

近赤外線分光観測に基づく遠方クエーサーの アウトフロー探査とMOIRCSデータ解析 パイプラインの開発



高橋 歩美^{1,2}

〈神奈川県横浜市神奈川区六角橋 3-27-1〉

e-mail: ¹ ayumi.takahashi969@gmail.com, ² ayumi@kanagawa-u.ac.jp

2023年8月から2024年の6月にかけてすばる望遠鏡のMOIRCSを用いて、遠方低光度クエーサーの近赤外線分光観測を実施した。本研究課題はクエーサーのCIV輝線の青い側に出現し得る広がった吸収線の有無を捉え、遠方宇宙におけるクエーサーアウトフローの出現頻度を調査することを目的としている。ここでは、ハワイ滞在の思い出や、開発したMOIRCSデータ解析パイプラインの簡単な紹介をしたい。

1. 背景

筆者は修士・博士課程で可視光の広帯域フィルターで選択されたクエーサーの分光データを通して、遠方低光度クエーサー群のブラックホール質量推定やそのほかの諸性質の統計調査を行っていた。多くのスペクトルを扱う中で、一部のクエーサーはスペクトルに幅の広い吸収線を持つことを知った。この吸収線とはなんなのか、その出現の物理的背景にはどのような現象があるのか興味を持った。後にこのアウトフローが活動銀河核 (AGN) 活動、ひいては銀河の成長史を紐解くうえで重要な要素であることを知る。先行研究を辿る中で、AGNが活発であると銀河の星形成は阻害されるのか、逆に促進されるのか結局のところどちらなのだろうか、この漠然とした疑問に対して答えを得るべく当該課題を本格的に開始するに至った。ここでは、現地観測の体験記を述べる前にまず、本観測プログラムの科学的位置づけについて紹介する。

銀河の中心には超巨大ブラックホール (SMBHs)

が存在する。SMBHsとその母銀河は空間スケールにしておよそ10億倍異なるにもかかわらず、両者の間には強い質量の相関があることが知られている [1]。この関係は「共進化」としてよく知られており、SMBHsと母銀河が宇宙の長い歴史の中で互いに深く関わり合いながら成長をしてきた可能性を示唆している。AGNおよびクエーサーはSMBHsをエネルギー源として母銀河を凌駕するほど明るく輝き、恒常的に最も宇宙を照らす天体である。SMBHsと母銀河が互いにどう関わり合っているのか、両者を直接結びつけるなんらかの物理プロセスがあるはずだ。そのカギとなるのが、クエーサーに見られるアウトフローである。

母銀河スケールに達するクエーサー駆動の高速度アウトフローガスの存在はいくつかの研究により明らかになっている [2]。また、あらゆる赤方偏移において一定の割合でクエーサーのスペクトル上で特にCIV、NVやSiIVなどの高い電離レベルにおいて広がった吸収線 (broad absorption line: BAL) が見られることがある。このBALこそが、クエーサー駆動アウトフローガスの存在を示す観

測的証拠である。アウトフローガスが星の材料を吹き飛ばし星形成率を抑える可能性や、逆に、星形成を促進する可能性が示唆されている (AGN feedback と呼ばれる)。理論的側面では、AGN feedback は銀河の形成・進化に密接に関わり、pc から Mpc スケールで影響を及ぼすと考えられている [3]。これまで、SDSS や PansTARRS, すばる望遠鏡の HSC-SSP などの地上望遠鏡可視光サーベイにより、赤方偏移が 6 を超えるクエーサーが 300 天体以上発見されている。先行研究では、可視光波長帯で明るいクエーサーの母銀河は近傍宇宙の銀河から推定されるよりも 1桁ほど小さい力学質量を持つことが示されていた [4]。銀河の成長をコントロールする何かが遠方で強く効いている可能性を示唆する。

INAF (イタリア国立天体物理学研究所) の研究者が率いる研究チームが行った、超大望遠鏡 VLT において X-Shooter を使った観測結果では、30 天体の遠方クエーサーのうち 40-47% もの高い割合で BAL を持つことが明らかにされた [5]。BAL 割合からある仮定を置くと、アウトフローガスの運動エネルギーを推定することができるのだが、彼女たちが求めた BAL 割合を使うと運動エネルギーはエディントン光度の 1-30% ということになり、これは近傍で知られていた一般的な値よりもおよそ 10 倍高い値である。このパワーは理論研究と比較すると、AGN feedback として母銀河へエネルギーを注入するのに十分であると言える [6]。一方で、より一般的な明るさを持つクエーサーではアウトフローガスの出現頻度はどの程度で、母銀河との相互関係はどのようにあるのかなどについての包括的調査は手付かずであった。

2. 本研究課題とすばる観測

我々は遠方の低光度クエーサー群の中での BAL 割合を調査するべく、すばる望遠鏡の MOIRCS を用いた近赤外線分光観測を提案した。ターゲットの選択には、すばる望遠鏡の HSC-

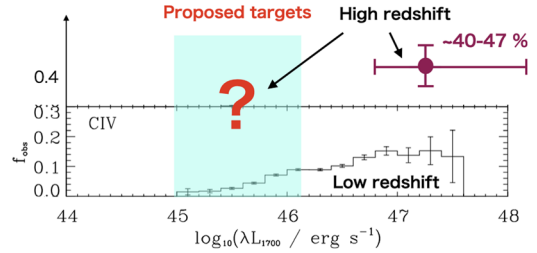


図1 1.2 $\leq z \leq 4.6$ における SDSS クエーサーの光度に対する BAL 割合進化 ([8] の図11 を修正). ハイライト部分が筆者らが提案した光度帯で、エラーバー付きの点が先行研究により測定された遠方クエーサーの BAL 割合 [5].

SSP サーベイに基づく遠方低光度クエーサー探査プロジェクト [7] により発見・分光された赤方偏移が $z \sim 6.10-6.70$ クエーサー 126 天体を用いた。静止系紫外の絶対等級で -24 等以上で、同赤方偏移帯の他サーベイで発見された天体よりも約 2 等以上暗い天体をターゲットとしている (図1)。BAL クエーサーは典型的には CIV 輝線の青い側に見られる吸収を使って分類されているため、我々の遠方クエーサーターゲットについても CIV 輝線の吸収を検出することを目標にして観測を提案した。本プロジェクトではピュアな BAL 割合を求めべく、ターゲットをランダムに選んだ。本研究課題は 2 セメスターにわたって観測提案を申請し、2023 年から 2024 年にかけて計 7 晩の観測が割り当てられた。ターゲットは非常に暗いのだが、もし吸収線があれば連続光に対して吸収線が 3σ で検出できるはずだという算段であった。

2.1 S23B の現地観測

自分にとって初めてのすばる現地観測は、同時に、コロナ禍以降初めてとなる現地観測でもあった。2 日間にわたる観測は幸運なことに seeing が 0.4-0.5 秒角とよい観測条件でデータを撮ることができた。最初のターゲットの光が入るまでは気が気ではなかったが (これ以降も 10 ラン程度観測を経験したが、毎度ターゲットのファーストライトを検出するまで非常に緊張した。一生慣れる



図2 観測の合間に撮影した集合写真。左からオペレータのアンドリュース、SAの青木さん、指導教官の松岡さん、筆者とそして同行してくれた共同研究者の登口さん。



図3 観測のログ係およびそのほかのサポート役として同行してくれた、愛媛大学大学院博士2年(当時修士2年)の齋藤有菜さん。

自信がない)、観測は特に装置トラブルもなく順調に進んだ。

観測中は同行していただいた指導教官の松岡さんや当時ポスドクの登口さん、SAでもあり共同研究者でBALが専門の青木さんと、撮ったスペクトルをみんなで眺めながらこの吸収線・輝線はリアルか、あだこうだ言い合っていた。もしかするとこの時間が観測中一番楽しかった時間かもしれない(図2)。

2.2 S24Aの現地観測

この観測でもクリアスカイに恵まれた(聞くと、10日ぶりに山頂が晴れたんだとか)。この時同行してくれた愛媛大学大学院生のパワーかもしれない(図3)。感謝をしている。この頃には、事前に即時解析コードを用意して観測に臨んだ。観測中は撮ったデータをすぐにlocalのパソコンに転送し、シグナルが検出できているかどうかを判断するため最低限の解析を行いながら観測を進めた。S23Bに引き続きこの観測提案はいわゆるクラシカル観測で、事前にどの天体をどれくらい観測するかスケジュールは組んではいたが、実際の観測データで即時解析の結果をみつつ、その時の気象状況、ターゲットの明るさや高度などの様々なパラメータを同時に考慮し、あとどれくら

いの時間観測をするかをその場で考えながら臨んでいた。

余談ながら、自分自身の観測を初めて行ったのは博士課程3年次で遅かったが、指導教官のクエーサー観測には修士の頃からログ係として参加させてもらっていた。その観測もクラシカル観測で、あらかじめ大量のターゲットを用意し、順に観測を進めつつ、クエーサーである確率、明るさ、高度やseeing、残りの観測時間などを考えながらその時に次に優先すべきターゲットを残り1時間、30分程度の積分中に決めていた。その時の自分はログを取りながら密かに次にどのターゲットが観測されるかを当てる遊びを一人で行っていた。途中から次に何を撮ったらいいと思う?と気まぐれに質問されるようになったのでゲームは強制終了となったが、振り返るとこの時間がその数年後の自分の観測で不覚にも活かすように思う。

観測終了後にはSAの方がドーム内ツアーを行ってくれた。自分が使わせてもらっているMOIRCSやそのほかの装置が具体的にどのように望遠鏡にインストールされるかや、MOIRCSのMOS(Multi-Object Spectroscopy)マスクが入っている場所(筆者らはMOSモードで観測に臨んだ)、マスクの出し入れにアームがどこから

でて、どのように動くかなど詳細な説明をしていただいた。観測系を実際にこの目で見てとても嬉しかったし、観測中のover-headがどのような動作によって起こるのか知れたのもよかった。そして、小学生の頃から理科の教科書などで見ていたすばる望遠鏡を目の当たりにした時はやはり感動した。特にドーム内で望遠鏡の組み立てが開始された年月にもこの世に誕生したので、同学年としても対面できたことを嬉しく思った。

2.3 観測後のハワイ滞在

S23Bでの観測を終えた後は1週間ほどそのままハワイに滞在させてもらった。S23Bの観測があったのは博士論文の提出締切までちょうど4ヵ月というところであった。観測所のスタッフの方々には、博士論文があるのにここにおいて大丈夫かと心配された。本当にその通りで、今思えば行っている場合ではなかったかもしれない。しかし、滞在中はセミナーの機会をいただいたり、観測所の方々と交流することができ、貴重な時間であったと思う。自分がハワイを訪れている最中、滞在中に次のS24Aの観測提案の締切があった。我々はS23Bのパイロット研究をより発展させるためS24Aでも提案を出すことに決定した。偶然同じタイミングにハワイを訪れていた共同研究者らとともに議論を重ね、提案書をさらにブラッシュアップして提出した。

滞在中、指導教官のお知り合いであった観測所スタッフの方に個人的にお世話になった。その先輩研究者の方と、プロポーザル締切直前の土曜にお互いもしプロポーザルをチーム内回覧に出せたら遊びに行こう、と観光地へ連れ出していただくことになった。せっかくの機会に高揚した私はプロポーザル作成により精を出した。加えて、学生が出した観測プログラムであれば現地観測ができると味を占めた私は、観測提案作成により気合を入れた。無事なんとか提案書をチームに回覧でき、いろいろな場所に連れて行ってもらい、この時にハワイ島について少し知ることができた



図4 Hiloのクラフトビールを作っている工場 (Hilo Brewing Company)。キャッシュオンでその場で飲める。ラガーが特に美味しかった。

(図4)。この約3ヵ月後に私は観測提案の採択通知を受け取ることになる。採択通知を受信後、すばるのwebsiteでaccepted program一覧をぼーっと眺めているとき、ふとこの日のことを思い出した。私はもう一度一覧の上からゆっくり採択プログラムを確認しなおし、遊びに連れ出してくれた先輩研究者の名前を見つけた瞬間、自分自身も嬉しく思ったのを覚えている。

3. 解析パイプラインの開発

MOIRCSで取得したデータの解析を始めたのは大学院卒業が約2ヵ月後に迫った時期であった。MOIRCSのデータ解析にはすでに公式的に配布されているソフトがある。しかしこのソフトは普段自分が使用しているパソコン (mac) では動作しない。研究室のサーバでは使えそうであったが、卒業間近に生データ解析のための作業環境を構築するのは現実的ではないと思い、観測データの解析コードを自作することに決めた。これには、自力でのリダクションを通して生データへの理解を深めたいという気持ちもあった。初めから侮っていたわけではないが、生データ解析の経験がなかった自分はこのコード開発に長い時間を要することになった (業務の隙間時間を縫って行っていた背景も大きい)。近赤外線観測ではスカ

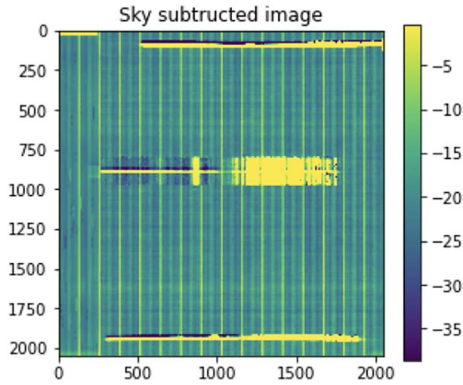


図5 電気ノイズありのフレーム。

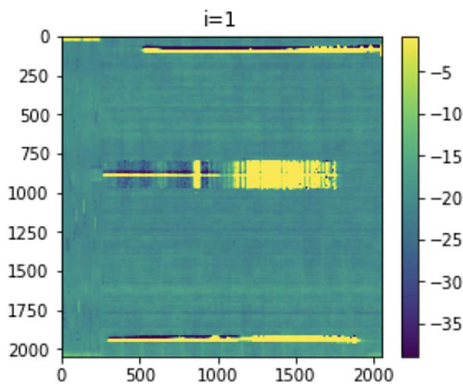


図6 電気ノイズを除去したフレーム。

イ背景光が明るく、特に我々のターゲットは非常に暗いため、解析は本当にノイズとの戦いだだった。開発したパイプラインでは主に、バッドピクセル処理、宇宙線の検出・除去（補間）、スカイ引きなどの共通処理や、スペクトルの1次元化、標準星スペクトルを用いたフラックス較正やOH輝線を用いた波長較正を行う。また、MOIRCSの検出器特有のマルチサンプリングを行った際に生じる電気ノイズ（図5）も差し引く処理を加えた（図6）。他にも、空間方向にシグナルが歪む問題もある。数ピクセル分の歪みが、スペクトルの抽出に大きな影響を与える。本パイプラインではこの空間方向の歪みも補正するコードを組み込

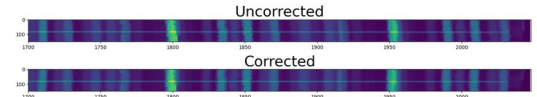


図7 空間歪み補正前後の比較。

んだ（図7）。この作業は各ピクセルがどれくらい歪むかを定量的に調べモデル化するのだが、これがなかなかの鬼門であった。作成したコードはGithubリポジトリ*¹に置いている。ぜひなるべく多くの人に触ってもらいながら、今後も向上させていきたい。

4. 解析結果と今後の展望

S23Bでの2晩とS24Aでの5晩のすばる観測を通して我々はのべ12天体の近赤外線分光データを取得した。1次元化スペクトルから吸収線の有無を調べ、遠方宇宙における低光度クエーサーのアウトフローの割合を求めた。現時点での結論としては、他サーベイで見つかった明るめな種族よりもアウトフロー出現割合は少なく、母銀河スケールへのエネルギー寄与は見込めないことが示唆される結果であった。今後の議論として同光度帯での遠方と近傍でのクエーサー吸収線の割合の比較や、そのほかの物理量と合わせ遠方・近傍で何か違いがあるかななどを深掘りしていきたい。本課題により得られた結果は出版論文として執筆中である。また、これからRubinやRoman, Euclidなどによる撮像大規模サーベイデータが続々と取得されることになる。すばる望遠鏡の多天体分光装置であるPFSなども組み合わせながら遠方クエーサーBALサイエンスをさらに発展させていきたい。

5. 最後に

世界標準は完全リモート観測に向かっている中で、大きなコストやリスクが伴うのにもかかわらず

*¹ https://github.com/AyumiTK9/drps_moircs

ず、学生PIに限り現地観測を復活させようと、実現に向けて動いてくれた大人たちがいた。筆者はその現地観測が復活した Semester で運よく採択され、ハワイに赴き天候などにも恵まれ実際に現地観測をすることができた。そして、その経験が今の研究活動にも大いに影響している。観測データの理解には想像以上にデータ取得時の映像記憶や実際に観測系をこの目で見た体験がよい影響を与えているように思う。現地観測実現にあたって、ハワイ観測所の宮崎所長をはじめ、SAC および観測所のスタッフの皆さま、観測オペレータ、現地観測を最終的に受け入れてくださった SA の方々、そのほかのご尽力いただいた皆さまに深い感謝を申し上げたい。

謝辞

この原稿を作るにあたっては、天文月報編集委員の方々や事務の方々大変お世話になった。ここでお礼を申しあげる。田中壺さんには MOIRCS 観測のサポートから、本記事執筆のお声をかけていただいた。さらには原稿作成にあたってご助言もくださり感謝を述べたい。修士・博士課程での指導教官であった松岡良樹さんには研究発足時に相談に乗っていただいたり、観測の基礎についてご教授いただいた。共同研究者の登口暁さんからはデータリダクションの心得を学んだ。パイプライン開発中も時折相談相手になってくださり、多岐に渡るサポートをいただいた。また、国立天文台の田中賢幸さんにはリダクションの1次元スペ

クトル抽出やフラックス校正について貴重なご意見をいただいた。信州大学の三澤透さんには観測提案書の構想段階から共に取り組んでいただいている。本研究はまだ始まりに過ぎないが、関わってくださった皆さまにこの場をお借りし多大なる感謝を申し上げたい。

参考文献

- [1] Kormendy, J. & Ho, L. C., 2013, *AR A&A*, 51, 511
- [2] Feruglio, C., et al., 2010, *A&A*, 518, L155
- [3] Wagner, A. Y., et al., 2013, *ApJL*, 763, L18
- [4] Decarli, R., et al., 2018, *ApJ*, 854, 97
- [5] Bischetti, M., et al., 2022, *Nature*, 605, 44B
- [6] Hopkins, P. F., & Elvis, M., 2010, *MNRAS*, 401, 7
- [7] Matsuoka, Y., et al., 2018, *ApJ*, 828, 26
- [8] Allen, J. T., et al., 2011, *MNRAS*, 410, 860

Search for Outflows in Distant Quasars Based on Near-Infrared Spectroscopic Observations and Development of a MOIRCS Data Reduction Pipeline

Ayumi TAKAHASHI

Kanagawa University, Yokohama Campus, 3-27-1 Rokkakubashi, Kanagawa-ku, Yokohama, Kanagawa 221-8686 Japan

Abstract: We conducted near-infrared spectroscopic observations of distant low-luminosity quasars using MOIRCS on the Subaru Telescope from August 2023 to June 2024. The aim of this study is to investigate the incidence of quasar outflows in the distant universe by searching for broad absorption lines that may appear on the blue side of the C IV emission line. Here, I would like to share some memories of my stay in Hawaii and briefly introduce the MOIRCS data reduction pipeline I developed.