

# ALMAで発見された [OIII] 88 $\mu\text{m}$ 輝線銀河 の JWST 観測：宇宙初期の星形成と 宇宙再電離の解明を目指して



橋本拓也

〈筑波大学 〒305-8577 茨城県つくば市天王台1丁目1-1〉

e-mail: hashimoto.takuya.ga@u.tsukuba.ac.jp

この度、日本とスペインからなる国際共同研究チームの観測提案が JWST の第一期観測 (GO1) へ Medium 枠として採択されました。これは赤方偏移およそ 6 から 8 (宇宙年齢 6 から 10 億年) に存在する銀河 13 天体を JWST の撮像と面分光モードで観測するもので、合計 34 時間の観測時間が割り当てられています。観測ターゲットはいずれも ALMA によって二階電離した酸素イオンの輝線 ([OIII] 88  $\mu\text{m}$ ) が検出された天体で、私たち研究グループの強みを活かして得られたサンプルです。本記事では観測提案に至った経緯と期待される成果を紹介します。

## はじめに

この度、私たち日本とスペインからなる国際共同研究チームの観測提案が James Webb Space Telescope (JWST) の第一期観測 (GO1) へ採択されました (PIs: J. Álvarez-Márquez, T. Hashimoto)。これは赤方偏移およそ 6 から 8 (宇宙年齢 6 から 10 億年) に存在する銀河 13 天体を JWST の撮像 (NIRCam) と面分光 (NIRSpec IFU) モードで観測するものです。観測ターゲットはいずれも ALMA によって二階電離した酸素イオンの輝線 ([OIII] 88  $\mu\text{m}$ ) が検出された天体で、私たち研究グループの強みを活かして得られたサンプルです。本提案は合計で 34 時間が割り当てられており、Medium 枠 (観測時間が 25 時間以上 75 時間未満) での採択に至りました。振り返ると観測提案の準備は必ずしも順風満帆ではありませんでしたが、共同研究者の方々の助けや励ましで乗り越えられ、まずは本研究において最高のスタートを切ることができたことを嬉しく思います。

## 観測提案に至る経緯

### ALMA と [OIII] 88 $\mu\text{m}$ 輝線に基づく遠方銀河探査

銀河がいつ形成され、どのように現在の姿へと進化したのかは未だ十分に解明されていません。これを理解するためには、遠方すなわち過去の宇宙に遡って銀河の観測を行うことが重要です。また宇宙再電離 (以下、再電離と呼ぶ) は宇宙空間が中性状態から現在の完全電離状態へ移行した現象を指し、宇宙年齢およそ 2 から 10 億年の頃に起きたと考えられています。その主な電離源は当時存在した銀河だと考えられているため、やはり遠方銀河の性質を理解することは重要です。

私たちの研究グループは ALMA で [OIII] 88  $\mu\text{m}$  を観測する画期的な手法に基づいて、再電離期の銀河の観測的研究を推進しています。日本の研究グループは理論計算に基づいて [OIII] 88  $\mu\text{m}$  輝線が再電離期の銀河の有効な観測手段になることを提唱し [1]、実際に世界に先駆けて再電離期の天体からこの輝線の検出に成功していました [2]。その後、私たちのグループは [OIII] 88  $\mu\text{m}$  の観

測に基づいて、当時の最遠方天体の記録となる赤方偏移9.11（宇宙年齢～5.5億年）の銀河[3]、宇宙最初期にあるにもかかわらず大量のダストを含んだ赤方偏移8.31（宇宙年齢～6億年）の銀河[4]、合体銀河として最遠方記録となる赤方偏移7.15（宇宙年齢～7.5億年）の銀河[5]など、特色ある天体の観測に次々と成功していました。

### 2018年、JWST観測提案の準備の矢先の出来事

話は2018年春に遡りますが、私たちの研究グループは上述した天体の詳しい情報を調べることが目指し、複数のJWST観測提案の準備を進めていました。その矢先にJWSTの打ち上げ延期が決定され、観測提案も募集停止となりました。当時の私は観測提案の作成準備にかけられる時間が増えて、よりよい内容を提案できるぐらいに考えていましたが、楽観的だったようです。

再びJWSTの打ち上げの目処が立ち、GTOの観測ターゲットのリストが更新されると、そこには私たち研究グループの発見した天体[3-5]が追加されていました（注：GTOはJWSTのハードウェアやソフトウェアの開発に携わった方々に、その功績を称えて提供される観測時間）。これは[OIII]88 μm輝線銀河が再電離期の最も特徴的な銀河として高く評価され、GTOターゲットとして人類の知の発展に大きく貢献したことを意味しますから嬉しいことです。しかし私たちはGTOと同様の観測を提案できないので、言わば強力な切り札を封じられる困った状況になりました。いきなり食いつばぐれる危機が訪れ、何か別のアイデアを考える必要がありました。

### 2019-2020年、国際共同研究チームの発足

2019年6月に、国際天文学連合の遠方銀河に関する分科会のシンポジウムがあり、幸いにも私はそこで招待講演をする機会を頂きました。シンポジウムは“Uncovering Early Galaxy Evolution in the ALMA and JWST Era”と題するもので、ALMAがもたらした最新の知見の紹介とJWSTを見据えた将来の議論を目的とするものでした。

私は何かよいアイデアのヒントが得られればと期待して参加したのです。

講演の直後にスペインのJWST GTOグループを含むLuis Colina氏、Javier Álvarez-Márquez氏、Rui Marques-Chaves氏、Daniel Ceverino氏と食事をする機会があり、共同研究の可能性を探り始めました。後日私はスペインのマドリードに滞在して食事と観光を楽しみつつJWST GTOの研究情報を学びました。日本へ帰国した後もメールでやり取りし、2020年1月に共同で観測提案をすることが決まりました。

観測提案の科学内容は方針が見えていましたが（次項）、サンプルの決定にはしばらく悩みました。小さなサンプルでSmall枠（25時間未満）に提案し採択率を高めるか、可能な限りコンプリートなサンプルでMedium枠に挑戦すべきか。最終的に私たちは後者を選択しました。ALMAサイクル6までの段階で[OIII]88 μm輝線で観測された星形成銀河をALMAアーカイブデータも含めて網羅的に調べ、必要に応じて新たな解析を行い、コンプリートなサンプルを構築しました。図1の通りこのような銀河は14天体ありますが、GTOで観測されるのは5天体に留まります。実

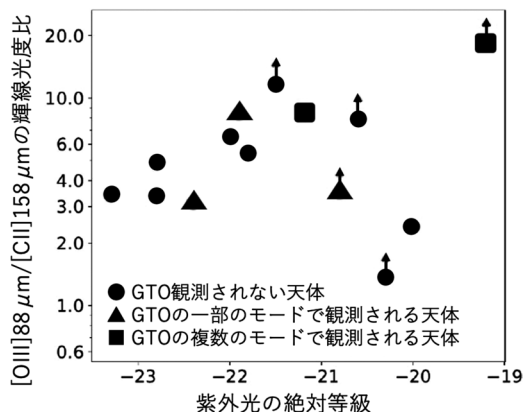


図1 ALMAで発見された[OIII]88 μm星形成銀河の特徴の一例。▲はGTOでNIRCam又はNIRSpecの観測が予定される天体、■はGTOでNIRCam及びNIRSpecの観測が予定される天体を表します。

は詳しく調べると2天体はNIRCamとNIRSpecの両モードでGTOによる観測が行われますが、他3天体は一部のモードでしか観測が行われないことがわかりました。本稿ではサンプルに関する情報は図1のみ紹介しますが、様々な観点から調べると、必ずしもJWST GTOサンプルが [OIII] 88  $\mu\text{m}$  銀河を特徴づけているとは言えないことも明らかになりました。そこで私たちの研究グループは網羅的なサンプルで統計的な議論をすることに活路を見出し、GTOとは相補的な科学的目標を掲げました。この戦略であれば、JWSTの打ち上げ後GTOデータが公開された際、そのデータも自然に含めることができます。次項で述べる通り、科学目標は私たちのグループがALMA [OIII] 88  $\mu\text{m}$  の観測成果から得た様々な興味深い課題の解決を含みます。

最終的に日本からは橋本、井上昭雄氏、田村陽一氏、松尾宏氏、吉田直紀氏、馬渡健氏、Tom Bakx氏の7名が参加し、スペインからはMiguel Pereira-Santaella氏、Santiago Arribas氏も含めた6名が参加し総勢13名のチームを結成しました。日本チームの強みである [OIII] 88  $\mu\text{m}$  銀河のサンプル、スペインチームの強みであるJWSTに関する専門知識に加え、理論研究者の協力も得つつ万全な体制を整えました。

## 研究の内容と今後の展望

前置きが長くなりましたが、ここからは研究計画を簡単に紹介します。図2に例を示す通り、NIRCamは各天体で6枚の広帯域フィルターを用いた撮像観測をします。短い波長を観測する3枚のフィルターは静止系の紫外光を調べます。長い波長を観測する3枚のフィルターは、天体の赤方偏移ごとに注意深く選択されており、各々の天体で4000 Å ブレイクの周辺およびそれ以長/以短の波長を調べます。NIRSpecの面分光モードでは、赤方偏移によりますが、概ね [OII]  $\lambda\lambda 3727, 3729$  から [SII]  $\lambda\lambda 6717, 6731$  輝線までの強い可視光の輝線を天体の場所ごとに空間的に分解して観測します。これらのデータを用いて、以下の内容を含む観測と理論研究を予定しています。

### 課題1：宇宙最初期の星形成

私たちのALMAによる研究成果は、様々な新しい疑問を提起しました。例えば赤方偏移9.11の銀河は、天体静止系の紫外、可視光、遠赤外線データの揃う貴重な天体です [3]。多波長データに基づくスペクトルエネルギー解析によって、この天体が観測時点（宇宙年齢5.5億年）で既に成熟している（恒星年齢3億年程度）ことが明らかになりました。スピッツァー宇宙望遠鏡の撮像

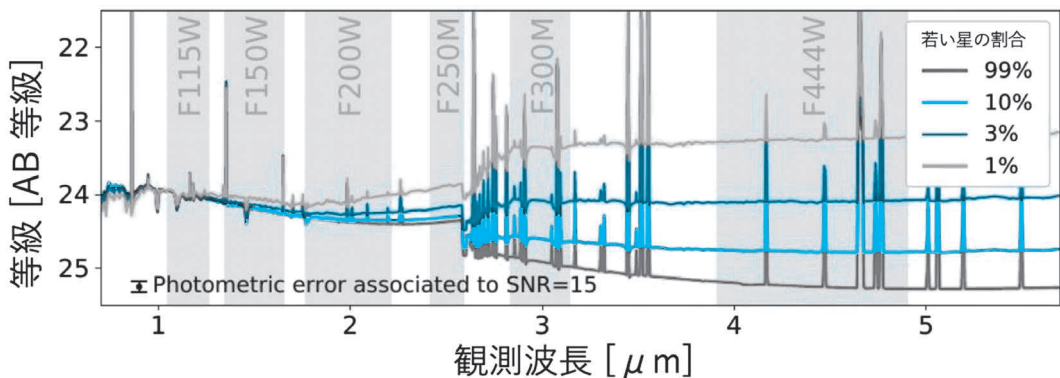


図2 NIRCamの6枚のフィルターセットと銀河のモデルスペクトルの一例。灰色の帯が各フィルターの波長帯を表します。複数のモデル線は、成熟した恒星種族の割合の違いを反映し、図中およそ3–5  $\mu\text{m}$  で連続光等級が明るいモデル線ほどその割合が高くなります。本提案で取得するデータによって、恒星種族を判定できます。

カメラIRACによって調べられる静止系可視光の特徴を詳細に調べたところ、バルマーブレイクと呼ばれる成熟した恒星種族の存在の兆候が見られたのです。これを逆算することで、本天体が宇宙誕生からわずか2.5億年（赤方偏移およそ15）に星形成を開始したことが明らかになりました。さらに、多量のダストが存在する再電離期の銀河も、多波長のデータを整合的に説明するためには、観測時以前に星形成があったことを示唆しています[4, 5].

これらの研究成果は、再電離期の銀河の星形成史が赤方偏移10以上で開始したことを示唆しますが、いくつかの課題が残されています。まずIRACのビームサイズは大きく、天体静止系の可視光を調査できる天体は周囲に隣天体の存在しないものに限られます。またIRACの広帯域フィルターには恒星の連続光に加えて可視光の強い輝線のフラックスが混入するため、正確な議論をするためにはこの寄与を取り除く必要があります。赤方偏移9.11の銀河の例では、偶然この赤方偏移でIRACに強い可視光の輝線が混入しないため、バルマーブレイクの存在を結論づけることができました。しかし通常はこのような議論は困難です。網羅的な議論を行うためにはJWST NIR-Camの高い空間分解能、複数の広帯域フィルターによる正確な可視連続光の測定、さらにNIRSpec面分光による強い輝線の寄与の差し引きが必要です。果たして成熟した恒星種族は遠方銀河で普遍的なのでしょうか。これらは既存の銀河形成モデルの枠組みで説明できるのでしょうか、それとも赤方偏移9.11の銀河のように一筋縄ではいかない[6]のでしょうか。JWSTによって再電離期の銀河を特徴づけることが重要です。

私たちが取得する予定のデータセットは、若い大質量星だけでなく比較的古い恒星の空間分布も高い空間分解能で明らかにし、星間媒質の電離ガスの空間分布と運動の情報をももたらします。これらに加えてALMAで取得されたダストや中

性ガスを含めた銀河の多相にわたる情報と、研究グループの宇宙論的流体シミュレーション[7, 8]と比較することで、再電離期の銀河の化学進化と星間媒質の構造および運動の解明が期待されます。

## 課題2：宇宙最初期の星間媒質

ALMAが明らかにした再電離期の星形成銀河の興味深い特徴として、 $[\text{OIII}]88\ \mu\text{m}/[\text{CII}]158\ \mu\text{m}$ の輝線の光度比が高いことが挙げられます(図1参照)。この光度比は近傍渦巻銀河の典型値よりも1桁高く、近傍の矮小銀河と同程度に高い数値です[9, 10]。高い光度比に注目した日本の研究グループは、光度比を銀河からの電離光子放射に結びつけて議論しています[2]。というのも、酸素を二階電離するエネルギーと炭素を一階電離するエネルギーがそれぞれ35 eV, 11 eVであることを考えると、前者が多く出る状況、例えば若い大質量星が卓越するようなときにこの光度比が高くなるのです。この場合、水素の電離紫外光子(13.6 eV以上のエネルギーを持つ光子)が銀河の星間媒質から外部に漏れ出しやすくなるため、再電離を引き起こしやすくなります。さらに、9天体の銀河サンプルと星雲線モデルに基づいた議論も行われています[10]。高い光度比は、再電離期の銀河の星間媒質の特徴を再電離に結びつける新しい切り口として理論的にも注目されていますが[11]、光度比が星間媒質の様々な物理量に依存する課題も残されていました。決定的な議論に向けて他の輝線を組み合わせることが重要ですが、ALMAを以ってしても再電離期の銀河から $[\text{OIII}]88\ \mu\text{m}$ と $[\text{CII}]158\ \mu\text{m}$ 以外の輝線を検出することは困難です。一方、NIRSpecは一度に多数の可視光輝線を観測できるため、この課題を解決できます。再電離期の銀河の星間媒質はどのように特徴づけられ、それは再電離とどのように関係しているのでしょうか。私たちのNIRSpecの面分光データは、星間媒質の重要なパラメータ(金属量、電子密度、電離パラメータ、ダスト減

光量など)を銀河の場所ごとに空間分解して調べます。幸運なことに [OIII] 88  $\mu\text{m}$  輝線で発見された銀河はいずれも ALMA で [CII] 158  $\mu\text{m}$  輝線も観測されており、さらに地上望遠鏡などの観測から紫外域の水素のライマン $\alpha$ の情報も得られています。天体静止系の紫外、可視光、遠赤外線にわたる多波長の情報はかつてないほど詳細に再電離期の銀河の星間媒質の情報をもたらすことが期待されます。

## 謝 辞

この度は、本特集に記事を執筆させていただく貴重な機会を頂きましてありがとうございました。JWST GO1でMedium枠に採択されるという大変大きな成果をチームとして得られたことが、一番嬉しいことです。素晴らしい共同研究者の皆様がこの場をお借りして感謝申し上げます。また本研究課題は、多数の方々との議論を通して着想を得た点多々あります。これまで研究を通して関わってくださったすべての方に感謝いたします。

## 参考文献

[1] Inoue, A. K., et al. 2014, ApJ, 780L, 18

- [2] Inoue, A. K., et al. 2016, Science, 352, 1559  
 [3] Hashimoto, T., et al. 2018, Nature, 557, 392  
 [4] Tamura, Y., et al. 2019, ApJ, 874, 27  
 [5] Hashimoto, T., et al. 2019, PASJ, 71, 71  
 [6] Binggeli, C., et al. 2019, MNRAS, 489, 3827  
 [7] Moriwaki, K., et al. 2018, MNRAS, 481L, 84  
 [8] Ceverino, D., et al. 2018, MNRAS, 480, 4842  
 [9] Harikane, Y., et al. 2020, ApJ, 896, 93  
 [10] Bakx, T. J. L. C., et al. 2020, MNRAS, 493, 4294  
 [11] Katz, H., et al. 2019, MNRAS, 487, 5902

### ALMA [OIII] 88 $\mu\text{m}$ Emitters. Signpost of the Early Stellar Buildup and Reionization of the Universe

Takuya HASHIMOTO

*University of Tsukuba, 1-1-1 Tennoudai, Tsukuba, Ibaraki 305-8577, Japan*

Abstract: An international team of Japan and Spain is awarded 34-hrs JWST GO1 observation time. This project aims to observe 13 galaxies at redshifts from 6 to 8 using JWST's imaging and integral field spectroscopy modes. All of the targets were discovered by ALMA using [OIII] 88  $\mu\text{m}$ . In this article, we introduce how we came to propose this observation and expected scientific results.