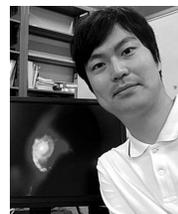


アルマ望遠鏡による宇宙再電離期の銀河の [OIII] 88 μm 輝線観測



橋本拓也

〈筑波大学理工学群物理学類 〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1〉

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

アルマ望遠鏡の登場によって、宇宙再電離期の星形成銀河から [OIII] 88 μm や [CII] 158 μm などの遠赤外線微細構造線、および宇宙塵が放射する連続光の観測が可能となりました。私たちの研究グループは、世界に先駆けて [OIII] 88 μm 輝線を用いた遠方天体の観測を推進してきました。その中で、最遠方銀河 MACS1149-JD1 (当時)、合体銀河として最遠方の天体 B14-65666 (当時)、および宇宙塵を豊富に含む銀河として最遠方の天体 MACS0416-Y1 の発見に成功しました。これらの天体が銀河進化の研究に与えた新しい知見をご紹介します。さらに、[OIII] 88 μm 輝線を強く放射する天体はジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡の観測対象としても選ばれ、現在では多波長データに基づく詳しい性質が明らかになりつつあります。本稿では、その初期成果についても解説いたします。

1. 背景：遠方銀河の観測研究

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いま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2-10億年（赤方偏移にして $z \sim 20-6^{*1}$ ）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を構成する若い大質量星だと考えられているため、再電離の研究においても遠方銀河を理解することは重要です [1]。

分光によって天体までの正確な距離を決めることは、天体の詳細な性質を調べるための第一歩です。分光は銀河の星間媒質を特徴づけるうえで重要な金属量やガスの運動、ガスの密度や温度などを理解するために不可欠です。銀河の形成や進化の研究においては、これらの物理量を過去の時代まで遡ることが重要な課題となっています。また、分光学的な性質を再電離の文脈に位置づけることも重要です。本稿に関連した天文月報記事は複数あるため、ここでは当該分野のおよそ10年を簡単に振り返ってみようと思います。より詳細な、あるいは専門的な内容は、関連した天文月報記事 [2-4] をご参照ください。

*¹ 赤方偏移 (z) は宇宙論的な距離の指標で、光行距離や宇宙年齢と一対一に対応し、大きな数字ほど遠方すなわち過去を表す。電磁波の波長は $(1+z)$ 倍に引き伸ばされて観測される。赤方偏移に対応する光行距離もしくは宇宙年齢は、宇宙論パラメータに依存する。ここでは、 Λ CDMモデルを仮定し、 $\Omega_m=0.272$, $\Omega_b=0.045$, $\Omega_\Lambda=0.728$ および $H_0=70.4 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ を採用する。

2. アルマ望遠鏡による [OIII] 88 μm 輝線観測の歴史

アルマ望遠鏡が運用を開始して間もないころ、一階電離した炭素イオンの輝線 ([CII] 158 μm) を用いた遠方銀河の観測が注目されていました。一方で、日本の研究者は二階電離した酸素イオンの輝線 ([OIII] 88 μm) を用いた遠方銀河の観測を提唱します。2014年、井上昭雄氏（早稲田大学）らは、宇宙論的流体シミュレーションにもとづく銀河形成モデルに、光電離計算ソフト CLOUDY [5] にもとづく星雲輝線モデルを取り入れて、[OIII] 88 μm を含む様々な遠赤外域の輝線光度を予測しました [6]。この結果、遠方銀河においては [OIII] 88 μm が明るく、アルマ望遠鏡の感度であれば $z > 8$ の天体の分光も可能である、という理論予測を立てました（図1左）。この予測を支持する観測データもありました。実は、近傍宇宙にありながら遠方銀河に似た性質（例えば恒星質量が軽く、金属量が低い）を持つ天体を詳しく調べると、[OIII] 88 μm は [CII] 158 μm に比べて典型的に2倍も大きな光度をもつことがわかっていました [7]。

2.1 SXDF-NB1006-2：[OIII] の初検出

2016年、井上氏らは $z=7.21$ の銀河 SXDF-NB1006-2 を対象にアルマ望遠鏡の観測を行いました [2, 8]。本天体は事前に水素のライマンアルファ ($\text{Ly}\alpha$) 輝線が検出されており、当時の最遠方銀河の一つでした [9]。このため、アルマ望遠鏡で観測するべき周波数が明確に分かっており、[OIII] 88 μm 輝線の観測の有効性を検証するうえで最良の天体だったのです。結果、初めて再電離期の銀河から [OIII] 88 μm 輝線の分光検出に成功しました（図1右）。アルマ望遠鏡による [OIII] 88 μm 輝線の観測の幕開けです。本天体は [CII] 158 μm 輝線の観測も行われました。組み合わせることで [OIII] 88 μm が [CII] 158 μm に比べて高い光度を持つ、すなわち [OIII] 88 μm 輝線が再電離期の銀河の分光において強力な手段となりうることを初めて示していました。また、[OIII] 88 μm 輝線のスペクトルを詳しく調べると、ガス運動の兆候が見られたことも重要な成果です。当時、まだ再電離期の銀河のガス運動はほとんど調べられていませんでした。最近では、任毅氏（早稲田大学）らによって詳細な解析が行われ、高い輝線光度比やガス運動が追認されています [10]。

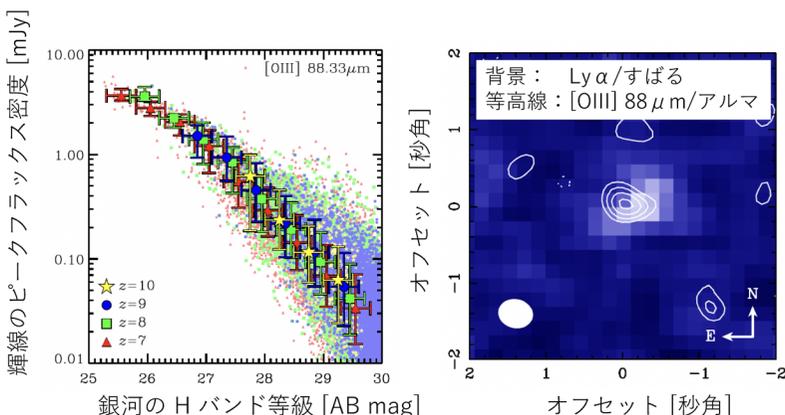


図1 (左) [OIII] 88 μm 輝線のピークフラックス密度の予想 [6]。 $z=7$ を超える遠方銀河において、天体の H バンド等級（天体静止系で紫外光に相当）が明るければ、その [OIII] 88 μm 輝線はアルマ望遠鏡で十分に検出できることが予測されていた。（右）再電離期で最初の [OIII] 88 μm 輝線の検出 [8]。背景の画像は、すばる望遠鏡で取得されていた水素のライマンアルファ ($\text{Ly}\alpha$) 輝線の空間分布。等高線はアルマ望遠鏡で取得された [OIII] 88 μm 輝線の分布。

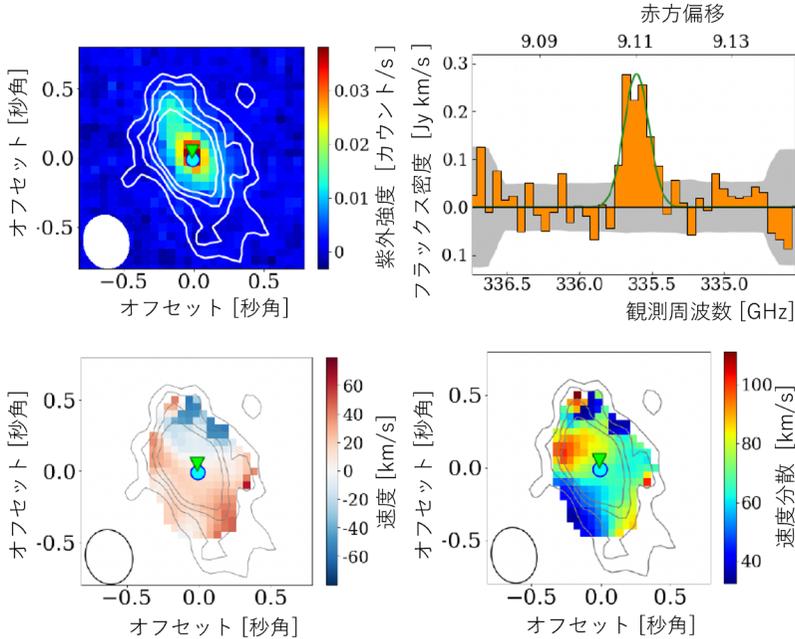


図2 MACS1149-JD1の [OIII] 88 μm 輝線 [13]. (左上) 背景の画像はハッブル宇宙望遠鏡で取得された、大質量星の空間分布. 等高線はアルマ望遠鏡による [OIII] 分布. 左下の楕円はビームサイズ. (右上) [OIII] 88 μm 輝線スペクトル. 赤方偏移 $z=9.11$ に同定された. (下) 高分解能観測によって明らかにされた、[OIII] の速度図および速度分散図.

2.2 MACS1149-JD1：アルマ望遠鏡による最遠方銀河の観測

2018年、私たちは重力レンズ効果を強く（増光率 ~ 10 ）受けたライムブレイク銀河の候補をアルマ望遠鏡で観測しました。本天体は、事前に正確な赤方偏移が分かっておらず、ハッブル宇宙望遠鏡とスピッツァー宇宙望遠鏡の撮像データから、測光赤方偏移 $z_{\text{ph}}=9.0-9.8^{*2}$ がわかっていました [11]。アルマ望遠鏡はその設計上、広帯域の観測は得意としておらず、測光赤方偏移の不定性ゆえに [OIII] 88 μm 輝線が観測帯域から外れてしまう可能性があります。そこで私たちは、アルマ望遠鏡の周波数チューニングを複数設定することで、不定性をカバーしました。現在このような観

測は一般的ですが、当時はこのような観測自体が希少でした。この結果、当時最遠方となる $z=9.11$ の銀河の分光に成功しています [12]。これは初めてアルマ望遠鏡が最遠方銀河の記録を樹立した成果です。今後、アルマ望遠鏡は観測帯域を広げることを目指しています。これが実現すれば、少ない数のチューニングで赤方偏移の不定性をカバーできるため、観測効率の向上につながるでしょう。

2022年、私たちは高分解能の観測成果も報告しています (図2)。重力レンズ効果も併せ、物理スケール300 pcに達するデータを構築しました [13]。本天体の [OIII] 88 μm 輝線を調べると、速度構造を持つことが明らかになりました (図2下)。私たちは、徳岡剛史氏 (早稲田大学) が中

*2 観測提案の当初は、 $z_{\text{ph}}=9.2-10.0$ をカバーするような観測設計でした。しかし、観測の直前になり測光赤方偏移がやや下方修正され、改めて $z_{\text{ph}}=9.0-9.8$ をカバーするように変更しました。正しい赤方偏移は9.11でしたので、この変更がなければ本成果は実現していませんでした。示唆に富むお話でした。

心となって開発した薄い力学円盤モデルとアルマ望遠鏡の干渉計データを比較する手法を用いることで、本天体の速度構造の起源は銀河回転であるという可能性を示しました。重力レンズ効果とアルマ望遠鏡の組み合わせで実現する高空間分解能の観測によって、遠方銀河の形態・運動学が可能であることを示す好例です。また、本天体は前述の2018年のデータを組み合わせても、宇宙塵（ダスト）の連続光放射は検出されていません。恒星質量とダストの質量比は $\log(M_d/M_*) < -4(3\sigma)$ となり [12, 13]、近傍銀河で得られている典型的な質量比 [14] $\log(M_d/M_*) \sim -3$ と比べて低く、本天体が化学進化の観点で成熟していないことを示唆しています。最近、欧米のグループによってジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡 (JWST) を用いた観測も行われ、重元素量やダスト減光量が測定されました。本天体が化学進化の観点で成熟していないことと無矛盾な成果が得られています [15]。

2.3 B14-65666：大三元

2019年、私たちは明るいライマンブレイク銀河に対する [OIII] 88 μm と [CII] 158 μm 輝線の観測を行いました。本天体は事前に $z \sim 7.2$ に Ly α 輝線が検出されており、当時代では極めて明るいライマンブレイク銀河の一つです [16, 17]。結果、両輝線に加えて静止系 90 μm および 160 μm 付近のダストの連続光放射も検出されました (図3左)。上記の三種のプローブを検出した初めての例で、我々はこれを讃えて本天体を「大三元」と名付けました [3, 18]。さらに、アルマ望遠鏡のデータを詳細に解析することで、本天体は合体途中の2つの銀河であることが明らかになり、これは当時の最遠方の合体銀河として貴重なデータを提供しています。ダスト温度などを仮定すると、ダストと恒星の質量比は $\log(M_d/M_*) \sim -2$ という高い値が得られました。本成果と後述の MACS0416-Y1 は、宇宙初期でも豊富なダストを含む銀河が存在することを明確に示した重要な例です。

また、本研究 [17] では初めて統計的に再電離期の銀河の [OIII]/[CII] 光度比を調べ、遠方銀河の多くで [OIII] 88 μm 輝線が卓越していることを示しました。その他、再電離期の銀河のデータを収集し、銀河のダスト減光曲線や再電離に関連した統計的な議論をしています。詳細は天文月報記事をご覧ください [3]。

2.4 MACS0416-Y1

2019年、田村陽一氏 (名古屋大学) らは重力レンズ効果を受けた $z \sim 8$ 銀河の候補をアルマ望遠鏡で観測しました。本天体も、事前に赤方偏移がわかっていなかった天体です。結果、 $z = 8.31$ に [OIII] 88 μm 輝線が検出されました。本天体では 90 μm 付近でダストの連続光も検出されていません (図3右上)。距離が精度良く決まった天体としては、現在でも最遠方の宇宙塵の検出例です [19]。

本天体もアルマ望遠鏡を用いてさまざまな追観測が進められています。2020年、Tom Bakx 氏 (チャルマース工科大学) が中心となり [CII] 158 μm 輝線の検出も報告しました [20] (図3右下)。興味深いことに、静止系波長 160 μm 付近のダスト連続光は検出されておらず、前述の 90 μm 付近のダスト連続光の検出と組み合わせることで、本天体は極めて高いダスト温度 ($T_d > 80 \text{ K}$) が示唆されています。ダスト温度の不定性はダスト質量の不定性に直結するため、近年、遠方天体のダスト温度の決定は重要な課題となっています。今後、ダスト温度の決定精度を向上させるためには、スペクトルエネルギー分布のピーク付近のデータを取得する必要があります。このためには、短波長すなわち高周波数 (Band 9 や Band 10 受信機など) の観測が鍵となりそうです。

2023年には、高空間分解能観測の成果も報告されています。田村氏は、アーカイヴデータも含めた本天体のアルマ望遠鏡データを網羅的に解析し、重力レンズ効果も併せ、物理スケールにして 300 pc という高い分解能のデータを構築しています [21]。結果、若い大質量星とダストの空間分

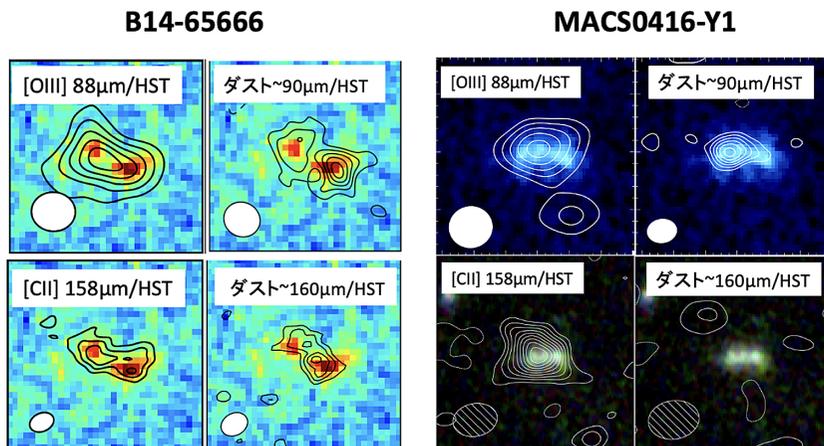


図3 B14-65666上は [OIII] 88 μm とその周辺のダスト連続光, 下は [CII] 158 μm とその周辺のダスト連続光の空間分布 [18]. いずれも, 背景の画像はハッブル宇宙望遠鏡 (HST) によって得られた大質量星の空間分布を表し, 等高線がアルマ望遠鏡で得られた各種放射の分布. 左下の楕円はビームサイズ. MACS0416-Y1 同上 [19, 20].

布はお互いに分離するように存在していることが明らかになりました. また, [OIII] 88 μm 輝線の位置-速度図によると, 電離ガスは明確な速度構造は持たず, むしろ荒々しくガスのランダム運動が卓越している様子も明らかになりました.

3. 強い [OIII] 88 μm 輝線の起源: 近傍銀河からの示唆

アルマ望遠鏡によって明らかにされた遠方銀河の特徴の一つは, [OIII]/[CII] 光度比が高いことです. この謎を調べるべく, 浦遼太氏 (筑波大学) を中心として, 私たちはハーシェル宇宙望遠鏡やソフィア望遠鏡によって取得された近傍銀河のデータを集めました. 近傍銀河は遠方銀河と比べて見かけ上明るく, 輝線の観測も比較的に容易であるため, 様々な輝線の情報が得られているのです. 輝線光度比と銀河の物理量との相関を調べた結果, 強い [OIII] 88 μm 輝線を放射する天体の特徴は, (i) 星間媒質のガス電離パラメータが高い, (ii) 星間媒質の中性ガスの被覆率が低い, (iii) 単位星質量あたりの星形成率 (比星形成率) が高い, (iv) ダストの温度が高い, (v) 金属量が低いことを統計的に示しました [22] (図4).

近傍銀河を調べる利点の一つは, 再電離を理解するうえで大切な電離紫外光子 (LyC: 912 \AA 以下) の脱出率 (f_{esc}) と関連づけた議論ができることです. 近傍銀河では, f_{esc} と可視光の [OIII] 5008 \AA /[OII] 3727 \AA 輝線比 (O_{32}) との間に相関が知られていました [23]. 私たちは O_{32} と遠赤外線 [OIII]/[CII] 比の相関を明らかにしたので, 二つの相関を組み合わせることで, f_{esc} と遠赤外線 [OIII]/[CII] 比を結びつけることに成功しました. この関係が遠方銀河でも適用できると仮定すれば, アルマ望遠鏡で発見された [OIII] 88 μm が卓越する銀河は $f_{\text{esc}} \sim 10\%$ となり, 再電離に貢献したことが示唆されます.

4. 最近の動向: ALMA+JWST

私たちの研究グループは, ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡 (JWST) の第一期観測で, アルマ望遠鏡によって発見された [OIII] 88 μm 輝線銀河 12 天体の観測を行っています (提案番号: GO1840). その詳細は天文月報記事 [4] に委ねますが, 本稿では既に出版された最初期の成果を1件ご紹介します.

銀河団 Abell2744 の背後には, 20 天体を超える多

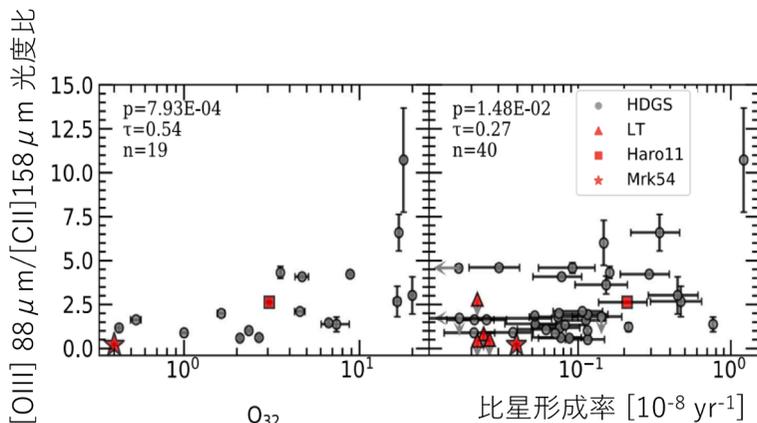


図4 ハーシェル宇宙望遠鏡とソフィア望遠鏡で観測された近傍銀河のデータ [22]. 遠赤外線線の [OIII] 88 μm/[CII] 158 μm光度比に対して、可視光の [OIII] 5008 Å/[OII] 3727 Å輝線比 (O_{32}) と比星形成率の相関を調べた例。統計的な有意度を調べるため、統計的手法であるスピアマンの順位相関の係数 τ および p -値が図中に書かれている。 τ が正であり、かつ p -値が有意水準0.05を下回っているため、両者の物理量の間には正の相関がある。論文では他の物理量との相関も調べている。

数の $z \sim 7-9$ 銀河候補の存在が知られていました。その中には“quintet領域”と呼ばれる領域があります。この領域では、一片が天の川銀河の半径のさらに半分程度という小さな領域において、5つの銀河候補が密集しています。私たちのJWST観測によって、この領域から4天体の銀河が $z=7.9$ に同定されました(図5左)。また、私たちの観測以前には、同領域の周辺でも $z=7.9$ に同定された天体が報告されています。以上の成果は、“quintet領域”が最遠方の原始銀河団の中でも特に天体の数密度が高いコア領域であることを意味しています [24]。

さらに興味深いことに、アルマ望遠鏡によってコア領域に属する4天体中3天体からダスト放射が認められました(図5右)。これは、原始銀河団に属するメンバー銀河からダスト検出に成功した最遠方の例です。コア領域に属する天体がダストを豊富に含むことは、天体のスペクトルエネルギー分布からも支持されています。というのも、当時の典型的な遠方銀河に比べて、コア領域に属する天体は赤い紫外線の傾きを示し、ダストが豊富に含まれていることを示唆しているのです。私たちは、コア領域で銀河が急速に成長しているこ

とを示す成果だと解釈しています。このように、JWSTとアルマ望遠鏡のデータを組み合わせることで、新しい研究の展開を見せています。現在、本プロジェクトからは7本以上の論文を投稿準備中です。今後のさらなる発展が期待されます。

5. ま と め

およそ10年間、アルマ望遠鏡を用いた [OIII] 88 μm輝線の研究は厚みを持って展開してきました。2014年の理論予想から始まった一連の研究は、その後 [OIII] 88 μmが遠方銀河において明るく、強力な分光手段になることを観測的に示しました。また、アルマの高い空間分解能と重力レンズ効果を組み合わせることで、かつてないほどに遠方銀河の詳しい構造や運動が明らかになりました。[OIII] 以外のトレーサーにも目を向けると、[OIII] 88 μmと [CII] 158 μmの光度比は、これまで困難であった再電離期の星間媒質の研究を開拓しました。輝線光度比の解釈においては、遠方銀河だけでなく近傍銀河のデータをも駆使した研究が展開されています。さらに、アルマ望遠鏡によって遠方銀河においても大量のダストを含む天

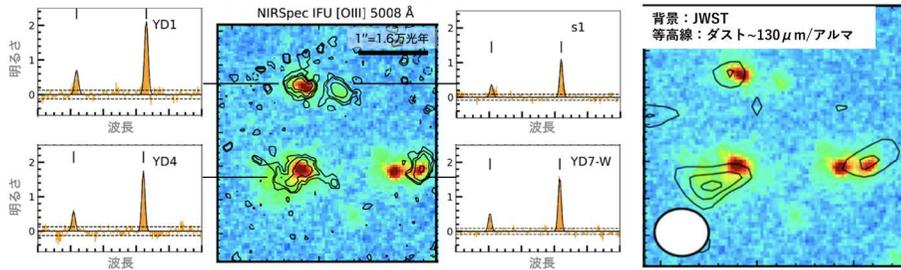


図5 (左) ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡のNIRSpectという装置の面分光モードで取得したデータ。背景の画像はコア領域の撮像データ。等高線は可視光の [OIII] 輝線の分布。4天体が検出されており、対応するスペクトルも掲載している。いずれの天体も $z=7.9$ に同定された。(右) 背景の画像はコア領域の撮像データ。等高線はアルマ望遠鏡によって検出されたダスト連続光の分布。

体が存在することが明らかになり、化学進化の議論も行われ始めています。直近では、JWSTとアルマ望遠鏡のタッグによる多波長の遠方銀河の観測がいよいよ現実的になっています。

これらの研究の中には、順当な研究の展開もあれば、予想外な方向での展開も含まれているように感じます。次の10年間、現時点では予想もつかないような新しい進展があること、そして新たな人材が育っていくことを期待しつつ、本稿を締めくくります。

謝辞

このような記事を執筆する機会をいただいた甘日出文洋さん、本記事の校正に関わってくださった天文月報編集委員の宮本祐介さんと川中宣太さんに感謝いたします。本研究は数多くの方々のご協力によって成し遂げられました。本研究へ関わってくださったすべての方々に感謝いたします。また、本記事の執筆中、南米チリでアルマ望遠鏡10周年記念の研究会へ参加し、直後にアルマ望遠鏡のサイトへ訪問する機会をいただきました。初めて自分の目でアルマ望遠鏡やそこで働く人々を見ることができたこと、大変貴重な機会となりました。この場

をお借りして、本企画を考案および引率して下さった Alvaro Gonzalez さん、甘日出さん、泉拓磨さん、斉藤俊貴さんに感謝いたします。

参考文献

- [1] B. Robertson 2022, ARA&A, 60, 121
- [2] 井上昭雄, 天文月報, 110, 274
- [3] 橋本拓也, 天文月報, 115, 756
- [4] 橋本拓也, 天文月報, 115, 89
- [5] Ferland, G., et al. 2013, RMxAA, 49, 137
- [6] Inoue, A., et al., 2014, ApJL, 780, 18
- [7] Madden, S., et al. 2013, PASP, 125, 600
- [8] Inoue, A., et al., 2016, Science, 352, 1559
- [9] Shibuya, T., et al., 2012, ApJ, 752, 114
- [10] Ren, W. Y., et al., 2023, ApJ, 945, 69
- [11] Zheng, W., et al., 2012, Nature, 489, 406
- [12] Hashimoto, T., et al., 2018, Nature, 557, 392
- [13] Tokuoka, T., et al., 2022, ApJL, 933, 19
- [14] Remy-Ruyer, A., et al., 2015, A&A, 582, 121
- [15] Stiavelli, M., et al. 2023, ApJL, 957, 18
- [16] Bowler, R., et al., 2014, MNRAS, 440, 2810
- [17] Furusawa, H., et al., 2016, ApJ, 822, 46
- [18] Hashimoto, T., et al., 2019, PASJ, 71, 71
- [19] Tamura, Y., et al., 2019, ApJ, 874, 27
- [20] Bakx, T., et al., 2020, MNRAS, 493, 4294
- [21] Tamura, Y., et al., 2023, ApJ, 952, 9
- [22] Ura, R., et al., 2023, ApJ, 948, 3
- [23] Chisholm, J., et al., 2023, A&A, 616, 30
- [24] Hashimoto, T., et al., 2023, ApJL, 955, 2

ALMA Observations of [OIII] 88 μm Emission Lines from Galaxies in the Epoch of Reionization

Takuya HASHIMOTO

Division of Physics, Faculty of Pure and Applied Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki 305-8571, Japan

Abstract: With the advent of ALMA, it has become possible to observe far-infrared fine structure lines such as [OIII] 88 μm , [CII] 158 μm , as well as dust continuum emission from star-forming galaxies in the epoch of reionization. Our research group has been leading observations of distant objects using the [OIII] 88 μm emission lines. We succeeded in discovering the most distant galaxy MACS1149-JD1 (at that time), the most distant merging galaxy B14-65666 (at that time), and the most distant galaxy MACS0416-Y1 with dust continuum detection. We present what new insights were provided into the study of galaxy evolution. Furthermore, [OIII] 88 μm emitters are now targeted with the James Webb Space Telescope (JWST), and their multi-wavelength properties are also revealed. We also discuss the initial results of these observations with JWST.