮影された二重クエーサー。(左) J0749+2255, (右) J0841+4825 [17]。

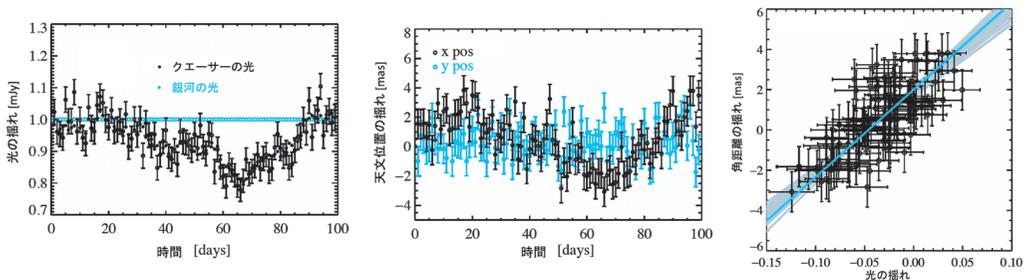


図1 Varstrometryを使った二重クエーサーのような近距離 (角距離100 mas) 連星による光 (左) と天文位置 (中) の揺れのシミュレーション。(右) 連星による位置の揺れの大きさ (y軸) と光の揺れ (x軸) と関連して連星同士の角距離・距離を検出することができる [21]。

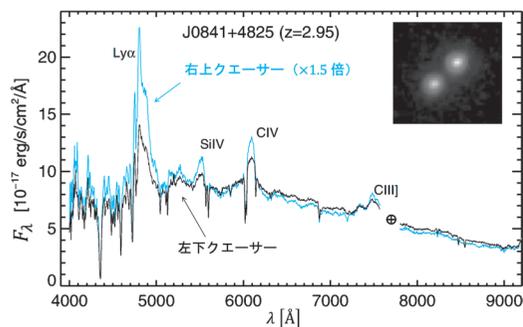


図3 Geminiが観測したJ0841+4825 (図2右を参照)のスペクトル [17]。空間分解された2つの各天体からクエーサースペクトル(黒・青)が検出されたことから二重クエーサーであることがわかる。幅の広いクエーサー特有の輝線からアウトフローの検出が可能である。

Varstrometryはこれらの揺れを観測するだけで候補を効率よく検出することが可能となり高赤方偏移連星の検出にも有効である。我々はガイア観測から候補のリストを作成し、Sloan Digital Sky Survey (SDSS) などのクエーサーカタログと照らし合わせ、以前から知られていたターゲットや新たな近距離二重クエーサーの検出に成功した [17, 20, 22, 24]。このようにして先に述べた2つの二重クエーサーの検出に成功し、ハッブル宇宙望遠鏡の高空間分解能イメージング(図2)やGemini分光観測(図3)などの追加観測により二重クエーサーであることが確定した。

4. JWSTが切り開くフロンティア

4.1 JWSTの面分光

クエーサーフィードバックや銀河内の星形成活動の指標となる輝線、吸収、連続スペクトルを観測し個々の関係を探る必要がある。しかし重要な静止系可視光スペクトルは赤方偏移により赤外線波長帯に移ってしまい、また地球の大気による赤外線の吸収により地上からの観測が非常に困難となる。そのため、JWSTにより高感度で大気窓の切れ目がないスペクトルを初めて観測することができる。JWSTの分光波長感度範囲は近赤外

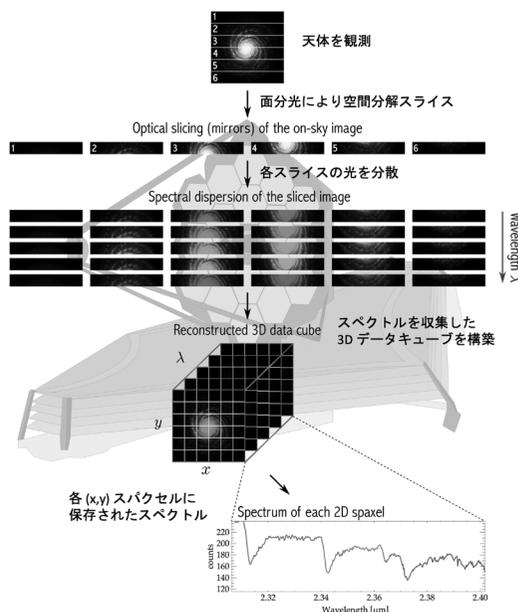


図4 JWST IFSの解析過程のフローチャート [25]。

線帯 (NIR) 0.6–5 μm と中間赤外線帯 (MIR) 5–28 μm でイメージングカメラと分光装置両方備えている。このプロジェクトでは近赤外分光器 Near-Infrared Spectrograph (NIRSpec) と中間赤外分光器 Mid-Infrared Instrument (MIRI) でクエーサーを観測する予定である。特にNIRSpecとMIRIの面分光ユニットは空間分解と分光のどちらの役割も備えている。

面分光 (integral field spectroscopy: IFS) の能力を簡単に紹介する (図4を参照)。IFSは撮像観測と分光観測を組み合わせたユニークな手法である。IFSは一般の分光器のように光を分散し波長ごとにスペクトルを構成する。これに加えて観測視野を地図のゾーンのように分けたスパクセル (spaxel) ごとにスペクトルを一度に構成する。事実上スパクセルポジション (x, y) 一つ一つにスペクトルを保存し (x, y, λ) といったデータキューブを構築する。

このようにIFSによる「スペクトルの地図」を構成し各ターゲットの内部構造や組成を精密に解明することができる。例えばクエーサーアウトフ

ローを指標する $[\text{OIII}]\lambda 5007 \text{ \AA}$ 輝線の空間分配や速度、星形成やダストを指標する PAH 輝線の分配 [26, 27] などのマッピングをすることが可能となる。最近では Keck や VLT など面に分光器が使用され、すばる望遠鏡/PFS や SDSS/MaNGA で使用されている光ファイバーをベースとした多重分光法装置も同様のデザイン哲学で採用されている。ただし JWST は NIR と MIR 両波長帯をカバーする IFS を搭載する初の宇宙望遠鏡となり今までに不可能だった観測をすることになる。

4.2 JWST 観測プラン

このプロジェクトでは2つの $z \sim 2-3$ 二重クエーサー (J0749+2255 と J0841+4825) を NIRSpec と MIRI IFS で観測する予定である。目的は:

- 1) 二重クエーサーの存在の証明
- 2) $H\beta$ を用いた SMBH 質量の測定
- 3) クエーサーフィードバック ($[\text{OIII}]\lambda 5007 \text{ \AA}$ アウトフローなど) の測定
- 4) 銀河の特質 (星形成やガスなど) の測定
- 5) 銀河衝突による銀河内・SMBH へのガスの落下の測定。

簡単に言えばクエーサーフィードバックの特質は NIR, 星形成活動などの特質は MIR で取得する。そしてクエーサーの明るい点像分布関数 (PSF) をモデル化し取り除くことでかすかな銀河の光・スペクトルを検出することが可能である [28, 29]。NIR と MIR を比較することによりクエーサーフィードバックの影響を調べることができる。宇宙論的赤方偏移によりこのような観測は JWST ならではのプロジェクトとなり、どのような発見が待っているのかが待ち遠しい限りである。

最後に私は Q3D という JWST Early Release Science プログラム (ERS: 1335 [30]) にも参加させて頂いている。現在 Q3D チームは JWST 面分光データに特化したクエーサー PSF 分解分光分析 Python ソフトの開発にあたっている [28, 31]。私はこのソフトの開発の経験も活かして自分の

GO プログラムに応用したいと思っている。ERS プログラムがスタートするにはこのソフトは一般に公開される予定である。もし皆さんの研究の役に立つならば、ぜひご覧になっていただきたい。

5. ま と め

二重クエーサーの観測を通したブラックホールと銀河の共進化についての研究は JWST の打ち上げに伴い今後間違いなく研究の本流となるだろう。本稿では我々の JWST Cycle 1 プログラム (GO: 2654) による JWST NIRSpec と MIRI IFU を使った二重クエーサーを観測計画を紹介させていただいた。JWST の観測により二重ブラックホールの謎に明かりを照らしたいと思う。銀河の衝突やブラックホール合体は遠い銀河だけの問題ではなく、50 億年後には銀河系とアンドロメダ銀河の衝突が予想されていることから我々が住む銀河系がどのように進化するのかを知る貴重な機会にもなるだろう。

JWST の打ち上げ、コミッショニングプログラムが無事完了するまでハラハラする時期が続くが、観測開始が楽しみである。超大質量ブラックホールや銀河形成の研究にとってとてもエキサイティングな時代である。次の Cycle 2 観測提案では私のような大学院生の方々にもぜひ JWST を使った研究に挑んで欲しいと思う。未知の世界が待っているので新たなアイデア・プロジェクトで次世代の研究者達により天文学の道を切り開くことを願っている。

謝 辞

まず Johns Hopkins University の大学院指導教官 Nadia Zakamska 氏をはじめとする研究チームの皆さん、同アドバイザーの Takahiro Morishita 氏 (Space Telescope Science Institute) と Q3D チームの皆さんに心より感謝申し上げます。素晴らしい仲間恵まれて大変貴重な経験をさせていただ

き嬉しく思います。最後に、この原稿の執筆においては市川幸平氏をはじめとする天文月報編集委員の方々に大変お世話になりました。お礼申し上げます。

参考文献

- [1] Ishikawa, Y., Liu, X., Shen, Y., Zakamska, N. L., Chen, Y.-C., & Hwang, H.-C., 2021, Kpc-scale Dual Supermassive Black Holes and Their Impact on Galaxy Formation at Cosmic Noon, JWST Proposal. Cycle 1
- [2] Silk, J., & Rees, M. J., 1998, A&A, 331, L1
- [3] Kormendy, J., & Ho, L. C., 2013, ARA&A, 51, 511
- [4] Begelman, M. C., et al., 1980, Nature, 287, 307
- [5] LIGO Scientific Collaboration, & Virgo Collaboration, 2016, Phys. Rev. Lett., 116, 061102
- [6] Gould, A., & Rix, H.-W., 2000, ApJ, 532, L29
- [7] Milosavljević, M., & Merritt, D., 2001, ApJ, 563, 34
- [8] Blaes, O., et al., 2002, ApJ, 578, 775
- [9] Yu, Q., 2002, MNRAS, 331, 935
- [10] Colpi, M., & Dotti, M., 2011, Adv Sci Lett, 4, 181
- [11] Dotti, M., et al., 2009, MNRAS, 396, 1640
- [12] Volonteri, M., et al., 2016, IAU Focus Meeting, 29B, 285
- [13] De Rosa, A., et al., 2019, New Astron. Rev., 86, 101525
- [14] Heckman, T. M., & Best, P. N., 2014, ARA&A, 52, 589
- [15] Croton, D. J., et al., 2006, MNRAS, 365, 11
- [16] Fabian, A. C., 2012, ARA&A, 50, 455
- [17] Shen, Y., et al., 2021, Nature Astron, 5, 569
- [18] Tang, S., et al., 2021, ApJ, 922, 83
- [19] Comerford, J. M., et al., 2015, ApJ, 806, 219
- [20] Liu, X., et al., 2018, ApJ, 862, 29
- [21] Hwang, H.-C., et al., 2020, ApJ, 888, 73
- [22] Shen, Y., et al., 2019, ApJ, 885, L4
- [23] Gaia Collaboration, 2016, A&A, 595, A1
- [24] Chen, Y.-C., et al., 2021, arXiv e-prints, arXiv: 2108.01672
- [25] <https://jwst-docs.stsci.edu/methods-and-roadmaps/jwst-integral-field-spectroscopy> (2022.1.25)
- [26] Smith, J. D. T., et al., 2007, ApJ, 656, 770
- [27] Zakamska, N. L., et al., 2016, MNRAS, 455, 4191
- [28] Rupke, D. S. N., et al., 2017, ApJ, 850, 40
- [29] Zakamska, N. L., et al., 2019, MNRAS, 489, 497
- [30] Wylezalek, D., Barrera-Ballesteros, J. K., Luetzgendorf, N., Nesvadba, N., Rupke, D., Sun, A.-L., Veilleux, S., & Zakamska, N. L., 2017, Q-3D: Imaging Spectroscopy of Quasar Hosts with JWST Analyzed with a Powerful New PSF Decomposition and Spectral Analysis Package, JWST Proposal ID 1335. Cycle 0 Early Release Science
- [31] Rupke, D. S. N., 2014, IFSFIT: Spectral Fitting for Integral Field Spectrographs, Astro-physics Source Code Library, record ascl:1409.005

Kpc-scale Dual Supermassive Black Holes and Their Impact on Galaxy Formation at Cosmic Noon

YUZO ISHIKAWA

The William H. Miller III Department of Physics & Astronomy, Johns Hopkins University, Baltimore, MD, USA

Abstract: The search for dual supermassive black holes is of immense interest. Following a merger of two galaxies, the two central supermassive black holes evolve into a bound binary and inspiral until they coalesce via a merger. Actively accreting black holes during the inspiral can be observed as a dual or binary quasar. Gaia observations have enabled a novel technique to discover such objects at previously unreachable sub-kpc scales. Using JWST we will study two kpc-scale dual quasars at the peak epoch of galaxy formation. We will use NIRSpec and MIRI IFUs to probe the quasars' impact on their host galaxies: the quasar fueling mechanisms, host galaxy merger signatures, host stellar continuum, and merger induced star formation.