

JWST を使った最遠方銀河探査

播 金 優 一

〈東京大学宇宙線研究所〒277-8582 千葉県柏市柏の葉 5-1-5〉

e-mail: hari@icrr.u-tokyo.ac.jp



138 億年の長い宇宙の歴史の中で、銀河がどのように形成され、進化してきたかを知ることは、現代天文学における大きな目標の一つである。銀河の形成・進化を理解するために、これまでにすすばる望遠鏡やアルマ望遠鏡などの大型望遠鏡を用いた遠方銀河の観測が行われてきたが、ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡（JWST）の登場によりこの分野は急速に進展しており、今や多くの研究者が JWST のデータに熱中している。私も、すすばる望遠鏡やアルマ望遠鏡に研究者として育てていただき、現在 JWST を使った研究を楽しんでいる一人である。本稿では、私が JWST を用いた最遠方銀河の研究にたどり着いた過程と、そこで待ち受けていた予想外の発見について紹介したい。

2022 年 7 月 20 日深夜 4 時

「えっ！なにこれ…」

思わず鳥肌が立ち、一瞬で目が覚めた。連日深夜遅くまで、JWST で撮られた画像から遠方銀河を探していた私は、選ばれた天体のうちの一つに目が釘付けになった。ディスプレイには、 $1.5\ \mu\text{m}$ を境に、長い波長でははっきりと見え、短い波長では見えないという、お手本のような赤方偏移 $z \sim 12$ （134 億年前）の銀河の姿が映っていた。

「この時代にこんな明るい天体がいるのか…」
予想もしていなかった宇宙の姿に驚き、感慨に浸っていると、外は明るくなり始めていた。JWST の登場により最遠方銀河研究が新たな時代に突入したことを実感した、まさにそんな夜明けだった。

1. 鳥肌の立つ瞬間

「研究者をやっていると、鳥肌が立つような発見をする瞬間が人生で何度かあるんだよ」2016 年、博士課程のある日、確か一緒に食事をしてい

た時だと思うが、指導教員である大内正己さん（現・国立天文台・東京大学教授）がこのような話をされた。研究者という職業の魅力について語る大内さんの姿に眩しさを感じ、せっかく研究者になるなら、自分もそのような経験をしてみたいと思った。しかし同時に、果たして自分にそんな発見ができるのだろうか、一生できずに人生を終えるのではないか、という一抹の不安も感じた。

当時私は、すすばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam（HSC）の探査データを使って選択した大量の遠方銀河サンプルをもとにクラスタリング解析を行っていた [1]。この研究テーマは博士課程の途中で卒業された先輩から引き継いだ研究であったが、もともと大量のデータを使った観測的宇宙論をやりたいと思っていた私にとっては非常に楽しい研究であった。しかし、遠方銀河のクラスタリング研究を行っている研究者は世界中でもごくわずかで、研究会で発表してもあまり興味をもってもらえず、質問が出ないために座長が気を利かせて質問してくれることが少なからずあった*1。そ

*1 このような経緯もあり、HSC を使った遠方銀河のクラスタリングの研究 [1] に欧文研究報告論文賞をいただいたときは本当に嬉しかった [2]。

こで自分から研究会で興味をもってくれそうな研究者を捕まえて話をしていたわけであるが、同時にもっと面白い研究はないか、日々 arXiv に投稿される論文を見ながら考えていた。

この頃は、ハッブル宇宙望遠鏡に取り付けられた近赤外カメラ WFC3 によって見つかった遠方銀河が、大型地上望遠鏡に新しく搭載された近赤外分光器 (Keck/MOSFIRE 等) によって分光同定され、最遠方銀河の記録が次々と更新されていった時期であった [3, 4]。私も当時 Pascal Oesch (現・ジュネーブ大学) たちによる $z=7.7$ の最遠方銀河の分光同定を報告する論文 [5] を読み、まだ誰も見ていない宇宙を開拓する研究に興奮したことを覚えている。また同時に、発見された天体の数は1つだけでも、その天体の発見が驚きをもたらし、さまざまな想像を生み、世界がパッと開けるような感覚を覚える、このようなブレイクスルー的な発見こそ天文学研究の醍醐味の1つなのだと、大学院生ながら感じた^{*2,3}。

2. 転機：アルマ望遠鏡

このような状況の中で、自分もこのような、まだ人類が見ぬ宇宙の姿を明らかにしていく研究をしたい、という気持ちが強くなっていった。しかし当時、最遠方銀河の研究はアメリカ・ヨーロッパのグループがかなり先行していた。今から普通に参入しても活躍できない、そう思った私は、自分でできることは何かを考えながら新しい

研究にチャレンジしていった。日本の研究者にとって、すばる/HSC 探査のデータを使って構築した明るい遠方銀河の独自サンプルがあることは大きな強みであった。そこで HSC の遠方銀河サンプルを大型望遠鏡で追観測する観測提案書 (プロポーザル) を大学院生の間に提出し、幸運にもいくつか観測時間をいただくことができた。

その中で大成功したのはアルマ望遠鏡を使った研究だった。遠方銀河でよく観測されていた [CII]158 μm 輝線だけではなく、2016年に井上昭雄さん (現・早稲田大学教授) によって初めて遠方宇宙で検出された [OIII]88 μm 輝線 [7, 8] も観測する提案であった。この [OIII]88 μm 初検出の話は当時研究室で同室にいた澁谷隆俊さん (現・北見工業大学准教授) から初めて聞き、まさに自分のやりたい、新しい宇宙を切り開く観測だと感じ、急いで井上さんに連絡を取ったのを覚えている。研究室の小野宜昭さん (東京大学助教) と一緒に長時間かけてターゲット選びをし (図1)、松岡良樹さん (現・愛媛大学准教授) がキューサー探査の中で分光同定された $z\sim 6$ の銀河 [9] のアルマ観測を提案することに決まった。

アルマ望遠鏡の観測によって、観測した3つの銀河全てから [OIII]88 μm 輝線と [CII]158 μm 輝線を検出することに成功した (図2)^{*4}。しかし、この結果を論文にまとめるのは一筋縄ではいかなかった。初めてアルマ望遠鏡に提出したプロポーザルは採択されず、2回目の提案で採択されたた

^{*2} 論文を見た当時、私は大きなブレイクスルーだと感じたのだが、実は Pascal Oesch たちにとってはこの発見はこれまでの研究の積み重ねの延長線上のものであった。彼らはこれまで $z>7$ で分光同定されてきた銀河が実は [OIII] $\lambda 5007$ 輝線が非常に強く、Spitzer/IRAC の近赤外測光データで超過が見られることに気が付いており、IRAC の超過が見られる $z>7$ 銀河候補を集中的に分光していたのである [6]。ハワイの観測でこのことを彼本人から聞いた私は彼らの洞察の鋭さに驚き、同時に世界トップレベルの研究者との実力の差を痛感した。

^{*3} 「0を1にする研究こそ楽しい」研究を始めた当初、大内さんに何度か言われていた言葉であるが、物理学科出身の私は、新しい天体を1つ見つけたところで、数を増やして統計を取らないと何もわからないのではないかと最初は思っていた。研究を始めて数年が経ち、この頃になってようやく天文学という研究分野の奥深さを理解し始めた。

^{*4} 博士1年の頃から大型望遠鏡にプロポーザルを出し続けてきたが、うまくいかなかった観測もあり、これが狙った輝線を遠方銀河で検出できた (つまり成功した) 初めての観測であった。当時データを見たときはとても嬉しく感じ、検出した輝線の画像を印刷して研究室の机に飾っていた。

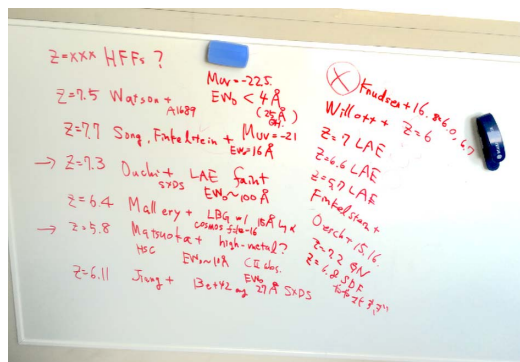


図1 アルマ望遠鏡の観測ターゲットに関する議論の様子。アルマ望遠鏡は南米チリにあるため、天体の赤緯が高すぎると観測できない。さらに [OIII]88 μm 輝線は理論的には明るい予想されていた一方で [9], $z \leq 9$ では大気吸収が強い周波数に赤方偏移してしまうため、うまく観測ターゲットを選ぶ必要があった。長時間の議論の結果、左下から2番目の(矢印がついている)松岡さんが分光同定された $z \sim 6$ の銀河をターゲットにすることに決まった。

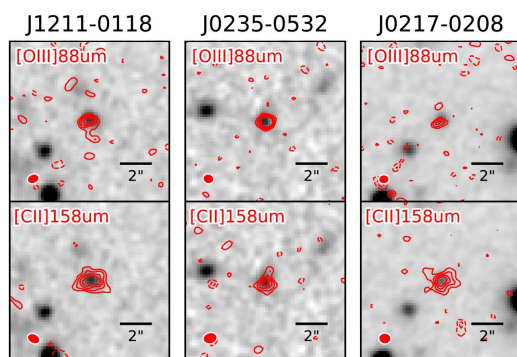


図2 観測した3つの $z \sim 6$ 銀河の [OIII]88 μm 輝線と [CII]158 μm 輝線 [11]。コントラストがアルマによって得られた輝線マップで、背景はHSCの z バンド画像。観測した3天体すべてから [OIII]88 μm 輝線と [CII]158 μm 輝線を検出することに成功した。

め、観測データが全て届いた2019年春には井上さんの初検出から3年以上が経っていた。その間に橋本拓也さん(現・筑波大学助教)や田村陽一さん(名古屋大学教授)により $z=7-9$ の銀河で次々と [OIII]88 μm 輝線の検出が報告され [12–15], [OIII]88 μm 研究のフロンティアは $z \sim 9$ に移りつつあった。このまま $z \sim 6$ の銀河3つからの [OIII]88 μm 輝線の検出を報告しても大きなインパクトにはならないだろう、しかも同時に検出された [CII]158 μm 輝線は光解離領域 (photodissociation region; PDR) から出るため、電離水素領域 (Hii region) のみから出る [OIII]88 μm 輝線とは異なり理論的解釈が難しい。どうすればよいのか悩んでいた^{*5}。

この頃は東大での大学院生活を終え、国立天文台のアルマプロジェクトにポスドクとして在籍しており、アルマを使った研究をしている人々と議論する機会が豊富にあった。その中で、遠方銀河の輝線を理論的に研究していた森脇可奈さん(現・東京大学助教)が当時大学院生として定期的に天文台に来ており、彼女と議論していく中で、近傍銀河の [CII]158 μm 輝線の強度を光電離モデルCloudyを使ってPDRも含めて理論的に計算している研究 [17] があることを知った。「輝線の検出を報告するだけでなく、Cloudyを使って [OIII]88 μm と [CII]158 μm 輝線の強度を理論的に解釈し、星間物質 (ISM) の物理状態を議論する論文は新しいのではないか」そう確信した私は、光電離モデル計算のエキスパートである長尾透さん(愛媛大学教授)、但木謙一さん(現・北海学園大学教授)に教えを請いながらCloudyを使った理論計算を進めた。結果として、 $z > 6$ の遠方銀河は近傍銀河と比べて系統的に [OIII]88 μm / [CII]158 μm 輝線強度比が高く、その原因はISM

^{*5} 「つまらん研究をする人はつまらん人間」これはとある東大工学部の教授が1991年に記した言葉で [16], 私も工学部の友人に教えてもらったものである。非常に厳しい言葉で、実際には研究の良し悪しで人の価値は測れないだろうが、当時の私はこの言葉が頭をよぎり、何か面白い研究をしなければ、と思っていた。

の電離パラメータが高いか、PDRの被覆率が低いからである、という論文にまとまった [11].

この当時はまだJWSTも打ち上がっておらず、 $z>6$ の銀河ではほとんど水素のLy α くらいしか輝線を検出できていなかったため、遠方銀河のISMはわからないことだらけであった。そのような状況の中でこの論文は、ALMAで新しく検出されつつある輝線と理論モデルを使って、遠方銀河のISMの物理状態を考察した貴重な論文になった。この頃から、研究会で発表しても質問が出ない、というようなことはなくなり、また招待講演の依頼もくるようになった。自分でプロポーザルを書いて獲得したデータで論文を書き、一人前の観測天文学者になった気がした。

3. JWSTを使った最遠方銀河探査

3.1 半年前からの準備

その後もイギリス、そして古巣の東大柏に移りながら研究を進めていった。その中で幸運にもJWSTの初年度観測プロポーザルが2本採択された [18]。そして打ち上げが迫る中で自分の中でもJWSTへの期待が高まりつつあった。採択された自分のPI観測プログラムのデータが取られるのを待たずに、運用が始まり大きな探査データが公開されたらすぐに研究に取り掛かりたいと考えられるようになった。やはり目指すは、学生の時に夢見た最遠方銀河の探査である。

JWSTの初年度観測では、Early Release Science (ERS) や Early Release Observation (ERO) と呼ばれる、優先的にデータが取得され、すぐにコミュニティに公開されるプログラムがいくつかあった [19–22]。これらのデータを使って、 $z>10$ の最遠方銀河を探るのが最も単純かつ王道の研究だろう。しかし、JWSTはご存知の通りアメリカ・ヨーロッパ・カナダが開発・運用している望遠鏡であり、大きな探査も欧米チームが主導している。探査データが公開されて研究を初めても、探査を主導している欧米チームの方がデータ

を熟知しており、研究者の数も多いためすぐに論文を書かれてしまう。先を越されるのは目に見えていた。そこで共同研究者とも議論しながら、1. 個別の探査データにはこだわらずに使用可能なデータをすべて使い遠方銀河を探す、2. 他の研究で選ばれている遠方銀河が自身の選択基準で選ばれるかどうかを確認し論文にリスト化する、という2つの方針を立てて、欧米チームとは一線を画す包括的な研究を目指すことにした。

JWSTは無事に2021年のクリスマスに打ち上がり、私はその翌月の2022年1月頃から準備を始めた。まずはアメリカ宇宙望遠鏡科学研究所(STScI)が開催しているタウンホールやウェビナーに参加して情報を集めた。調べていくうちに、JWSTのデータは取得後すぐにSTScIによって専用のデータリダクションパイプラインで整約され、整約済みの、研究にそのまま使えるデータが比較的短い時間で公開されることがわかった。パイプラインを自身で動かす必要はないのかと思ったが、一応練習しておこうと、ERSの1つであるCEERS探査のチームが公開している擬似データセットをダウンロードしてパイプラインの使い方を勉強した(これがのちに役立つことになる)。またパイプラインの出力を検証していくうちに、パイプラインから出てくる天体カタログの等級よりも、自分でSource Extractor[23]を動かして作成したカタログの等級の方がより正確であることに気がつき、Source Extractorを使って画像からマルチバンドカタログを作成するスクリプトも作成した。当時M1 Macに移行したばかりであり、昔のプログラムはアップルM1チップとの互換性の問題で動かないものもあったため、限界等級やPoint Spread Function (PSF) の測定、PSF合わせを行うスクリプトも1から書き直した。また、ERSで観測するターゲットの中には重力レンズ銀河団が含まれていたのも、大栗真宗さん(千葉大学教授)が開発された重力レンズモデルソフトウェア glafic [24] を使う練習も行った。

時半からはNHKの記者からインタビューを受けたのだが^{*8}、NIRSpec スペクトルの凄さを熱弁しながら、NIRCam 画像を使う自分の研究は本当にこれでよいのだろうか、NIRSpec を使った研究を準備しておいた方がよかったのではないかと、自分の研究方針にさらに不安を抱き始めた。

データは予定通り14日午前0時に公開された。天文学者たちの熱い夏の幕開けである。もちろん即座にデータをダウンロードして、その日は徹夜で解析を進めた。ダウンロードしてすぐに、STScIから公開された整約済み画像はスカイ引きがうまくいっておらず、自分でリダクションパイプラインを走らせる必要があることに気がついた。半年前からパイプラインを使う練習をしておいてよかった、そう思いながら大量の生データをダウンロードしてパイプラインを走らせ始めた。整約が済んだ画像からマルチバンドカタログを作成し、ドロップアウト法で遠方銀河を選択する。それだけを聞くと単純なことのよう聞こえるが、実際の作業は全く単純ではない。JWSTにより撮られたNIRCam画像には、我々の見つけた遠方銀河以外にも近傍の星や銀河が大量に写っており、例えば134億年前の銀河は全体約40万天体のうち0.01%以下の数しかない。近傍の天体でも少しのノイズの影響で遠方銀河のように見えてしまい、ライマンブレイク法で遠方銀河として選んでしまう恐れがあるため、注意深く銀河を選択する基準を設定する必要がある。さらに宇宙

線起源の偽信号など、天体ではない信号も遠方銀河選択の邪魔になる。そもそもJWSTの本物の画像データは、これまで何年もかけて研究され尽くされたすばる望遠鏡やハッブル宇宙望遠鏡のデータと異なり、人類が初めて扱うデータのため、画像やノイズの特性もまだよくわかっていない。そのためデータの特性を理解しつつ、遠方銀河を選択する最適な基準を探し、実際に選ばれた天体を一個一個自分の目で確認し遠方銀河らしいか検討する、という試行錯誤を繰り返す必要がある。こうしている間にも、世界中のライバル研究者たちが解析を進め、明日にはarXivに論文が出ているかもしれない。そう思うと寝てもいられず、データが公開されて1週間は、朝10時まで解析をし、限界になって3時間だけ睡眠をとり、午後1時に起き解析を再開する、という日々を繰り返していた^{*9,10}。JWSTのような大型宇宙望遠鏡の観測が始まり研究分野全体が一気に進展する、このような機会は研究者人生でおそらく数回だろう。しかも今回は自分の研究分野ど真ん中である。ここで頑張らないと一生後悔する気がした^{*11}。

3.3 深夜4時の興奮と、熾烈な競争

データが公開されて数日は、EROのSMACS 0723、そして既にハッブル宇宙望遠鏡のデータが揃っているERS CEERSのデータを使い $z \sim 12$ 銀河を探した。しかし、設定した選択基準を満たす天体は一応見つかるのだが、画像を見ても自信を持って $z \sim 12$ だ、と言えるような天体は出でず、研究が行き詰まりつつあった。そんな中、

^{*8} 記者さんも深夜まで取材を行わなければなら大変である。ちなみにJWSTの打ち上げから最初のデータ公開までの時期はNHKに限らず多くの新聞社さんからも取材を受けたのだが、その中には私の過去の天文月報の記事[18]を読んで連絡をくださった記者さんもいた。

^{*9} 普段は1日8時間睡眠です…。

^{*10} 19日にはNHKの記者さんが研究室にJWSTのデータの様子を取材しにきた。その時のインタビュー映像は海外出張中の24日に無事放送されたのだが、帰国してから録画を見てみると寝不足で目に隈ができて自分の顔がテレビ画面に写っていた。

^{*11} 当時家にはもうすぐ1歳になる長男がいたが、この時ばかりは育休中の妻にお願いをしてなんとか研究時間を確保していた。理解し協力してくれた妻には頭が上らない。後日このことを先輩研究者に話すと、Harikane et al. (2023a)の成果の半分くらいは奥さんのおかげなんじゃないか、と言われたが、全くもってその通りであろう。

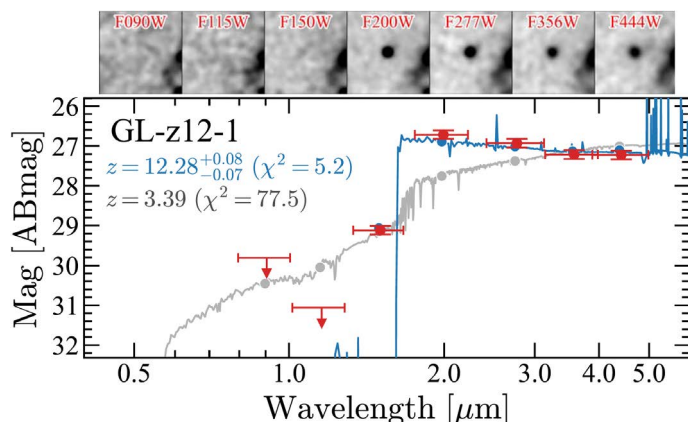


図3 JWSTの初期データから見つけた明るい $z\sim 12$ 銀河候補GL-z12-1[26]。上パネルはJWST/NIRCamの画像を示している。F150Wバンドを境に長波長側では明るく、短波長側では暗くなっており、画像だけでもF150W-ドロップアウト銀河であることがはっきりとわかる。下パネルは丸印が観測された各バンドごとの等級（スペクトルエネルギー分布；SED）を示しており、 $z\sim 12$ 銀河のモデル（青線）とよく合うことがわかる。この銀河はのちのNIRSpec分光観測で、赤方偏移が $z=12.34$ であることが確認されている [27]。

観測時間が長く、データ量が多いため時間がかかっていたERS GLASSのデータの整約が終わったので、 $z\sim 12$ 銀河を選択してみることにした。選ばれた天体の画像と等級を1つ1つ目で確認していくと、そのうちの1つの天体を見た時に鳥肌がたった。冒頭で紹介した、お手本のようなF150W-ドロップアウト（ $z\sim 12$ ）銀河、GL-z12-1の発見である（図3）。明るい上に、観測時間が長く、データが深いおかげで、ひと目でこれは $z\sim 12$ の銀河だとわかった。限界等級ギリギリの暗い銀河が1個見つかったらよい方、という予想をしていたところで、限界等級より10倍も明るい銀河が見つかったのは衝撃だった。「こんなに明るい天体が $z\sim 12$ の宇宙にいるのか。従来の理論予測がまちがっていたのだろうか。なぜこんなに明るいのだろう。この明るさならアルマで追観測できるのでは。いやJWST DDTプロポーザルを出すべきだろうか。」20日深夜4時の出来事だったが、驚きで一気に目が覚め、さまざまな可能性が頭の中をよぎった。さらに明るくまたお手本のようなF115W-ドロップアウト（ $z\sim 9$ ）銀河GL-z9-1も見つかった。この頃にはもう研究の方針への不安はどこか

に消え去っており、興奮で胸がドキドキして眠れない状態であった。

しかし、競争は予想以上に熾烈だった。後からわかったことだが、JWSTの初期データを使って最遠方銀河を探しているグループは、我々を含めて世界に10あった。深夜4時の発見の後、すぐに共同研究者に報告のメールをしたが、その日の朝9時に更新されたarXivにはアメリカ・ヨーロッパの2つの研究グループからそれぞれ独立にGL-z12-1、GL-z9-1を報告する論文2本 [28, 29] が投稿されていた。自分が世界のトップ研究者たちの熾烈な競争の中に飛び込んでしまったことを実感した。焦る気持ちもあったが、我々の方針はなるべく多くのデータを使い包括的な研究をすることである。粛々とEROやERSの他の領域でも天体を探しながら、論文にまとめて行った。

3.4 論文執筆：天文学者になってよかったと思った瞬間

翌週25日からはドイツ・リングバーク城で開かれる研究会に招待されていた。リングバーク城は、学生時代にさまざまな人にその様子を聞き、研究者として一度は行ってみたいと思っていた場

所の1つであった。しかし、JWSTを使った研究が佳境を迎えているこの状況である。観光は最低限（初日のお城ツアーのみ参加）にし、エクスカージョンにも参加せず研究・論文執筆を進めた^{*12}。しかもこの頃になると、他のグループからも次々と論文が出始め全く気の抜けない状況であった [30–34]。中にはF200W-ドロップアウト ($z \sim 16$) 銀河候補^{*13}を提示していたり [35]、 $z \sim 11$ –20で88個のも銀河候補をリストしていたりする論文 [36] もあった。リングパーク城のインターネットが遅いだろうと踏んで事前にMac Bookにダウンロードしておいたデータを参照しながら、研究会の隙間時間に、これらすべての銀河候補が我々の選択基準で選ばれているかどうかを確認しながら論文にリストして行った。

我々の結果でも、他グループの結果でもやはり $z > 10$ の明るい銀河の検出個数はほとんどの理論予測より多く、どうも従来の想定よりも多くの銀河が宇宙初期に存在するようであった。理論予測は $z < 10$ の宇宙において、これまでのハッブル宇宙望遠鏡などの数多くの観測結果をきちんと再現しているので、これらが $z > 10$ のJWSTの観測結果を再現できないのは驚きである。なぜこんなにたくさんの銀河が、 $z > 10$ という宇宙の初期に見つかるのだろうか？初期データから見つかった銀河候補の一部は後に分光同定されており、分光された銀河だけを数えても理論予測より多いので [38, 39]、低赤方偏移銀河によるコンタミネーションのせいではないだろう。 Λ CDM標準宇宙論モデルが正しければ、ダークマターハローの個数密度を変えることはできないので、銀河の個数

が想定以上に多いというJWSTの観測結果を説明するには、 $z > 10$ の宇宙で何らかのメカニズムで銀河を明るくして検出される個数を増やす必要がある。リングパーク城で論文を書きながら、過去にすばる望遠鏡を使って行った研究 [1, 40] を参考にして、理論予測よりも星形成効率が高いことや、活動銀河核 (AGN) の影響で明るく輝いている可能性を思いついたが、他の可能性はないだろうかと考え始めた。

ドイツから日本に帰る飛行機の乗り継ぎで、同じ研究会に参加していた兒玉忠恭さん（東北大学教授）とたまたま空港で一緒になった。研究会で Rachel Bezanson が発表していた $z \sim 6$ –9 の大質量銀河候補（論文は Labbe et al. [41]）の話題になり、なぜこんなに大質量の銀河が遠方宇宙にいるのだろうか、と兒玉さんに問いかけたところ、兒玉さんは初期質量関数^{*14} (IMF) が従来の仮定と違う可能性を指摘された。確かに IMF を変えれば、同じ明るさの銀河も小さい星質量で説明できるので、大質量銀河を遠方宇宙で作る必要はなくなり説明は容易になる。なるほどと思いながら、同じ議論を今回私たちが見つけた $z > 10$ の明るい銀河たちにも適用できるのではないかと、思いついた。赤方偏移が高くなると、金属量が低くなり、さらに CMB の温度が上がるため、IMF はより top-heavy になる、つまり大質量星が多くなることが理論的に予想されていた [42, 43]。大質量星が多いということは、すなわち今 JWST で見ている静止系紫外で銀河が明るくなる、ということである。実際に帰国してすぐに top-heavy IMF の星種族合成モデルをダウンロードして計算して

^{*12} 2年後再び行く機会があり、その時は晴れやかな気持ちでリングパーク城を楽しむことができた。

^{*13} 残念ながらこの天体 (CEERS-93316) は本物の $z = 16$ 銀河ではなく、 $z = 4.9$ の low- z 銀河であった [37]。 $z = 4.9$ を low- z と言わなければならないことに JWST の凄さを感じる。ちなみにこの天体は当初の CEERS チームからの論文では選ばれていなかったが、CEERS PI の Steven Finkelstein さん（テキサス大学オースティン校）が研究会で語ったところによれば、彼らは $z = 16$ 銀河がまさかデータに存在するとは思わず、測光赤方偏移の推定を $z = 15$ 以下に限定してしまっていたらしい。それくらい、JWST による $z > 10$ 銀河の大量発見は遠方銀河研究コミュニティにとって衝撃の大きい結果であった。

^{*14} 星が生まれるとき、どのような質量の星がどのような頻度で生まれるかを表す関数。

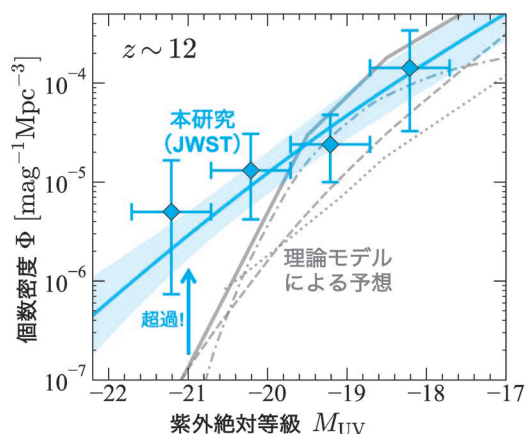


図4 $z \sim 12$ の紫外光度関数 ([26]を改変). 横軸は紫外絶対等級, 縦軸は銀河の個数密度. ダイヤ印がJWSTを使った本研究の結果. 初期データでは統計が限られているためエラーが大きい, $z \sim 12$ の宇宙初期で初めて描かれた光度関数であった. $z \sim 12$ でも暗い銀河が多く, 明るい銀河が少ない, ということをこの図から確認でき, 私はこの結果をプロットした時に134億年前の宇宙の様子を人類で初めて見た気持ちになり感動した. 灰色線は様々な理論モデルによる予想で, 明るい側では個数密度を過小評価しており, GL-z12-1のような明るい銀河がこの宇宙初期の時代に存在することは予想されていないことがわかる.

みたところ, 確かに大質量星からの大量の電離光子が周りのガスを電離するために, 電離ガスからの連続光である nebular continuum が強くなり静止系紫外で非常にも明るくなることがわかった^{*15}. 急いで議論と関連する図を加え, 8月3日深夜2時44分に論文 [26] を投稿した^{*16}. JWSTのデータが公開されてからちょうど3週間であった.

論文は共同研究者の方々のおかげで, 36ペー

ジの大作になった. 反響は凄まじく, 引用数369と, 2000本を超えるJWST関連論文の中で欧米チームの論文を抑えいまだに引用数1位となっている^{*17}. イギリスでポスドクをしていた時代の上司である Richard Ellis さん (ユニヴァーシティ・カレッジ・ロンドン) からは “Impressive paper!” とお褒めの言葉をいただき, 国際会議の招待講演依頼を大量にいただくなど (2023–2024年で20件), 自分の研究者人生を変えた論文になった. また自分としても, 構築した銀河サンプルを使って初めて $z \sim 12$ の光度関数 (図4) をプロットした時は, 人類がいまだ目にしたことのない134億年前の宇宙の姿を初めて概観した気持ちになり, 「こんな経験ができるなんて, 天文学者になってよかったなあ」と心から感じた.

4. 鳥肌の立つ発見・再び

4.1 次の研究

JWSTを使った最初の論文をまとめた後は, 国際研究会やセミナー発表で忙しい日々が続いていたが, 11月から12月にかけてERSのGLASSとCEERSでNIRSpecによる観測が進み, NIRSpecの分光データを使った研究の機運が高まってきた. NIRSpecデータは遠方銀河の金属量を調査していた中島王彦さん (国立天文台特任助教) がまとめてくださっており [44], アイディアさえあればすぐにNIRSpecデータを使った研究が始められる環境が整いつつあった. しかしすぐに思いつくような研究テーマは既に周りの共同研究者が取り組み始めており, NIRSpecデータを使って何をやらうとかと悩んでいた.

^{*15} このほかにも, 爆発的に星を作っている銀河を選択的に観測している可能性などが議論されているが, 理論予測と観測のずれの原因はまだはっきりとはしておらず, さらなる観測が必要である.

^{*16} 8月はアメリカでは夏時間なので, arXivの論文投稿締め切り時刻は日本時間深夜3時である. 普段は深夜3時ぴったりに投稿し, 自分の論文をarXivのリストの一番上に載せようとする人も多いだろう. しかしJWSTを使った論文が次々と投稿されていたこの時期は, 皆1日でも早く論文をarXivに載せるために, むしろ締め切り時刻直前に投稿された論文が多かった.

^{*17} 2024年10月31日現在.

そのような状況の中で、2023年2月初め、CEERSチームのDale Kocevski（コルビー大学）たちが $z=5-6$ の広輝線AGNの分光同定を報告した [45]。見つかった天体のH α 輝線は確かに広輝線AGNに特徴的な広がったプロファイルを示しており、一方で紫外絶対等級で $M_{UV} \sim -19$ magと、これまで遠方宇宙で見つかったクェーサーと比べて100倍ほど暗い。これまでの地上望遠鏡によるクェーサー探索によると、遠方宇宙のクェーサーの光度関数は暗い側では傾きが緩やかになるため、暗いAGNの数は銀河に比べると少なく、個数密度では1000分の1以下と見積もられていた。そのような予想があったため、暗いAGNはJWSTの探索自体では1個も見つからないだろうと思っていた私にとって、Dale Kocevskiたちの論文は驚きであった。しかし報告されたのは2天体のみであり^{*18}、見積もられた個数密度はエラーが大きく、本当にAGNの数が従来に見積もりと比べて多いのかどうかはわからない状況であった。

似たような暗いAGNはほかにはいないのだろうか、そう思った私は中島さんに連絡をとってNIRSpecデータで広輝線AGNを探してみることにした。当時私たちがもち合わせていた遠方銀河のNIRSpecデータは、EROの5天体、ERS GLASSの15天体、ERS CEERSの165天体、合計185天体であった。このうちCEERSのデータが一番銀河の数が多く、まだ広い領域をカバーしているため、個数密度が少ないと予想されるAGNを探すには最適であった。しかしDale KocevskiはCEERSチームの主要メンバーである。既にCEERSのデータは全て確認していて、それでこの2天体を論文で報告したいのではないかと、普通ならそう考えるだろう。もしそうならCEERSのデータの中には他には

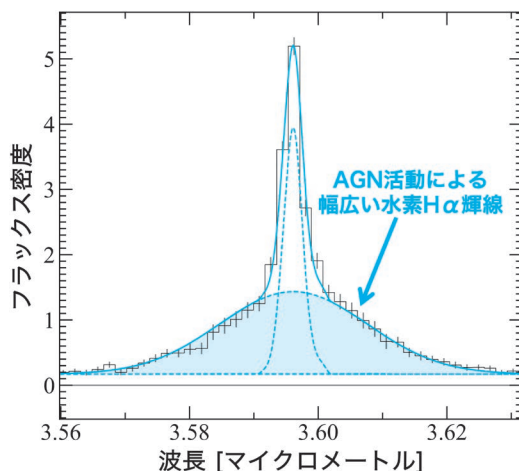


図5 本研究で発見した暗いAGNのH α 輝線スペクトルの一例 [48]。幅広い（半値幅 ~ 2200 km s $^{-1}$ ）H α 輝線が高いSN比（ 37σ ）で検出できており、この天体が $z=4.4$ の広輝線AGNであることを示している。

AGNは見つからないはずであり、ましてや個数や面積の小さいEROや、GLASSのデータには何もないだろう。つまり何も発見できない可能性の方が高かった。

4.2 予想外の遠方AGNの大量発見

このように期待していたわけではなかったが、とりあえず185天体のスペクトルを一個一個確認してみることにした。広輝線が見られると予想されるH α 輝線をまずはガウシアンでフィットし、禁制線である[OIII] $\lambda 5007$ 輝線とも比較しながら、結果を1天体ごと目で確認していく。するとKocevskiらの論文で報告していた天体以外にも、幅広いH α 輝線をもつ銀河がいることに気がついた（図5）。それも1天体だけではなく、どんどん見つかる。

「おお！本当にいるのか！それもこんなに…」

^{*18} このうちの1天体は、尾上匡房さん（現・東京大学研究員）や稲吉恒平さん（北京大学准教授）が分光前にNIRCam画像とSEDをもとにAGN候補として報告した天体であった [46, 47]。当時尾上さんたちの論文を読んだ私は、SEDを見ながらAGNではなくて強い輝線をもつコンパクトな銀河かもしれないな、などと思っていたのだが、その後の分光観測で見事AGNであることがわかり、AGNのエキスパートの慧眼に感服した。

4.3 2ヵ月弱で論文執筆

早速論文にまとめようとしたのだが、私はこれまで遠方銀河を専門としておりAGNについては明るくなく、ブラックホール質量の推定の原理も知らないレベルであった。周りの共同研究者にもAGNに詳しい人はいなかったため、過去のAGNに関する論文や、運良く妻が保管していたAGNの教科書を読みながら一から勉強をして解析・論文執筆を進めた。しかし、データが素晴らしいと自然と手を動かすスピードも速くなる。ひと月もすると、論文も形になってきた。

3月はイタリア・セストで開かれる会議に招待されていた。この会議は招待者限定の会議で毎年開かれており、遠方銀河のエキスパートが一堂に会する場として噂を聞いていたため、ようやく呼ばれるようになって嬉しい気持ちでいっぱいであった。しかし会議で他の講演者の発表を聞いてみると、どうも我々以外にも3グループが、JWSTのデータから新たに広輝線AGNを見つけている様子であった。急がなくてはならない、そう思った私はセストの自然とサウナを満喫するのは最低限にして、研究会や食事会の隙間を縫って論文を仕上げた^{*19}。こうして翌週、イギリス・ケンブリッジで開かれた研究会^{*20}の最中に無事に論文[48]を投稿することができた。

この論文も大変な反響をいただき、AGNの国際会議に呼んでいただけたほどだったのだが、

1つ心残りがある。それは見つかった天体にカッコ良い名前をつけられなかったことである。見つかった広輝線をもつ暗いAGNの中には画像上で広がった構造をもつものだけではなく、コンパクトな点源として見え、静止系紫外で青く可視で赤いという特徴的なSEDをもつものがある。これらはのちのちJorjyt Matthee（オーストリア科学技術研究所）たちの論文[50]でlittle red dotsという名前がつけられる、今や大変注目されている天体であり、AGN活動を含むその性質について盛んな議論が巻き起こっている（例：[51]）。しかし、我々も赤くコンパクトなAGNがいることを論文で指摘していたし、そのうち1つは我々より前にKocevskiたちの論文でも報告されている^{*21}。もっと私に名付けの才能があれば、と悔やまれる。

5. まとめと今後

JWSTでは幸運なことに、Cycle 2, 3でも提案を採択いただき、Cycle 3の $z=11$ 銀河をターゲットにした観測はこの冬ごろに予定されている。これからも驚くような発見が待っているかもしれないと思うと、ワクワクする気持ちが止まらない。JWSTは観測開始からまだ2年ほどしか経っていないが、素晴らしい成果が次々と報告されており、ついに人類は $z=14$ を超える宇宙にまで手が届くようになった（図8）。このままのペースで研究が進めば、宇宙で最初に生まれた銀河（初代

^{*19} こちらも翌年行く機会があり、その際に楽しむことができた。

^{*20} この会議の最終日である金曜日の深夜から、3.4節で出てきた $z\sim 16$ 銀河候補CEERS-93316のJWST NIRSpec DDT分光観測が予定されていた。そのため会議のコーヒープレイクはこの天体の話題で持ちきりであり、この天体が $z\sim 16$ かlow- z かどっちにワインを賭けるか、などという話もしていた。ちなみにJWST DDTプログラムは取得後即時にデータが公開されるため、DDT観測時間を獲得したチームは急いで論文を書いて投稿しなければならない。実際にCEERS-93316の分光結果に関する論文も翌週火曜日の（つまり最短の）arXivに掲載されている。会議ではJWSTデータの解析で寝ていなかった、などというエピソードをほかの人からも聞き、睡眠時間を削っていたのは私だけではなかったことに安堵した。

^{*21} このlittle red dotsは、実は3.4節でIvo LabbeやRachel Bezansonたちによって初期データから報告された大質量銀河候補のうちの1天体である。初期データが公開された頃はJWSTの狭い探索データからAGNが見つかるとはほとんど誰も予想しておらず、さらに従来のAGNとは異なる特徴的なSEDをしていたため、分光データがない状態でこの大質量銀河候補をAGNだと判別するのは不可能に近かった。

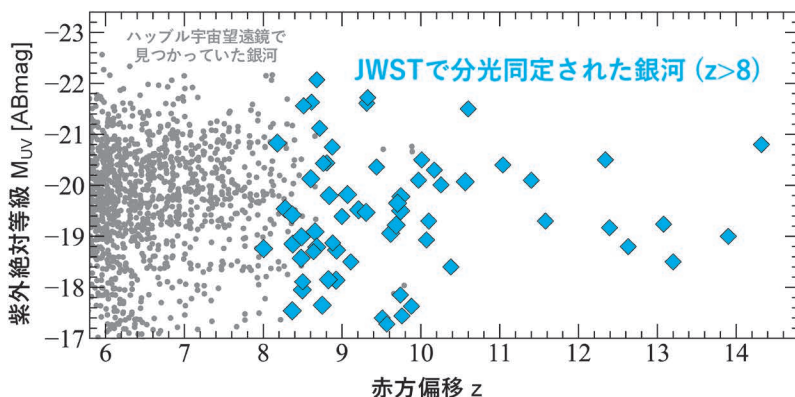


図8 これまでJWSTで分光同定されてきた $z>8$ 銀河（ダイヤ印）。JWSTの観測開始からまだ2年ほどしか経っていないが、 $z=14$ （135億年前）の宇宙にいる銀河まで分光同定されている [52–54]。灰色丸印はハッブル宇宙望遠鏡でこれまで見つかった銀河。 [39] を改変。

銀河）が見つかる日もいつか来るかもしれない。一方でJWSTは宇宙望遠鏡であり、その寿命は有限である。いつかJWSTが寿命を迎えた時に後悔しないように、知恵を最大限絞りながら、研究を前に進めていきたいと思う。

すばる望遠鏡から始まった遠方銀河研究は、アルマ望遠鏡、JWSTへと繋がり、その中でたくさんの人々に支えられながら、いくつもの感動と驚きを私にもたらしてくれた。今後もすばる／PFSやローマン宇宙望遠鏡、ELT、TMTといった30 m級望遠鏡、さらにHabitable World Observatoryなど、次世代の望遠鏡／装置が計画されている。その中で日本の研究が存在感を保てるように、また後輩たちにも私が体験したような驚きの発見を経験させられるように、引き続き頑張っていきたい。

謝 辞

この度、ありがたいことに2023年度研究奨励賞をいただきました。大変光栄に思います。本記事に記しましたように、私の研究は多くの方々に

支えられてきました。特に指導教員である大内正己教授には、無理を言って学部4年の頃から研究を始めさせていただき、研究方針の立て方から発表の仕方まで、数多くの有用なアドバイスをいただきながら研究者として育てていただきました。この場を借りて深く感謝を申し上げます。またほかにも多くの方々に助けていただいたおかげで今日まで研究を続けることができております。紙面の都合上全員の名前を挙げられませんが、イギリス時代から研究やプロポーザル執筆を強力にサポートしていただいたRichard Ellis教授や国立天文台で私を快くポストドクとして受け入れてくださった松田有一助教、共同研究者として有用なアドバイスをいただいた井上昭雄教授、大栗真宗教授、小野宜昭助教、斎藤俊助教、Ryan Sanders助教、Yechi Zhangさん、澁谷隆俊准教授、嶋作一大准教授、Tucker Jones准教授、但木謙一教授、田村陽一教授、利川潤特任助教、長尾透教授、中島王彦特任助教、長峯健太郎教授、橋本拓也助教、Peter Behroozi准教授、松岡良樹准教

*21 このlittle red dotsは、実は3.4節でIvo LabbeやRachel Bezansonたちによって初期データから報告された大質量銀河候補のうちの1天体である。初期データが公開された頃はJWSTの狭い探索データからAGNが見つかるとはほとんど誰も予想しておらず、さらに従来のAGNとは異なる特徴的なSEDをしていたため、分光データがない状態でこの大質量銀河候補をAGNだと判別するのは不可能に近かった。

授, 馬渡健さん, 宮武広直准教授, Surhud More 准教授, 森脇可奈助教, Michael Rauch さん, Suraphong Yuma 助教授, 吉田直紀教授 (五十音順), 研究室の先輩・同期・後輩の皆さん, 研究室秘書の井戸村貴子さんには大変お世話になりました。昨今のインフレ・円安のために招待された国際会議への参加が難しくなった際に助けていただいた, SUPER-IRNET の世話人の皆様, 山口育英奨学会, 住友財団, 伊藤科学振興会の皆様にもお礼申し上げます。また, 本稿の内容に関して助言をくださった天文月報編集委員の川中宣太さん, 志達めぐみさんに感謝いたします。最後になりましたが, 私の仕事を理解し支えてくれる妻と, 日々の生活を楽しく彩ってくれる子どもたちに心からの感謝を贈らせてください。

参考文献

- [1] Harikane, Y., et al., 2018, PASJ, 70, S11
- [2] 播金優一, 2024, 天文月報, 117
- [3] Finkelstein, S. L., et al., 2013, Nature, 502, 524
- [4] Zitrin, A., et al., 2015, ApJ, 810, L12
- [5] Oesch, P. A., et al., 2015, ApJ, 804, L30
- [6] Roberts-Borsani, G. W., et al., 2016, ApJ, 823, 143
- [7] Inoue, A. K., et al., 2016, Science, 352, 1559
- [8] 井上昭雄, 2017, 天文月報, 110
- [9] Inoue, A. K., et al., 2014, ApJ, 780, L18
- [10] Matsuoka, Y., et al., 2018a, PASJ, 70, S35
- [11] Harikane, Y., et al., 2020, ApJ, 896, 93
- [12] Hashimoto, T., et al., 2018, Nature, 557, 392
- [13] Hashimoto, T., et al., 2019, PASJ, 71, 71
- [14] Tamura, Y., et al., 2019, ApJ, 874, 27
- [15] 橋本拓也, 2024, 天文月報, 117
- [16] 堀洋一, 1991, 「研究者を目指す普通の学生諸君に」, 電子情報通信学会学生報, 21
- [17] Cormier, D., et al., 2019, A&A, 626, A23
- [18] 播金優一, 2022, 天文月報, 115
- [19] Pontoppidan, K. M., et al., 2022, ApJ, 936, L14
- [20] Treu, T., et al., 2022, ApJ, 935, 110
- [21] Finkelstein, S. L., et al., 2023, ApJ, 946, L13
- [22] 森下貴弘, 2024, 天文月報, 117
- [23] Bertin, E., & Arnouts, S., 1996, A&AS, 117, 393
- [24] Oguri, M., 2010, PASJ, 62, 1017
- [25] Rieke, M., et al., 2019, BAAS, 51, 45
- [26] Harikane, Y., et al., 2023a, ApJS, 265, 5
- [27] Castellano, M., et al., 2024, ApJ, 972, 143
- [28] Naidu, R. P., et al., 2022, ApJ, 940, L14
- [29] Castellano, M., et al., 2022, ApJ, 938, L15
- [30] Leethochawalit, N., et al., 2023, ApJ, 942, L26
- [31] Adams, N. J., et al., 2023, MNRAS, 518, 4755
- [32] Atek, H., et al., 2023, MNRAS, 519, 1201
- [33] Morishita, T., & Stiavelli, M., 2023, ApJ, 946, L35
- [34] Finkelstein, S. L., et al., 2022, ApJ, 940, L55
- [35] Donnan, C. T., et al., 2023, MNRAS, 518, 6011
- [36] Yan, H., et al., 2023, ApJ, 942, L9
- [37] Arrabal Haro, P., et al., 2023, Nature, 622, 707
- [38] Harikane, Y., et al., 2024a, ApJ, 960, 56
- [39] Harikane, Y., et al., 2025, ApJ, 980, 1
- [40] Harikane, Y., et al., 2022, ApJS, 259, 20
- [41] Labbé, I., et al., 2023, Nature, 616, 266
- [42] Omukai, K., et al., 2005, ApJ, 626, 627
- [43] Chon, S., et al., 2022, MNRAS, 514, 4639
- [44] Nakajima, K., et al., 2023, ApJS, 269, 33
- [45] Kocevski, D. D., et al., 2023, ApJ, 954, L4
- [46] Onoue, M., et al., 2023, ApJ, 942, L17
- [47] 尾上匡房, 2024, 天文月報, 117
- [48] Harikane, Y., et al., 2023b, ApJ, 959, 39
- [49] Matsuoka, Y., et al., 2018b, ApJ, 869, 150
- [50] Matthee, J., et al., 2024, ApJ, 963, 129
- [51] Kokubo, M., & Harikane, Y., 2024, arXiv:2407.04777
- [52] Carniani, S., et al., 2024a, Nature, 633, 318
- [53] Schouws, S., et al., 2024, arXiv:2409.20549
- [54] Carniani, S., et al., 2024b, arXiv:2409.20533

A Search for the Most Distant Galaxies Using the JWST

Yuichi HARIKANE

The University of Tokyo, Institute for Cosmic Ray Research (ICRR), 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba, 277-8582, Japan

Abstract: Understanding how galaxies have formed and evolved over 13.8 billion years of cosmic history is one of the major goals of modern astronomy. To explore galaxy formation and evolution, high redshift galaxies have been observed using large telescopes such as the Subaru Telescope and ALMA. However, with the arrival of the James Webb Space Telescope (JWST), this field is evolving rapidly, and now many researchers are excited about JWST data. I am one of those who were trained as a researcher using the Subaru Telescope and ALMA and am now enjoying research with the JWST. In this article, I would like to share the journey that led me to study the most distant galaxies using the JWST and the unexpected discoveries that awaited me there.