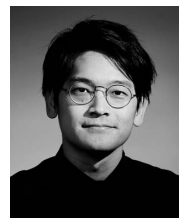


繋がる先に—電波と光赤外線を用いた 遠方銀河の観測的研究



藤本 征史

〈Department of Astronomy, The University of Texas at Austin, 2515 Speedway, Stop C1400 Austin, Texas 78712-1205, USA〉
e-mail: fujimoto@utexas.edu

ビッグバンから始まる宇宙進化において、天体形成と元素合成の現場である銀河の形成・進化の解明は現代天文学における最重要課題の一つである。これまですばる望遠鏡やハッブル宇宙望遠鏡などに基づく可視光観測により、銀河内部の恒星と熱い電離状態の星間物質の進化は赤方偏移6-10程度にある初期銀河まで調べられてきた。一方で、銀河における星形成の材料となる中性ガスや星形成の結果として放出されるダストなどの冷たい星間物質については、初期銀河において観測することが難しかったが、アルマ望遠鏡の観測により近年その様子が明らかになってきた。本稿では私がこれまで行ってきた、アルマやすばる、ハッブル望遠鏡などを組み合わせた遠方の銀河観測研究について、一筋縄ではなかったあゆみと共に紹介したい。

1. 電波と光赤外線の架け橋

2012年8月、野辺山。学部での観測実習で、すっかり私は観測天文学の虜になった。観測ターゲットは近傍の星形成領域。曇り空に覆われた、決して恵まれた天候ではなかったものの、観測は無事、分子雲中のアンモニア分子の回転遷移輝線を捉えた。当時、ろくにコーディングスキルも身につけていなかった私は、エクセルを駆使し無理やりすべての数値計算を完遂。曇り空からはとても想像できない、背後に潜む近傍宇宙の具体的な物理量（柱密度やガス温度など）の導出から、この特定の場所で星形成が引き起こされるであろうという未来への推論に、心が躍った。そのまま自然な流れで、卒業研究を東大天文センターの河野孝太郎先生の研究室でお世話になっていた私は、しかし、悩んでいた。河野研の大学院での受け入れ定員は一名で、とある優秀な同期の仲間もまた、河野研を希望していた。私は現実主義者であ

る。リスクの高い勝負は早々に諦め、他の研究室紹介の資料を眺めていると、ある挑発的な言葉が私の目を捉えた。一決して甘くない環境ですが、やる気のある学生を歓迎します— 柏キャンパス、宇宙線研究所大内研。志望段階から学生を試そうとするその行間に背筋が伸びつつ、宇宙初期を目指すその研究室のテーマは、思えば、宇宙の始まりに興味を持って天文学徒を志した私にぴったりであった。紆余曲折を経ながらも、意を決して進んだ新天地では、大内正己先生や先輩方が取得する、すばるやKeck望遠鏡の実地観測時間でハワイにお供させていただける機会に恵まれた。スリットマスクや、それに対応してリアルタイムに描き出される2次元スペクトルの、視覚的により直感的に伝わってくる光学過程は、電波のそれとはまた違った角度で私の心に深く差し込み、隣で目視で検出を見出す先人の方の姿は、この上なく偉大に感じられた。

今では銀河形成・進化を進める人なら当然考え

る多波長観測の重要性，特に光赤外線で捉える恒星や熱い電離状態の星間物質からの光，そして星形成の材料となる中性ガスやダストなどの冷たい星間物質から放射される電波の光を組み合わせたといった高尚な考えは当時私にはなかった。しかし以上のような幸運と、強いて言うならば新たな環境を恐れなかったいくばくかのチャレンジ精神が作用し、電波天文学を得意とする河野研での学部時代、そして光赤外線天文学を得意とする大内研での大学院時代によって、その後主軸とする電波と光赤外線を組み合わせた研究スタイルの土台は整っていたのだった。

2. 泥臭く、粘り強く

とはいえである。無事大学院への進学が済んだ私は、焦っていた。学部の卒業研究でお世話になった研究室にそのまま院進した同期は、同じテーマでどんどん研究を深め、ジャーナル論文への投稿などを進める一方で、私はテーマ選びからのリスタートである。幸い、研究室では大内先生や百瀬莉恵子さんがPIとして取得した、世界的にも当時もっとも深い、遠方銀河を狙ったアルマ望遠鏡のミリ波観測データが揃っていた。面白いことに、アルマのデータには、比較的狭い視野ではあるがその抜群の感度により、高頻度で別のミリ波天体が映り込む。そうした偶発的な天体を利用することで、暗いミリ波天体の個数密度統計に精度よく制限をつけた結果が甘日出文洋さんや小野宜昭さんから報告され出していた。これを研究室が保有する最深データや公開のアーカイブデータも隈なく調べてかき集めて、更には重力レンズ効果も用いて限界まで攻めたらどうなるだろう？ 大内先生と相談を重ね、最初の研究テーマが決まった。アルマの解析は、天文台の滞在研究員制度を利用し、永井洋さんのところで修行させていただきつつ、重力レンズ解析では研究室の石垣真史さんの協力により進めることが可能となった。朝起きてまずは新たに公開されたアーカイブ

を逐一チェックし、RAW データから整約した画像を作成、新たな検出天体を探しながら、横では天体検出のシミュレーションを走らせ、検出プロセスにおけるバイアス補正項を評価する泥臭い日々が続いた。大変ではあったがその苦勞の甲斐もあってか、当時アルマを用いて調べられていたよりも更に1桁ほど暗いミリ波放射天体を捉え、宇宙赤外背景放射（CIB）は宇宙に淡く広がるソースではなく、星形成に伴う銀河からのダストの赤外線再放射で説明できることを示した。またこの研究では、ハッブル宇宙望遠鏡などの可視光・近赤外線データとの比較を行い、後に“NIR Dark Galaxy”（Wang et al., 2019, Nature 572, 211 など）と呼ばれる可視光の深撮像でも検出できないミリ波ソースがあることも他研究に先駆けて報告し、論文は修士2年次の2016年にApJS誌において出版された [1]。

一方、その後月日とともに、より多くのアルマのデータが集まりだし、データの特性理解が業界的にも進むようになったうえで当時は振り返ると、検出限界ギリギリを攻めていたことや、異なる結果を示唆する論文も欧米の大きなグループなどから追って出てきたことから [2]、内心不安も残っていた。時節が整えばまたこの研究を誰よりも深く潜ってやりきりたい。そう強く思い、まさに舞台が整い出したのが、2022年2月号でも詳細を書かせていただいた、河野先生率いる33個の大質量銀河団を狙った、約100時間かけて行われるアルマの大型プログラム ALMA Lensing Cluster Survey (ALCS) の採択である。私は提案時から密に河野先生とやり取りを重ね、サーベイデザインをリード。提案の要のひとつは、銀河団が引き起こす重力レンズ効果を利用し、通常では検出されない暗い遠方のミリ波天体を一挙に大量に発見することで、暗いミリ波天体の個数密度統計に決着をつけることであった。期待通り、我々のサーベイはこれまで行われてきたアルマの大型プログラムの中でも最も効果的に暗いミリ波天体検

出に成功し（図1;例えば、特定領域を深掘りするデザインのためのアルマ大型プログラム ASPECS[2]

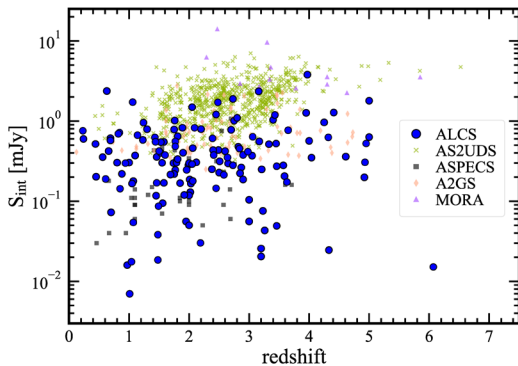


図1 ALCSが捉えた遠方の暗いミリ波天体の、重力レンズ効果を補正したintrinsic 1.2-mm flux (S_{int}) と赤方偏移分布 [3]. 他の大規模なアルマサーベイ (AS2UDS [4], ASPECS [2], A2GS [5], MORA [6]) と比べても、最も深く遠方を切り拓いたサーベイを実現している。

と比べて、さらに暗い天体を数多く含む約5倍の数の天体が検出された), 暗いミリ波天体の個数密度は2016年時に報告していたものと一致する結果となった (図2). 2022年に招待いただいたボロニャ大学でのセミナー発表では、異なる結果を示唆していた欧米チームのキーパーソンでもある R. Decarli さんから “You convinced me!” と言っただけ、粘り強くやり続ける重要性が胸に深く刻まれた。

2016年に戻る. 新たにアルマで暗いミリ波天体を多数検出した私は、次なる戦略として、それらを狙ったアルマの追観測提案を毎年出し続けた。しかしそうした努力も虚しく、鳴かず飛ばずの日々が続いた。ほかにも色々アイデアを広げながら、数えてみると大学院の間にアルマへPIとして提出した観測提案書は計10本、そのう

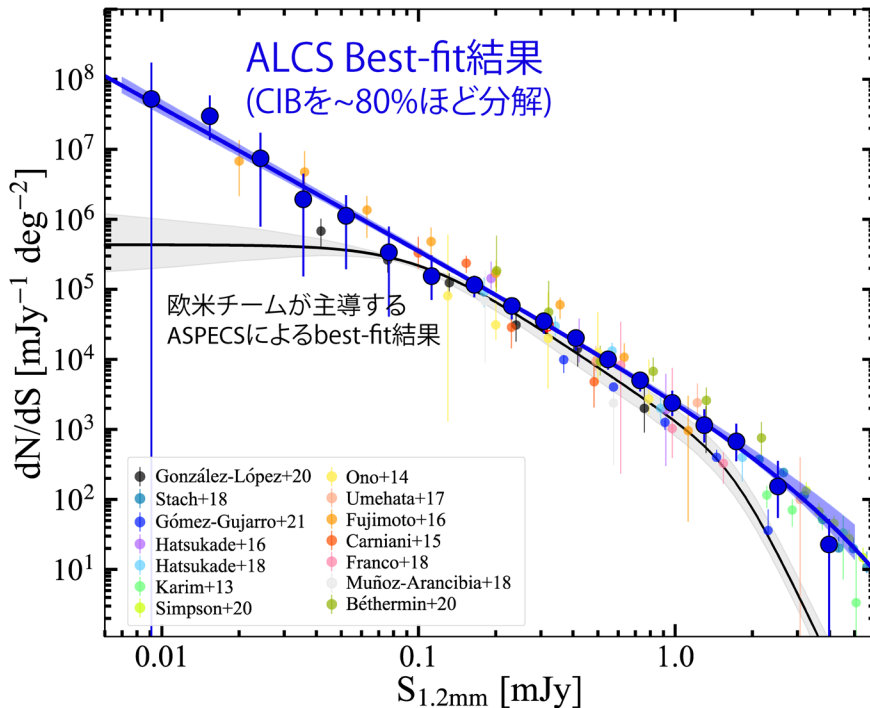


図2 ALCSの強力なデータセットを用いて約8年越しに精査したミリ波天体の個数密度統計 [3]. 図1に示されるように、アルマ100時間と重力レンズの効果的な組み合わせにより、最深のパラメータスペースを最も広く調べたことで、暗い側の密度統計をこれまでにない精度で求めた。ASPECSチームが提言していた暗い側での平坦化 [2] は少なくとも0.01 mJyまでは起こっておらず、CIBは約80%まで分解された。

ち採択されたのはフィラーとして1本のみ、そのプログラムも観測は実行されずに終わった。倍率約5倍、まだ経験も浅い学生であった状況を考えると、当然と言えば当然ではあるが、やはり毎年数名はPIで採択を勝ち取る優秀な同期・後輩・先輩の輝かしい姿を見聞きするもので、対照的に、晴れない気持ちを抱える自分もあった。ともあれ気持ちを切り替えながら、それでも何か新しいことはできないかと、自然と2本目の論文では再びアルマのアーカイブデータを大量に解析することに邁進し、1000個を超えるミリ波天体カタログを作成し、それまでよく調べられていなかったミリ波天体のミリ波サイズや形態を統計的に調べあげた。続く3本目の論文ではその延長として、アルマのような干渉計データにおける素の観測量であるビジビリティ上で重ね合わせるスタッキング解析を適用して、暗いミリ波天体のミリ波サイズや形態にも迫った。これらの取り組みから、遠方のミリ波放射は光赤外線同様、その光度とサイズに正の相関を持つことがわかった。また円盤ディスク状の星分布の内側で、ミリ波放射は更にコンパクトな円盤状の分布を形成しており、一方でそこで起こる星形成だけでは近傍の楕円銀河に進化するには不十分で、途中の力学的作用の重要性が示唆された [7, 8]。何かを得るといことは何か別の機会を失うということでもある。今になって思うと、自身の観測提案が全然通らなかったからこそ、使える道具や新しい武器を揃えながらどう戦い抜くかを考え続ける癖がつき、自身の研究テーマを広げていくきっかけになった。また1本目の論文のテーマに続き、非均一な大量データの解析や、得られた計量の確からしさを調べるためにシミュレーションを組んだり、ある種、泥臭く忍耐力が試される内容をやり続けたため、研究者としての足腰を鍛えながら少しずつ裾野を広げていった。この期間は今振り返っても、とても有益であったように思う。

3. 見逃した?[CII] ハロー発見へ

そうこうしていると、業界としてアルマで赤方偏移 $z > 6$ のような遠方銀河からの遠赤外輝線、その中でも特に明るい静止系 $158 \mu\text{m}$ で光る炭素の一階電離輝線 [CII] を捉える結果が報告され出した [9, 10]。期を同じくし、 $z = 6.6$ に見つかっていた巨大な Ly α 輝線天体 Himiko [11] の [CII] 輝線を狙った、大内先生をPIとする深いアルマの追観測データが Cycle 0 に続き [12]、Cycle 2 でも取られた。アルマの解析経験を培っていた私はその新旧データ合わせた解析を一任され、調べたところ、 4σ ほどの [CII] のシグナルが見受けられた。一方で、スペクトル内に同じレベルの負のシグナルもすぐ近くに見られたことなどから、ノイズの可能性を捨てきれず、高い信頼度の検出は見られなかったと2016年9月の日本天文学会年会で発表を行った。そうして検出として少し結論をつけづらい Himiko の研究は一旦保留し、新しく取られたデータもアーカイブで公開されるようになったことも忘れだしていた翌年のある日、Himiko から [CII] 輝線を 5σ 以上で検出したと報告する、欧米グループからの論文が現れた [13]。即座にデータの再解析を行ったところ、確かに論文で書かれている設定で輝線強度を調べると少なくとも 5σ ほどになることが、自身の手元のデータでも確認がとれた。検出・非検出を議論するうえで、一つのボーダーとして 5σ はやはり大きい。私が最初からもう一歩踏み込んでデータを隈なく調べられていれば、これを見逃すことなく、PI チームとしてこの検出結果を先に報告できていたのではないかと。大内先生や研究室のこれまでのがんばりに泥を塗ったのではないかと。そのような自責の念が駆け巡り、研究者として今後続けていくべきかすら悩む、とても辛い日々が続いた。

ただ肝心なのはやはり、なぜ見逃したのかという点である。具体的にはその欧米グループの解析では、私が元々採用していたよりも広めのアパー

チャーを用いて [CII] 輝線スペクトルを解析していた。つまり炭素ガス雲の空間構造が想定していたよりも広がっていることを示唆していた。図3aはそのような経緯で、当時残していた実際の再解析ノートの一部である。アパーチャー半径ごとの [CII] 輝線強度の成長曲線を描いてみたところ、確かに少なくとも半径6 kpcほどまで広がっていきそうなのがあった。また面白いことに、その構造は、欧米グループの論文で採用していたもの（半径~3 kpcほど）よりも更に広がっており、まだまだ見逃されている広がった炭素ガス雲構造が存在している可能性が浮上した。こうした状況を大内先生に共有し、やはりPIチームとしてカウンター論文なるものを用意すべきか相談していたところ、以下の提言をいただいた。「Himikoのことは気にするな。これがほかの銀河でも起こっているのかどうか調べたら面白いのではないか」。進むべき道が定まった。それまで大量

のアルマアーカイブデータの解析、ビジビリティ上でのスタッキングも加えたサイズや形態の解析を進めていたので、そこからは早かった。遠方銀河の [CII] 輝線を狙って公開されているアーカイブデータを隈なく調べ集め、文献で報告されている天体に加え、新たな検出も見出しながら再解析。自作したコードで輝線のビジビリティのスタッキングを完遂した。結果、 $z=5-7$ の18個の遠方銀河から、有効積分時間として25時間ほどの深いデータが得られ、世界最高感度の [CII] 輝線マップを実現した (cf., 一天体あたりの積分時間は当時深いものでも約数時間ほど)。この [CII] 輝線のマップと、同じくスタッキング解析で得られたダスト連続光やハッブルによって取得された星の放射領域のマップを用いて、セルシク則に基づいて構造の比較をおこなったところ、[CII] 輝線は半径約10 kpcと、ダストや星に比べて約5倍も広がった構造を示したのである。

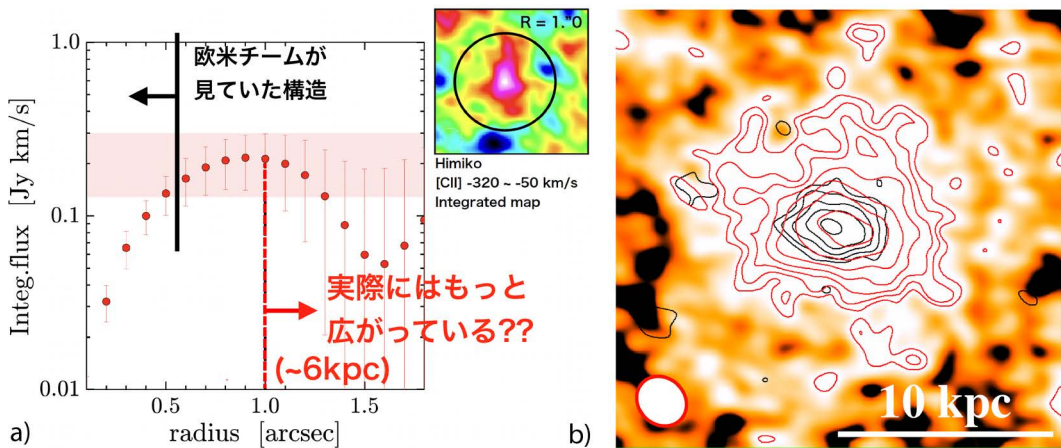


図3 a) 欧米チームの検出論文が出た直後に、Himikoのアルマデータを再解析をしていた当時の解析ノートの一部。アパーチャー半径毎の [CII] 輝線の integrated flux の成長曲線を示す。欧米チームが見ていた構造（半径約0.5 arcsec）よりもはるかに広がった構造の存在可能性が浮上した。右上のパネルは最適速度幅で積分した時の [CII] 輝線の二次元分布（フルカラー表示はオンライン版をご覧ください）。b) アーカイブデータを隈なく調べ、[CII] 輝線検出が確認された18個の $z=5-7$ にある遠方銀河のアルマデータを再解析し、ビジビリティ上で重ね合わせ処理をして得た、世界最高感度を実現した平均的な [CII] 輝線の二次元分布 [14]（青（オンライン版では赤）コントア）。黒のコントアは同時に得られたダスト連続光の分布を示す。ハッブルの画像も同様に処理して得られた若い星の分布に比べて、[CII] 輝線は約5倍の広がりを持っており、銀河スケールを超えた重元素汚染の様子から、初期銀河における強いアウトフローの存在を示唆する。

そのような構造は当時誰も想定していなかったものなので、何か見落としがないか慎重になった。面識のあったドイツのR. Ivisonさんに観測・解析的な視点のサポートとしてチームに入ってもらい、また理論的な観点でも叩いてもらおうと、大学の学生交流支援基金に応募、なんとか補欠合格を勝ち取り、3ヵ月間ほどイタリアの理論家であるA. Ferraraさんのもとを訪ね、議論を重ねた。その後、大阪大学の長峯健太郎さんのグループにも入っていただき、それぞれのグループの理論モデルから疑似観測画像を生成して比較を行ったが、観測で得られたほどの広がりほどのモデルでも定量的に再現されなかった。初期銀河の銀河周辺物質の検出に初めて成功したうえ、このような初期の銀河周辺に広がる炭素の存在から、早い時代にあった強いアウトフローの存在を世界に先駆けて示す結果となった [14]。その後、当時観測を開始し始めていたALPINE計画 (PID: 2017.1.00428.L) への参入や、サマープログラムの学部生徒と進めた強い重力レンズ効果を受けた遠方銀河研究を経て、個別の銀河周りでも、同様に広がった炭素ガス雲構造を発見するに至った [15, 16]。

方針が定まってからは、かくも猪突猛進に進められたが、やはり今になっても自分の至らなさを検出を見逃し、海外のチームに先を越されたと自責の念に苛まれた日々を思い出すと血の気が引く。ただよく言われるとおり、失敗、特になぜその失敗に至ったか向き合う中にこそ、実りあるレッスンが含まれていた。また、すばるを用いたHimikoの発見から [11]、高い倍率を勝ち抜きPIとしてアルマの追観測データを取得した大内先生こそ、検出を見逃した一連の流れには色々な思いがあったに違いないと容易に想像される。そこをグッと飲み込み、一天体にこだわるよりもその結果が示唆する方向をより統計的に調べるともっと面白いのではないかと提言くださった、大内先生の慧眼、そして人間力には感謝が尽きない。

4. 新天地、気付けば輪の中に

そうした炭素ガス雲構造の研究を進めながら2019年3月には無事博士号を取得し、宇宙線研究所、早稲田大学でそれぞれ数ヵ月のポスドク研究員を経ながら、12月にはデンマーク・コペンハーゲンに在するCosmic DAWN CenterにDAWN Fellowとして着任した。Prize Fellowとして採用されたものの、当時、街にも研究所にも元々の知り合いは皆無の環境、また日照時間が著しく短い北欧特有の冬の気候に精神衛生面がネガティブに向かう気配を察した私は、突発のランチセミナーを企画し同僚に来てもらうようお願いして回った。趣旨はまずは己を知ってもらうこと。私自身のこれまで、現在、そして今後のプロジェクトやアイディアの共有をかなりカジュアルなフォーマットで、2日間にわたって行った。こんなことが一緒にできそうだねと活発に意見いただけ、実際にDAWNの学生さんが上述のALCS計画に参入して、とあるプロジェクトを学位論文の一つのテーマとして進めることがほどなく決定した [17]。

いったん自分を知ってさえもらえれば、面白い化学反応は自然と起こるものだ。ある日、同僚のG. Brammerさんが私のデスクに立ち寄った。「Seiji, こんな面白い天体見つけたんだけど電波の追観測とか興味ない?」どうやらハッブルのアーカイブデータの解析を進めている中で偶然、珍しい赤色QSOのような点源天体を、その種族としては知られている中でも最遠方にあたる $z \sim 7$ の時代に見つけたらしい。誘いに乗り、数週間後には早速5つの観測提案書を書き上げ、Director's Discretionary Time (DDT)として世界中の望遠鏡に提出していた。幸いNOEMA観測所から採択連絡を受け、行われた観測では最終的に明るい[CII]輝線から赤方偏移が $z=7.19$ に同定された。また同時に進めていたX線・可視・赤外線・サブミリ/ミリ波・電波の多波長データ解析から、やはり超大質量ブラックホールの形成初期

段階にある赤色QSOらしいことがわかった。途中から自然とプロジェクトをリードしていた私は、遠方QSO研究の観測・理論の専門家であるドイツのF. WalterさんやイタリアのR. Schneiderさんらをそれぞれ巻き込みながら、まとめ上げた論文を投稿、宇宙初期の超大質量ブラックホール起源解明のミッシングリンクの発見として(図4)、その後Nature本誌において出版された [18]。当初エディターの反応は辛く、かなり苦戦したプロセスではあったが、その度にチームの方々と協議を重ね、乗り越えた末の結果であった。出版受理された旨を伝えたチームメンバーへの連絡は、23時を優に超えていたが、即座にみなから温かいメッセージが飛び交った。Natureへの掲載そ

れ自体よりも、素晴らしいチームの面々と喜怒哀楽を共有しながら共に駆け抜けた、爽快感に包まれた青春の日々がとても心地よかった。

余談ではあるが、実はこの天体の発見のもう一つの面白さは、従来、少なくとも数百平方度以上の探索領域を掃いて初めて見つかる $z=7.19$ といった最遠方級QSOが、ハッブルのような、アーカイブデータをすべて合わせても数平方度以下になる、サーベイエリアがかなり限られた望遠鏡データの中から偶発的に見つかったことである。これは遠方QSOの個数密度がこれまで知られているよりも、もっと高い可能性を示唆する。同様の可能性については、分光的な確認は得られていなかったが似たような遠方点源候補天体

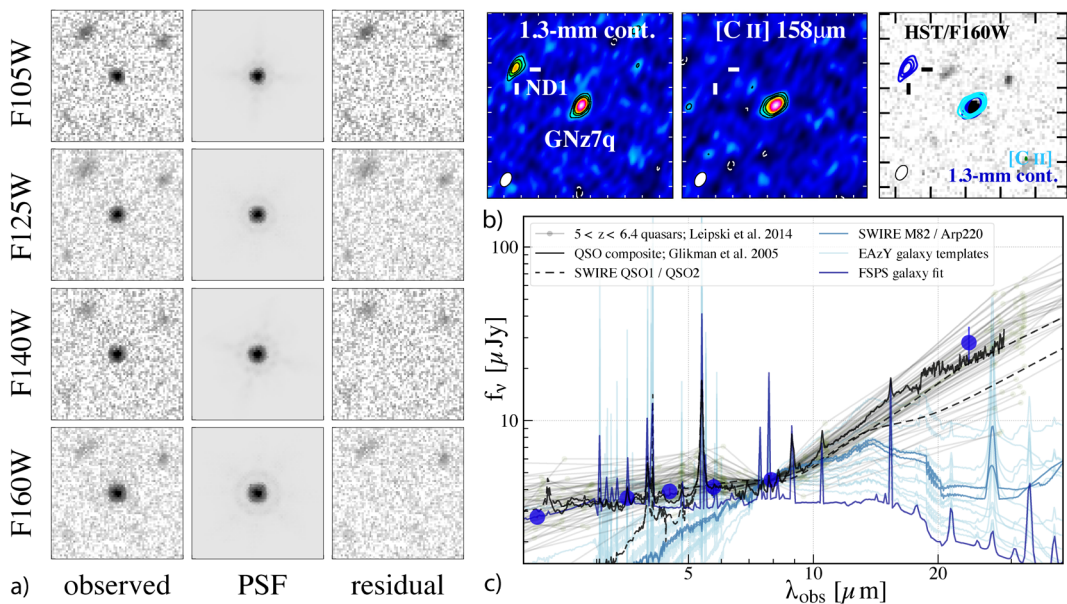


図4 ハッブルのアーカイブデータから見つけ、 $z=7.19$ に分光同定された、超大質量ブラックホールの形成初期段階と考えられる赤色QSO, GNz7q [18]。a) ハッブルのいずれのフィルターにおいても、点源で観測されている様子。b) NOEMA DDT観測が捉えた明るい[CII]輝線(中央),並びにダスト放射(左)。画像はいずれも 4×4 秒角。その他、多波長のデータも合わせ、ホスト銀河の星形成率は約 $1,600 M_\odot/\text{yr}$ で、この時代に見つかった天体の中で最も活発に星形成活動を起していることがわかった。右パネルはハッブルで得られた画像を示し、[CII]輝線(シアン)とダスト放射(青)のコントアを重ねている。近くにハッブルやスピッツァーの近赤外画像にも対応天体を持たないダストに覆い隠された、おそらく同じ赤方偏移の銀河(ND1)も見つかった。c) GNz7qの近・中間赤外域のスペクトルエネルギー分布(SED)。横軸は観測波長、 $24 \mu\text{m}$ の明るさはいずれの星形成銀河由来のSED(青線)で説明できない一方で、QSO由来のSED(黒・灰色線)とよく一致し、点源的な性質と合わせ、GNz7qがQSOであることを強く支持している。

をハッブルのアーカイブ撮像データからほかにもいくつか発見していた森下貴弘さんが、その前年に出された論文でも指摘していたのであった [19]. 我々としてもこうした状況が今後のサーベイで明らかになることを期待し、論文の最後のパラグラフではその可能性についての議論を深掘りした。そして2022年、JWSTの稼働でどうなったか。尾上匡房さんや播金優一さん含む、世界中の研究者が即座に、従来予想されていたよりも数多くの暗い遠方QSOを発見し [20–24], 特に“Little Red Dots”と呼ばれる、我々の天体と似た赤い点源天体の数多くが、実際に $z=4-9$ に至る遠方QSOであることが分光的にも確かめられることとなった [25–27]. 善良な読者の皆様におかれましては、今後JWSTで新たに数多く見つかった遠方のQSO研究を参照される際には、JWST稼働以前からあった森下さんや我々の結果・議論も合わせて追っていただけると幸いである。

5. 面白いことは無限にある

デンマークに移ったこの頃からである。大学院時代は鳴かず飛ばずであった観測提案が、採択されるようになりだした。アルマに留まらずほかにもNOEMA・SMA・JVLA・すばる・Keck・VLT・JWST・Gemini・ハッブルといった世界中の望遠鏡に幅広いテーマで観測提案書をPIとして出すようになり、数えてみると、2020, 2021, 2022年の3年間でそれぞれ10/22本 (45%), 16/26本 (62%), 8/13本 (62%) の観測提案が採択された。特に2022年に至ってはアルマのDDT提案が3本採択され、JWSTが新たに捉えだした超遠方銀河候補から 5σ の遠赤外輝線を検出し $z=4.61$ の[CII]158 μm , もしくは $z=16.01$ の[OIII]52 μm にまで絞り込むことや [28], $z=8.5$ で高い電子密度、電離光子脱出の様子を捉えるなど [29], タイムリーなアルマ追観測結果に繋がった。大学院生の頃あれだけ苦勞していた観測提案書、思えば当時は、内容よりも、早く自身オリジナルのプロ

ジェクトをPIとしてリードしていきたいという気持ちばかり先行していた。大内先生に相談したこともあるが、アイデアは捻り出すものでなくて降ってくるものと言われ、当時はよくわからなかった。しかし今はよくわかる。研究者の数だけ面白い研究は存在し、まだ手付かずのアイデアは無限にあるのである。研究本来の醍醐味である知的好奇心のままに、周りの方々が進めている面白い研究をどんどん学ばせていただいて興味・視野を広げていると、ふと、なんでこれをまだ誰もやっていないのだろうというのが目の前に現れる瞬間がある。ただよく言われるようなことであるが、そのアイデア自体は同じことを考えてる人がその瞬間世界にはたくさんいて、その後、実際に行動に移して、やり切れるかが大事だったりする。ここ数年、提案書が急に採択されるようになったきっかけとして、本来面白いことは無限にあるのだと、一つのことにしがみつすぎず、好奇心に従って興味を広げ、一心不乱に手を動かし続けたことがあったように思う。また、発芽したアイデア自体は脆いことが多々あるが、思いついた端から積極的に周りの方々と壁打ちしながら研磨していくことが可能であった、所属機関の風通しの良さであったり、同僚たちのフレンドリーな人柄に多く助けていただけたからこそでもある。

そうして周りの人も巻き込みながら、研究を自然と楽しむようになっていっていると、他にも正の作用があることがわかった。ある日、普段とは違う様子のメールが届いていた。“*One of the highest priorities is to build a team including the best early career researchers who will not only do great science, but also enjoy working together.*” JWST Cycle1 Treasury ProgramであるUNCOVER計画 (PID: 2561) への、PIs (I. Labbe & R. Bezanson) からの直接のお誘いであった。メール文の最後の一節、一緒に働いて楽しい人というのが、研究遂行能力と並んで大事な観点であることを初めて知った。またそれを満たす人物として認識されて

いることがとても嬉しかった。二つ返事でチームに参入し、それまで同様、チームの方々に色々アイデアを叩いてもらう中で、UNCOVERで観測する重力レンズ領域の深いミリ波データを揃える約40時間のアルマプログラムや (PID: 2022.1.00073.S), この夏には2つの論文をチームからリードさせていただいた。その結果, $z=8.5\text{--}13.1$ の重力レンズ効果を受けた遠方銀河の紫外線光度関数への分光的制限とそこでのAGNの寄与の議論 [30], またアルマで検出された暗いミリ波天体65個に対する, JWST/NIRCam+NIRSpecによる系統的な特性評価を世界に先駆

けて行った [31] (図5)。2022年10月からはアメリカのUT Austinに異動したが, 同様に周りとの交流を進める中で, UT AustinのS. Finkelsteinさんが率いるJWST Early Release Science ProgramであるCEERS計画 (PID: 1345) にも参入させていただくことになり, 2023年のはじめには, チームとして最初のNIRSpec論文のリードをらせていただいた [32]。性善説すぎるかもしれないが, やはり研究者はみな面白いことがしたいのだと思う。そして研究者以前に, みな一人の人間である。まずは周りの人と一緒に, 最大限目の前のサイエンスを, そして日常を楽しもうとしていれ

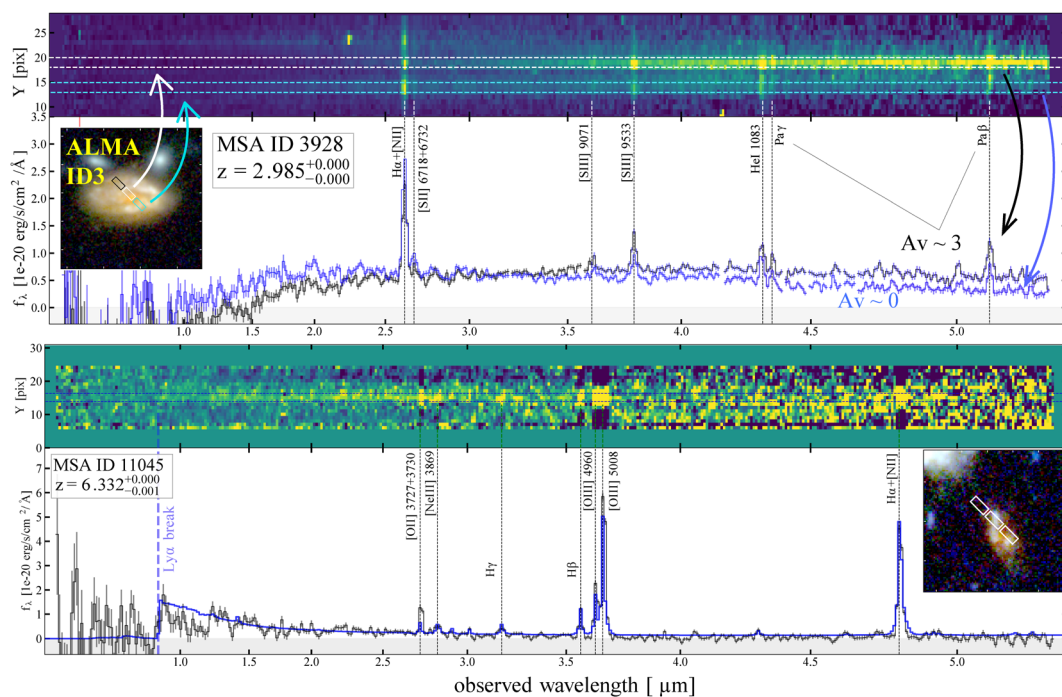


図5 著者がPIのアルマのプログラムで, ダスト放射 (上段) と [CII] 輝線 (下段) が検出された銀河に対して, UNCOVERサーベイで行ったJWST/NIRSpecの分光結果 [31]。いずれも共通の観測波長に対してNIRSpec Multi-shutter Array (MSA) から得られた2次元と1次元のスペクトルを示している。上段) アルマでダスト放射が検出された $z=2.985$ に分光同定された天体。パネル (5×5秒角) 内の矩形はMSAのシャッター位置を示しており, 白とシアンシャッター位置から得られたスペクトルがそれぞれ黒と青線の1次元スペクトルに対応。Pa β /Pa γ から, 銀河中心では, 銀河外縁部に比べて顕著なダスト減光が起こっていることがわかった。下段) アルマで[CII]輝線が偶発的に捉えられ, $z=6.332$ に分光同定された天体。黒線がMSAから得られた1次元スペクトル, 青線がフィッティングで得られたSEDモデルを示す。潤沢な可視輝線の検出から, H α にもとづく星形成率や, ダスト減光, また金属量の推定に至るまで, 典型的な[CII]輝線天体の性質が非バイアスなアプローチで初めて調べられた。

ば、自ずと道はひらいていくものなのかもしれない。図6に、最近の日常や研究の様子をいくつか紹介しながら、本稿の締めくくりとしたい。

6. ま と め

本稿では、私がこれまで行ってきた遠方の銀河観測研究について、研究内容や、その前後の背景などを紹介させていただいた。ご覧のように、決して初めから周到に計画された道のりではなく、よく言えば臨機応変に、悪く言えば行き当たりばったりの道のりだったといえる。ただ行き当たりばったりも、後に“connecting dots”が可能で、自分にしか描けない唯一無二の軌跡となりうる。私もまだまだ

駆け出しの若手の身ではあるが、色々と不安を抱えている更に若い読者の方がいらっしゃれば、あまり先のことは考えすぎず、目の前のことをまずは全力で楽しんでいれば、そこでの幾多の経験が、強みになる日が来ると保証したい。

謝 辞

この度は2022年度日本天文学会研究奨励賞を頂き、大変光栄です。本文内でも触れさせていたしましたが、大内正己先生にはいつもの確かなアドバイスをいただいて参りました。先生は、研究室のどの学生よりも無邪気な童心に満ちていながらも、強靱なストイックさと無限の探究心で、



図6 左上) DAWNの同僚達と。カールスバーグ財団が提供する研究者用アパートに入居でき、同じアパートに住む彼らとは公私交えて特に仲良くさせていただいた。手前に写るのがG. Brammerさん。右上) UT Austinの同僚達と。若いファカルティメンバーが多く、またシニアな教授陣もイベント毎に皆をホームパーティーに招いてくださるので、研究でもそれ以外でも活気に溢れた素晴らしい研究所である。左下) 2023年4月にピッツバーグで行われたUNCOVERのチーム会議。陽気なPIのI. LabbeさんやメンバーのH. Atekさんが盛り上げる笑いの絶えない場であったが、写真はシリアスに撮ろうという風潮。下中央) J. Silvermanさんが2023年6月のポストンの研究会で企画してくれた野球観戦。異国の地で、仲良い日本の方々とお過ごすのもまた楽しい。右下) クリスマスにCEERSのNIRSpecデータが届き、年始からコアメンバーで集まりデータ解析・論文執筆に没頭した。こちらも青春のような一幕で、大変だったけれど楽しい思い出である。

日々、全力で研究に臨まれていました。私はそのお姿から、研究者とはなんたるか、を芯から教えていただいたように思います。また、学部、大学院、そして今日も続いている海外での研究生活においても、多くの方々のお支えを頂戴しながら過ごすことができている。特に河野孝太郎先生、井上昭雄先生、J. Silvermanさん、G. Brammerさん、D. Watsonさん、S. Toftさん、F. Valentinoさん、F. Rizzoさん、S. Finkelsteinさん、C. Caseyさん、J. Chisholmさんらには普段から広くお世話になっており、そして正規の所属や短期滞在などで交流の深かった東大天文学教室の先生・同期・先輩・後輩の皆様、河野研の皆様、大内研の皆様、井上研の皆様、Cosmic DAWN Centerの皆様、UT Austinの皆様、A. Ferraraさんとそのグループの皆様、R. Maiolinoさんとそのグループの皆様、またアルマやJWSTの大型計画で一緒にやらせていただいているALCS, ALPINE, UNCOVER, CEERS, NGDEEP, COSMOS-Web, GLIMPSE, FRESCO チームの皆様、それ以外でも普段から議論をたたかわせてくださる皆様に、心より感謝申し上げます。最後になりますが、この原稿を作成するにあたっては、小野寺仁人さん、津村耕司さん、鈴木大介さんをはじめとする天文月報編集委員の方々や友人の今井順子さんに大変お世話になりました。御礼申し上げます。

参考文献

- [1] Fujimoto, S., et al., 2016, ApJS, 222, 1
- [2] González-López, J., et al., 2020, ApJ, 897, 91
- [3] Fujimoto, S., et al., 2023a, ApJS submitted (arXiv:2303.01658)
- [4] Dudzevičiūtė, U., et al., 2020, MNRAS, 494, 3828
- [5] Gómez-Guijarro, C., et al., 2022, A&A, 658, A43
- [6] Casey, C. M., et al., 2021, ApJ, 923, 215
- [7] Fujimoto, S., et al., 2017, ApJ, 850, 1
- [8] Fujimoto, S., et al., 2018, ApJ, 861, 7
- [9] Capak, P. L., et al., 2015, Nature, 522, 455
- [10] Pentericci, L., et al., 2016, ApJ, 829, L11
- [11] Ouchi, M., et al., 2009, ApJ, 696, 1164
- [12] Ouchi, M., et al., 2013, ApJ, 778, 102
- [13] Carniani, S., et al., 2018, ApJ, 854, L7

- [14] Fujimoto, S., et al., 2019, ApJ, 887, 107
- [15] Fujimoto, S., et al., 2020, ApJ, 900, 1
- [16] Akins, H. B., et al., 2022, ApJ, 934, 64
- [17] Kokorev, V. I., et al., 2021, ApJ, 921, 40
- [18] Fujimoto, S., et al., 2022, Nature, 604, 261
- [19] Morishita, T., et al., 2020, ApJ, 904, 50
- [20] Onoue, M., et al., 2023, ApJ, 942, L17
- [21] Harikane, Y., et al., 2023, ApJ in press (arXiv:2303.11946)
- [22] Kocevski, D. D., et al., 2023, ApJ, 954, L4
- [23] Labbe, I., et al., 2023, submitted to ApJ (arXiv:2306.07320)
- [24] Maiolino, R., et al., 2023, submitted to A&A (arXiv:2308.01230)
- [25] Matthee, J., et al., 2023, submitted to ApJ (arXiv:2306.05448)
- [26] Greene, J. E., et al., 2023, submitted to ApJ (arXiv:2309.05714)
- [27] Kokorev, V., et al., 2023, ApJ in press (arXiv:2308.11610)
- [28] Fujimoto, S., et al., 2023a, ApJ, 955, 130
- [29] Fujimoto, S., et al., 2022, arXiv e-prints, arXiv:2212.06863
- [30] Fujimoto, S., et al., 2023b, submitted to ApJ (arXiv:2308.11609)
- [31] Fujimoto, S., et al., 2023b, submitted to ApJS (arXiv:2309.07834)
- [32] Fujimoto, S., et al., 2023c, ApJ, 949, L25

Beyond Connecting Dots—Linking Visible and Obscured Sides of Distant Galaxies

Seiji FUJIMOTO

Department of Astronomy, The University of Texas at Austin, Austin, TX, USA

Abstract: The formation and evolution of galaxies, which are the sites of star formation and elemental synthesis according to the cosmic history since the Big Bang, is one of the key questions in modern astronomy. Visible light observations with the Subaru Telescope and the Hubble Space Telescope have revealed the evolution of stars and hot ionized interstellar material in galaxy interiors down to early galaxies at redshifts of about 6–10. On the other hand, cold interstellar medium such as neutral gas and dust, the fuel for star formation in galaxies, has been challenging to observe in early galaxies, but recent observations with ALMA have revealed their evolution. In this article, I would like to introduce my research on distant galaxies using a combination of ALMA, Subaru, and Hubble Telescopes, along with the progress that I have made so far, which has not always been a straightforward path.