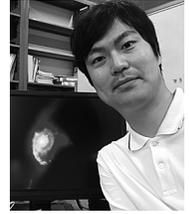


# 大三元—遠方銀河からの酸素，炭素， 宇宙塵の放射を捉えた



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

アルマを用いて、宇宙再電離期の星形成銀河から [OIII] 88  $\mu\text{m}$ , [CII] 158  $\mu\text{m}$ , および宇宙塵が放射する連続光の3つのプローブすべての検出に初めて成功しました。アルマの高い分解能と輝線速度の情報を用いて、本天体が観測史上最遠となる赤方偏移7.15（宇宙年齢約7.5億年）の合体銀河であることを明らかにしました。本稿では、再電離期にあるこの特徴的な銀河の詳しい紹介に加えて、再電離期の銀河の観測データを網羅することで明らかになった i) 強烈な [OIII] 88  $\mu\text{m}$  放射, ii) ダスト減光則, iii) Ly $\alpha$  の銀河からの脱出への知見とそれらの意義をお伝えします。

## 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、やはり遠方銀河の性質を理解することは重要です。

遠方銀河の観測方法は大きく分けて二種類あり

ます。一つは撮像観測と呼ばれ、いわば巨大なデジカメを用いて特定の波長域の積分光を観測するものです。すばるを含む8-10 m級の地上大型光学望遠鏡やハッブル宇宙望遠鏡（HST）によって、可視域から近赤外域の撮像観測が精力的に行われ、遠方銀河の観測は大きく進展しています。特に、天体静止系の紫外光にできる特徴的な段差（ライマンブレイク<sup>\*2</sup>）を目印に、宇宙年齢10億年未満（ $z > 6$ ）の天体候補が多数発見されています。

もう一つの方法は、天体の波長ごとに強度を調べる分光観測です。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。実は、撮像観測によって発見された候補天体の多くは分光されておらず、大部分が候補のまま残されています。また、分光は

<sup>\*1</sup> 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、 $\Lambda$  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。

<sup>\*2</sup> 波長 912 Å より短波長の光子は、銀河内にある中性水素ガスの光電離に使われる。遠方銀河の場合、銀河間空間にわずかに漂っている中性水素ガスの影響で、波長 1216 Å (Ly $\alpha$ ) より短波長の光子も散乱および吸収されてしまう。結局、遠方銀河は  $(1+z) \times 1216 \text{ Å}$  よりも短波長で急激に暗くなり、これをライマン ( $\alpha$ ) ブレイクと呼ぶ。また、この手法で選択された銀河をライマンブレイク銀河と呼ぶ。

銀河の星間媒質を特徴づける上で重要な金属量<sup>\*3</sup>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。

遠方銀河の分光観測が難しい第一の理由は、天体が遠いため、観測される輝線のフラックスが低くなることです。もう一つ重要な理由があります。従来、ライマンブレイク銀河の分光観測においては、水素のライマン $\alpha$ 線 ( $\text{Ly}\alpha$ : 1216 Å) が効果的なプローブとして活用されてきました。ところが、再電離の完了以前の時期 ( $z \geq 6$ ) に遡るにつれ、銀河間空間にある中性水素ガス量の割合が増えていくため、 $\text{Ly}\alpha$ 光子は観測者に到達するまでに多重散乱されてしまい、観測が困難になっていくのです。これ自体が宇宙物理学において重要な成果であり、実際に $\text{Ly}\alpha$ を用いて再電離現象の完了時期が推定されています。しかし、分光なしには天体の正確な距離がわからないため、再電離期の銀河の新しい分光手段が決定的に重要でした。

そこで大きな期待を集めたのが、2011年に南米チリで運用を開始したアタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計 (アルマ) です。光学望遠鏡に比べて長い波長帯の観測が可能で、 $z \approx 6-7$ の銀河においては、天体静止系の遠赤外線域 (おおむね  $50 \mu\text{m}$  から数  $100 \mu\text{m}$ ) を高い感度および解像度で観測できます。アルマが稼働した当初、再電離期の銀河の研究で特に注目されていたのは、一階電離した炭素イオンの輝線 ( $[\text{CII}] 158 \mu\text{m}$ ) です。この輝線は星間媒質の重要な冷却輝線として

働き、近傍渦巻銀河などの研究から、遠赤外域の輝線の中で最も明るいことがわかっていたのです。実際、アルマの登場以前から、遠方宇宙にあるサブミリ波銀河やキューサー<sup>\*4</sup>など明るい天体の観測において、この輝線は実績を収めていました (e.g., [1])。

しかし、アルマの感度をもってしても、遠方 ( $z \sim 5-6$ ) のライマンブレイク銀河で  $[\text{CII}] 158 \mu\text{m}$  の観測が現実的となったのは2015年頃でした [2]。一部の研究では、再電離期の銀河では  $[\text{CII}] 158 \mu\text{m}$  の輝線光度が予想に比べて暗いという報告もあり [3]、当時はまだ  $[\text{CII}] 158 \mu\text{m}$  輝線が本当に遠方のライマンブレイク銀河のよい分光手段であるか、十分にはわかっていない状況でした<sup>\*5</sup>。

このような混沌とした時代において、日本の研究者は新しい遠方銀河の観測方法として二階電離した酸素イオンの輝線 ( $[\text{OIII}] 88 \mu\text{m}$ ) を提唱します。2014年、井上昭雄氏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 [4] にもとづく星雲輝線モデルを取り入れて、 $[\text{OIII}] 88 \mu\text{m}$  を含む様々な遠赤外域の輝線光度を予測しました [5]。この結果、遠方銀河においては  $[\text{OIII}] 88 \mu\text{m}$  が極めて明るく、アルマの感度であれば  $z > 8$  の天体の分光も可能である、という野心的な理論予測を立てました<sup>\*6</sup>。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、 $[\text{OIII}] 88 \mu\text{m}$  は  $[\text{CII}] 158 \mu\text{m}$  に比べて典型的に2倍程度、場

<sup>\*3</sup> 天文学では、リチウムより重い元素のことを指す。

<sup>\*4</sup> サブミリ波銀河は、爆発的な星形成活動をしている遠方天体で、ダストが多量に生成されている。紫外および可視域の光子はダストに吸収されやすいため、これらの波長では暗い一方で、ダストの熱放射のため天体静止系の赤外域で明るい。キューサー母銀河は、その中心に活動性の高い超巨大ブラックホールを宿している銀河である。サブミリ波銀河と同様にダストが多量に生成されているため、赤外域でも明るい。

<sup>\*5</sup> 現在では、アルマの二つの大規模観測プロジェクトである ALPINE (PI: O. Le Fevre) および REBELS (PI: R. Bouwens) によって、 $[\text{CII}] 158 \mu\text{m}$  輝線は遠方銀河を観測する上で極めて有効であることが再確認されている。

<sup>\*6</sup> 論文のタイトルは“ALMA Will Determine the Spectroscopic Redshift  $z > 8$  with FIR  $[\text{OIII}]$  Emission Lines”。この理論研究に至るまでの井上昭雄氏と松尾宏氏らとの詳しいやり取りは、天文月報2017年4月号を参照されたい [6]。

合によっては10倍も明るいことがわかっていたのです [7].

このような背景の中で、2016年に井上氏らは再電離期に相当する  $z=7.21$  の銀河で初めて [OIII] 88  $\mu\text{m}$  輝線の分光検出に成功しました [8]. その後、2018年から2019年にかけて、私たちは [OIII] 88  $\mu\text{m}$  輝線を用いて当時最遠方となる  $z=9.11$  の銀河の分光 [9] や、宇宙塵（ダスト）\*7 が検出された天体として最遠方銀河の一つとなる  $z=8.31$  の銀河の分光 [10] に成功していました. 本研究は、[OIII] 88  $\mu\text{m}$  輝線とアルマの強力な組み合わせによる一連のプロジェクトの一つとして位置づけられます.

## 2. ターゲット天体の研究の歴史

本研究の観測ターゲットは、イギリスの R. Bowler 氏らのグループが発見した B14-65666 という天体です. 2014年に、近赤外域での広視野観測を得意とする VISTA 望遠鏡によって、 $z\sim 7$  のライマンブレイク銀河候補として発見されました [11]. この天体の特徴は、天体静止系の紫外光で極めて明るい点です. 図1は  $z\sim 7$  の時代における紫外光度関数で、この天体は当時の銀河の典型的な紫外光度に比べ3-4倍も明るいことがわかっていました.

この天体の分光に最初に成功したのは、古澤久徳氏らでした. 2016年、すばる望遠鏡に搭載された FOCAS という可視分光装置を用いて、水素の Ly $\alpha$  輝線の検出に成功し、 $z=7.168$  であることを示したのです [12]. Ly $\alpha$  放射の相対強度（静止系等価幅）は  $3.7\pm 0.7\%$  と小さい数値でした.

2017年、Bowler 氏らは HST の近赤外カメラ WFC3 に搭載された F140W フィルターを使い、高い解像度でこの天体を観測しました [13]. 図2に示すとおり、本天体は紫外光で明るい2つの領域が2-4 kpc 程度離れて存在していることが明らかになり、一つの可能性として合体銀河という解

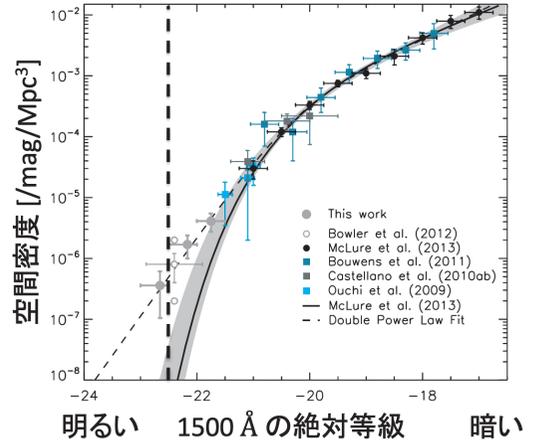


図1  $z\sim 7$  の銀河の紫外光度関数 [11]. 1500  $\text{\AA}$  における絶対等級と空間密度の関係. 破線は本天体の紫外等級  $M_{UV} = -22.4$  AB mag を表す.

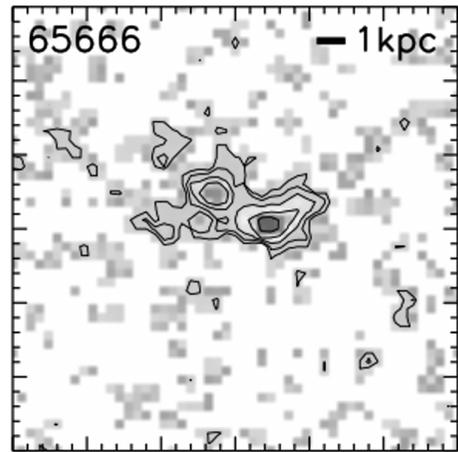


図2 HST F140W フィルターによって取得された本天体の天体静止系紫外光の様子 [13]. 色の濃い領域で放射が強い.

釈が提示されました. しかし、距離の違う天体がたまたま視線上で近接している可能性は排除できませんでした. これをさらに検証するためには、高い解像度でスペクトルを取得する必要があります.

その後2018年、Bowler 氏らはアルマ望遠鏡のサイクル4観測で本天体から放射される宇宙塵

\*7 1  $\mu\text{m}$  程度の大きさの固体微粒子を指す. 星などが発する光を吸収および散乱し、赤外線でも熱的な再放射をする.

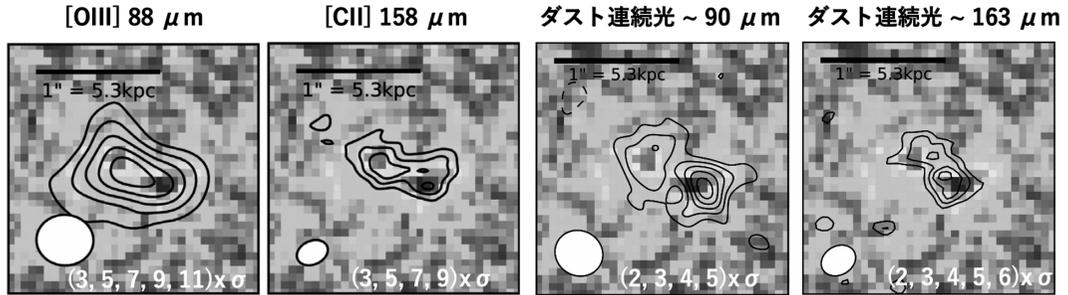


図3 左から [OIII] 88  $\mu\text{m}$  および [CII] 158  $\mu\text{m}$  の積分強度図, 90  $\mu\text{m}$  および 163  $\mu\text{m}$  付近のダスト連続光の分布図 (等高線) [17]. 背景の画像は HST F140W フィルターの画像. いずれも天体を中心に  $2''.0 \times 2''.0$  の領域を切り出しており, 左下の楕円はビームサイズを表す. 図中の数値は, 外側から内側にかけての各等高線の有意水準を表す.

(以下ダスト) の熱放射を検出しています [14]. 当時, 再電離期の銀河にダストがあるかどうかは重要な課題となっており,  $z > 7$  ではわずか 2 天体の検出例しかありませんでした [15, 16]. このように, 本天体の重要性はさらに増していきました.

### 3. アルマ観測—大三元

私たちの研究グループは, アルマのサイクル 4 で本天体を観測ターゲットとしました (PI: 井上昭雄). バンド 6 (8) でそれぞれ [CII] 158  $\mu\text{m}$  ([OIII] 88  $\mu\text{m}$ ) およびその周辺のダスト連続光を観測しました<sup>\*8</sup>. [CII] 158  $\mu\text{m}$  ([OIII] 88  $\mu\text{m}$ ) データのビームサイズは  $0''.3 \times 0''.2$  ( $0''.4 \times 0''.3$ ) でした. これに加えてサイクル 5 では, バンド 8 における深い [OIII] 88  $\mu\text{m}$  観測が実行されました (PI: 井上昭雄). 観測の総積分時間はバンド 6 (8) で 114 (282) 分でした. このように, 比較的によい解像度かつ感度の高いデータを入手できたことが, 後述する大きな研究成果につながりました.

#### 3.1 大三元

図3は本天体から検出した [OIII] 88  $\mu\text{m}$  および [CII] 158  $\mu\text{m}$  輝線の積分強度図および周辺の波長で検出したダスト連続光の空間分布図です [17].

電離領域 (HII 領域) および中性領域をトレースする [OIII] 88  $\mu\text{m}$  と [CII] 158  $\mu\text{m}$ , そしてより複雑な化学進化の帰結であるダストの三種類の放射を高い有意水準で検出することに成功しています. 遠方銀河でこれら三種類を同時に検出した最初の例であるため, 私たちはこの天体を「大三元」と命名しました. これは当時最遠方の [CII] 158  $\mu\text{m}$  輝線の検出, 星形成銀河としては 3 例目のダスト連続光の検出でもありました. さらに注目すべき点は, これらの放射を空間分解している点です.

#### 3.2 最遠方の銀河合体

本天体を HST の高い解像度で見ると, 紫外連続光が 2 つの大きな領域 (クランプ) に分離されることを述べました (図 2). [CII] 158  $\mu\text{m}$  の輝線データは特に高い解像度であるため, 天体の場所ごとにスペクトルを調べることで, 詳しい運動の様子を調べることができます. このようにして作成したスペクトル (図 4) は, 2 つのクランプがともに  $z = 7.15$  (宇宙年齢およそ 7.5 億年) に存在し, 互いにおよそ  $200 \text{ km s}^{-1}$  異なる運動速度を持つことを明らかにしています. 2 章で述べていた, 距離の全く異なる 2 天体がたまたま視線方

<sup>\*8</sup> アルマでは, 観測可能な 35–950 GHz という周波数帯を十分割し, 周波数の低い側からバンド 1, 2, ..., 10 と呼んでいる. バンド 1 および 2 はまだ共同利用には提供されていない.

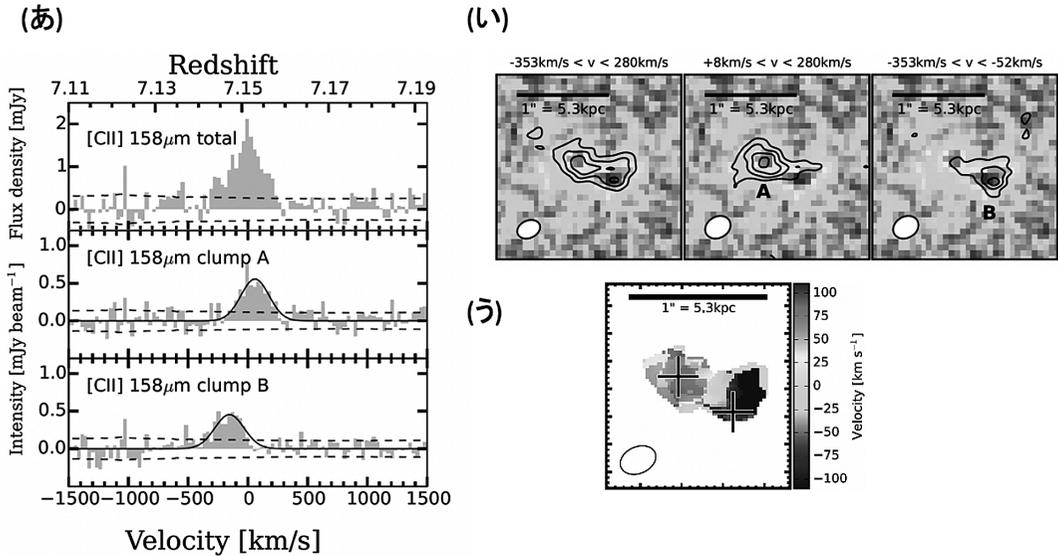


図4 [CII] 158  $\mu\text{m}$  のスペクトルと積分強度図の詳しい様子 [17]. (i) は図3と同様に、背景画像として HST F140W フィルターの画像を使っている. 左の積分強度図は系全体に対応し、赤方偏移  $z=7.1520$  における銀河の後退速度を原点とした速度空間において、速度範囲  $-353 < v < +280 \text{ km s}^{-1}$  を積分している. 中央と右図はそれぞれクランプ A ( $+8 < v < 280 \text{ km s}^{-1}$ ) とクランプ B ( $-353 < v < -52 \text{ km s}^{-1}$ ) に対応する. (あ) 横軸は後退速度を原点とした場合の速度を表し、縦軸は放射強度を表す. 3つのスペクトルは、上から系全体、クランプ A、およびクランプ B に対応する. (う) [CII] 158  $\mu\text{m}$  の速度図を表し、クランプ A (B) は  $+100$  ( $-100$ )  $\text{km s}^{-1}$  程度で強く放射している.

向に重なっている可能性を棄却できました.

紫外光で2つの領域が観測されているもう一つの原因仮説は、本来は1天体であるものの、銀河中心で多量のダストが形成されている、というものです. この場合、中心領域では紫外光が吸収されてしまうため、擬似的に2つに分離されて観測されるはずですが. しかし、高い解像度で取得されたダスト連続光の様子(図3)を見ると、ダストも2つのクランプに沿って存在していることから、この可能性も棄却できます.

さて、図4パネル(う)のような速度構造は、銀河円盤の回転や銀河合体など様々に解釈することができます. 速度構造がスムーズである場合には銀河円盤の回転として理解されますが、本天体の場合は2つのクランプの間で急激に速度が変化していることから、銀河の合体を見ているという解釈がもっともらしいと言えるでしょう.

銀河合体という解釈を支持する独立な成果をご紹介します. 一般的に、銀河の合体は、その後の星形成活動を活発にすることが知られています. 銀河の多波長スペクトルエネルギー分布 (SED) の解析のエキスパートである馬渡健氏は、自身が開発したコード (PANHIT [18]) を用いて、本天体の星形成活動を調べました. PANHITの特徴は、銀河内にある恒星、星雲線、およびダストの放射を自己無撞着に扱っている点で、アルマによって観測された遠方銀河の性質を理解する上で極めて有効です.

図5に本天体の多波長SEDの様子を示します. 地上望遠鏡 (観測波長およそ  $1\text{--}2 \mu\text{m}$ ) とスピッツァー宇宙望遠鏡 (観測波長  $3.6, 4.5 \mu\text{m}$ ) の撮像観測で得られた撮像データは天体静止系の紫外光から可視光の情報を与えています. また、アルマのダスト連続光および [OIII] 88  $\mu\text{m}$  輝線の情報

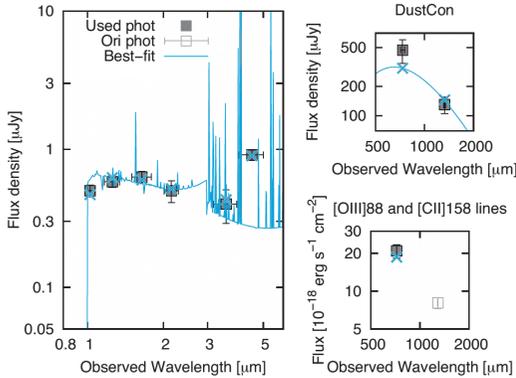


図5 SED解析の様子[17]. いずれのパネルも横軸は観測波長 ( $\mu\text{m}$ ), 縦軸はフラックス密度 ( $\mu\text{Jy}$ ) もしくは輝線フラックス ( $10^{-18} \text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$ ). 左パネルにおいて, 四角形は, 地上望遠鏡とスピッツァー宇宙望遠鏡によって取得された, 天体静止系の紫外-可視光の測光値. 実線はモデルスペクトルを表す.  $\times$ 印はモデルスペクトルを各フィルター透過曲線でたたみ込んだフラックス密度値. 右上(右下)パネルは, アルマによって取得されたダスト連続光 ([OIII] 88  $\mu\text{m}$  輝線フラックス) の測定値であり, シンボルの意味は左パネルに同じ.

は天体静止系の遠赤外線の情報をもたらします. これらの多波長データを PANHIT のモデルスペクトルと比較することで, 銀河の重要な物理量である恒星の年齢や質量, 星形成率などを推定できるのです. この結果, 本天体の恒星質量は  $7.7^{+1.0}_{-0.7} \times 10^8 M_{\odot}$ , 星形成率 (SFR) は  $200^{+33}_{-28} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$  であることがわかりました. ここで, 比星形成率 (sSFR) は単位恒星質量あたりの SFR として定義され, この値が大きいほど勢よく星形成活動をしていることを意味します. 得られた sSFR は  $260^{+19}_{-57} \text{Gyr}^{-1}$  であり,  $z=6-7$  時代の典型的な星形成銀河に比べても大きな数値です. つまり, 本天体は当時の銀河として爆発的な星形成活動をしていることが明らかになり, 本天体が銀河合体をしていると考えるとうまく説明できます.

このように, HST とアルマの高い解像度のデータ, さらに地上望遠鏡データやスピッツァー宇宙望遠鏡も含めた多波長 SED 解析の成果を総合的

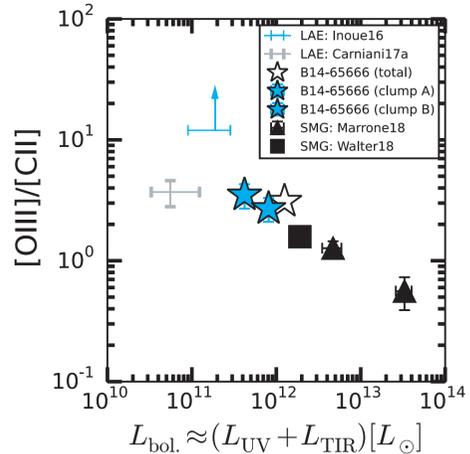


図6 再電離期の銀河において, [OIII] 88  $\mu\text{m}$  と [CII] 158  $\mu\text{m}$  の光度比を調べた図[17]. 横軸は銀河の紫外+赤外光度. 天体サンプルには紫外線で選択されるライマンブレイク銀河など (星印: 本研究の観測天体および無シンボルのデータ点) に加えて, サブリミ波銀河 (四角形および三角形).

に解釈することで, 本天体が合体銀河であると結論づけることができました. 銀河の合体現象は, 銀河の形態や星形成活動に影響を与える点で, 銀河進化の研究において重要な現象だと考えられています. 本天体は, 最も過去の観測例を示した意義があると言えます.

#### 4. 遠方銀河の強烈な [OIII] 88 $\mu\text{m}$

論文の中では他の再電離期の銀河を含めた統計的な議論も行っています.

図6は再電離期の銀河のうち, [OIII] 88  $\mu\text{m}$  および [CII] 158  $\mu\text{m}$  をともに観測した天体を網羅したものです (出版当時). 縦軸には [OIII] 88  $\mu\text{m}$  と [CII] 158  $\mu\text{m}$  の光度比を, 横軸は紫外光度と赤外線光度の総和として求めた全輻射光度 ( $L_{\text{bol}}$ ) を示しています. ここで, 紫外光度は地上望遠鏡や HST によって観測された天体静止系の紫外等級から計算しています. 赤外線光度は, ダスト連続光の放射を修正黒体放射で近似した上で, 8-1000  $\mu\text{m}$  にわたる波長を積分したものです<sup>9</sup>.

この図の面白い結果の1つ目は、多くの星形成銀河で縦軸の光度比が1以上つまり [OIII] 88  $\mu\text{m}$  輝線が [CII] 158  $\mu\text{m}$  輝線に対して光度で卓越していることです。特に、ライマンブレイク銀河などの小規模な天体で、[OIII] 88  $\mu\text{m}$  は [CII] 158  $\mu\text{m}$  に対して著しく明るいようです。規模の小さな天体は個数密度が高く、普遍的な存在だと考えられますから、遠方宇宙では [OIII] 88  $\mu\text{m}$  を強烈に放射する天体が多いことを意味しています。本研究成果の意義の1つは、[OIII] 88  $\mu\text{m}$  が [CII] 158  $\mu\text{m}$  と同等かそれ以上に明るいことを示し、アルマと [OIII] 88  $\mu\text{m}$  の組み合わせを再電離期の銀河の新しい分光手段として確立した点だと言えるでしょう。

この図のもう1つの結果は、天体個数が少ないものの、右肩下がりの相関があるかもしれない点です。具体的には、ライマンブレイク銀河では光度比が著しく高い一方で、系の規模が大きなサブミリ波銀河やキューサー母銀河では光度比が低いようです。どのように解釈できるのでしょうか。酸素を二階電離するエネルギー (35.4 eV) と炭素を一階電離するエネルギー (11.4 eV) を考慮すると、例えば若い大質量星が卓越するような状況で光度比が高くなると予想されます。よって、この相関はライマンブレイク銀河では、ガス電離度が高くなっている可能性を示唆しているかもしれません<sup>\*10</sup>。この可能性が正しい場合、宇宙再電離現象との興味深い関連が予想されます。というのも、銀河のガスの電離度が高い場合、水素の電離紫外光子 (波長912 Å以短もしくは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、再電離期のライマンブレイク銀河は実際に再電離を引き起こしやすい状況であったことを示唆しています。

## 5. 再電離期の銀河のダスト減光則

銀河のダスト減光則を理解することは、銀河の正しい性質を理解するうえで不可欠です。例えば、銀河の多波長SEDの解析をする際、近傍のスターバースト銀河のような減光則 (Calzetti則) を仮定するか、もしくは金属量の低い小マゼラン雲 (SMC) の減光則を仮定するかによって、推定されるSFRや恒星質量は大きく変化してしまいます。

ダストの減光則を調べる手法の一つが、IRX- $\beta_{\text{UV}}$ 関係という経験則です。IRX (Infrared Excess) とは、赤外光度と紫外光度の比を表し、ダスト減光の指標となります。一方で、 $\beta_{\text{UV}}$ は銀河の紫外連続光の傾きで、ダストによる赤化を表し、視線方向にあるダストの柱密度を反映します。

この $\beta_{\text{UV}}$ を用いた手法によるダスト量の推定は、銀河の紫外線データだけから真の (ダスト減光を補正した) 紫外光度およびSFRを推定できるため、とても強力な手法です。しかし、再電離期の銀河では、そもそもどのようなダスト減光則がもっともらしいのかわかっていない状況でした。IRX- $\beta_{\text{UV}}$ 関係を調べるうえでの難しさは、アルマなどを用いて天体静止系の赤外線光度を調べる必要がある点です。上述したように、再電離期の銀河ではそもそもダスト連続光を検出している例が少ない問題があります。

私たちは、先行研究及び本研究で分光によって

<sup>\*9</sup> 再電離期の天体においては、多くの場合ダスト連続光の観測は1点の測光データしかなく、個別天体のダスト温度 ( $T_d$ ) や放射率 ( $\beta_d$ ) はよくわかっていない。本天体は2つのバンドでダスト連続光が検出されている2例目の天体であるため、 $\beta_d=1.5$ を仮定することで、大まかに  $T_d \sim 50$  Kを推定している。後に、より正確な計算によって  $T_d \approx 40\text{--}80$  Kが推定されている [19]。本研究では、ひとまずすべての天体で  $T_d=50$  Kおよび $\beta_d=1.5$ を仮定して計算している。

<sup>\*10</sup> 光度比が高くなる原因仮説としては、ほかにも例えばi) 銀河の酸素および炭素の組成比、ii) 再電離期では [CII] 158  $\mu\text{m}$  輝線に対する宇宙マイクロ波背景放射の影響、iii) 銀河の星間媒質の中性ガス被覆率など様々なものが存在する [20]。あくまでも一つの仮説を採用した場合の議論であることに注意されたい。今後、より詳細な観測によって仮説を切り分けていくことが重要な課題である。

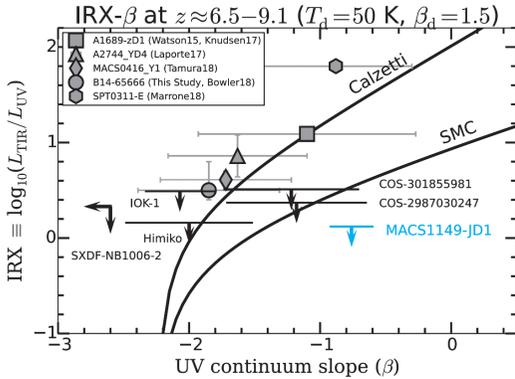


図7 再電離期の銀河のIRX- $\beta$ 関係 [17]. 横軸は紫外連続光の傾き $\beta_{UV}$ , 縦軸は赤外-紫外線光度比を表す. サンプルは $z > 6.5$ で分光同定されている天体に限っている. ダスト連続光が検出されている5天体がシンボルで示されており, 見検出天体はIRXの $3\sigma$ 上限値を矢印で表している. 2本の実線はそれぞれCalzetti則とSMCにおけるダスト減光則を表す.

正確な距離が確定しており, かつ紫外線と赤外線データのある天体にフォーカスしてこの問題に取り組みました. 図7はその成果です. この計算においては, 他の論文の中では手法が統一されておらず混乱が見られたため, 天体の紫外線および赤外線の測光値まで遡り, すべての天体で一様に解析をやり直しました.

この図から, 少なくともダスト連続光が検出されている天体では, Calzetti則と無矛盾であることを初めて明快に示すことに成功しました. まだサンプルが少ないため, 決定的な結論には至っていませんが, 最近是我々の成果を支持するものや [21], そうでないもの [22] などが報告されており, 現在でも活発に議論が行われています.

## 6. 再電離期の銀河と宇宙再電離現象の関係

$\text{Ly}\alpha$ 光子は, 中性水素原子によって多重散乱されることが知られています. この性質を利用して,  $\text{Ly}\alpha$ と光学的に薄い輝線 (例えば  $[\text{OIII}] 88 \mu\text{m}$  や  $[\text{CII}] 158 \mu\text{m}$ ) のスペクトルプロファイル

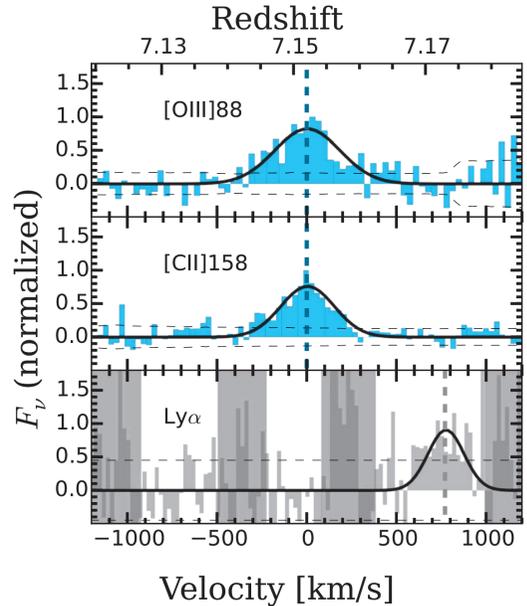


図8 本研究の観測ターゲットの輝線プロファイルの比較 [17]. 横軸は銀河の後退速度を原点とした速度, 縦軸は放射強度 (規格化済) を表す.  $\text{Ly}\alpha$ 線はおよそ  $+770 \text{ km s}^{-1}$  シフトしている.  $\text{Ly}\alpha$ スペクトルにある網掛け領域は夜光の影響の強い速度範囲を示す.

比較することで, 銀河の星間媒質について情報が得られます. 例えば,  $\text{Ly}\alpha$ 線が光学的に薄い輝線に対してどれだけ赤方偏移しているか ( $\Delta v_{\text{Ly}\alpha}$ ) を測定することで, 銀河内の中性水素ガスの柱密度やガスアウトフローの程度を間接的に調べることができるのです [23]. また, 再電離期の銀河の場合, 星間媒質を抜け出した  $\text{Ly}\alpha$ 光子は, 銀河間空間中に存在する中性水素によって, さらにピーク波長 (速度) が赤方偏移します.

B14-65666は再電離期の天体で $\Delta v_{\text{Ly}\alpha}$ を測定できる貴重な天体です. 図8は本天体の複数の輝線プロファイルを比較したものです. 特筆すべき点は,  $\Delta v_{\text{Ly}\alpha}$ が $770 \text{ km s}^{-1}$ 程度と著しく大きいことです. 図9は本天体に加えて, 再電離期の天体のうち,  $\text{Ly}\alpha$ 速度差が観測的に調べられている天体を網羅したものです (出版当時). この図から明らかなように, 本天体は再電離期の天体では最も

## Ly $\alpha$ velocity offset at $z \approx 6 - 8$

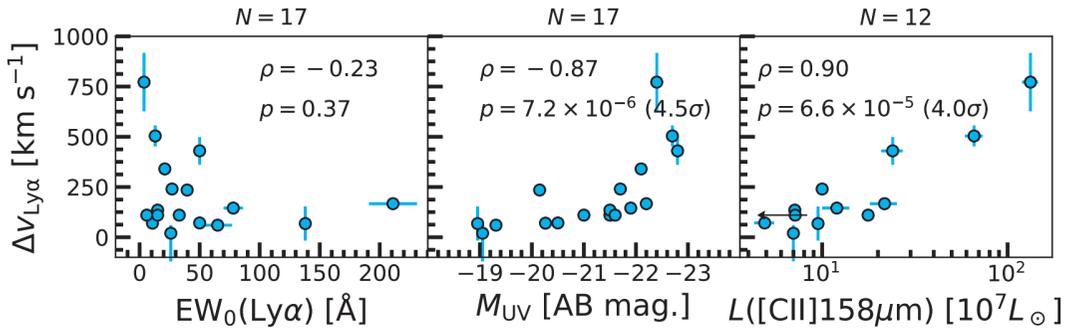


図9 左から、再電離期の銀河におけるLy $\alpha$ 線のオフセット量と、Ly $\alpha$ 等価幅、紫外絶対等級、および[CII] 158  $\mu\text{m}$  輝線光度との相関を表す [17]. 各パネル上部にそれぞれの相関を調べた天体数を掲載した. B14-65666は $\Delta v_{\text{Ly}\alpha} \sim 770 \text{ km s}^{-1}$ を持ち、これは遠方銀河の中で最大である.

大きな $\Delta v_{\text{Ly}\alpha}$ で特徴づけられます.

大きな $\Delta v_{\text{Ly}\alpha}$ の解釈の一つ目は、星間媒質の中性水素柱密度が大きい ( $N_{\text{HI}} \sim 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ ) ことです. この場合、星間媒質中からLy $\alpha$ 光子が脱出するまでの散乱回数が大きく、徐々に波長すなわち速度がシフトしていくのです. もう一つの解釈は、銀河が強烈なアウトフローをしている可能性です. この場合、我々から遠ざかっていくガスによって後方散乱されたLy $\alpha$ 光子は、星間媒質中の中性水素によるその後の散乱を受けにくく、銀河外に脱出しやすいのです.

一様球対称な球殻状の中性水素ガス分布を考えたLy $\alpha$ 輻射輸送の計算によれば、 $\Delta v_{\text{Ly}\alpha}$ はおおむね銀河のアウトフロー速度 $v_{\text{out}}$ の2倍程度になることが知られています. 残念ながら現在のデータでは、直接的にアウトフローの有無を調べられていないため、両者の仮説は切り分けることができません. これは、例えば将来ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡 (JWST) によって深い紫外域のスペクトルを取得できれば、検証できると期待されます.

B14-65666における大きな $\Delta v_{\text{Ly}\alpha}$ の原因はまだ明確にはなっていませんが、我々は再電離期の銀

河を集めることで、 $\Delta v_{\text{Ly}\alpha}$ と様々な物理量との相関を調べました. 図9の中央および右パネルのとおり、明るい天体では $\Delta v_{\text{Ly}\alpha}$ が大きいという関係を明らかにしました. 左パネルにはLy $\alpha$ 線の等価幅を示していますが、この観測量は紫外絶対等級と負の相関をもつため、意味としては同じプロットです. すでに $z \sim 2$ では左および中央パネルにある相関は認められていましたが (e.g., [24]), 本研究の意義は、再電離期において $\Delta v_{\text{Ly}\alpha}$ の依存性を統計的に明らかにしたことです.

この結果は、最近の再電離期の銀河のLy $\alpha$ 観測によって明らかにされつつある興味深い成果に重要な知見をもたらします. 通常、再電離期では銀河間空間の中性水素ガス量割合が増えるため、Ly $\alpha$ の観測は難しいと考えられるはずですが、最近の研究によると、明るい銀河ではLy $\alpha$ が予想外に観測されやすいことが明らかにされてきました [25]. この理由は、明るい銀河から銀河間空間へLy $\alpha$ 光子が入射する際、 $\Delta v_{\text{Ly}\alpha}$ が大きく、その後、銀河間空間中の中性水素によってはあまり散乱されないからであると考えられます.

\*<sup>11</sup> GTO (Guaranteed Time Observation) とは、例えば望遠鏡の開発グループのこれまでの貢献を讃えて付与される観測時間のことを指す.

## 7. 今後の展望

本天体は、最遠方の合体銀河としてJWSTの第一期観測が複数予定されています。本天体はGTO\*<sup>11</sup> 2件 (NIRSpec GTO PI: P. FerruitおよびMIRI GTO PI: L. Colina) および第一期公募観測1件 (NIRCam Co-PIs: 橋本拓也 & J. Alvarez-Marquez) で観測が予定されています。JWSTに搭載されたNIRCam, NIRSpec, MIRIという3つの装置を使うことで、天体静止系の紫外域から近赤外域にわたる幅広い波長で極めて高い感度および解像度のデータが取得されます。このように、大三元天体は最も特徴的な銀河の一つとして、今後も宇宙再電離や銀河進化の研究分野に重要な情報をもたらすことが期待されています。

### 謝 辞

この度は2021年度欧文研究報告論文賞をいただき大変光栄に思います。まずは推薦者、選考委員の方々に感謝いたします。そしてこのような記事を執筆する機会をいただき、ありがとうございます。小野寺仁人氏、仏坂健太氏には本稿へ貴重なコメントをいただきありがとうございます。本研究は電離酸素イオンの輝線を活用した遠方銀河の観測を開拓した井上昭雄氏の論文や、馬渡健氏が発展させた多波長データを取り入れたスペクトルエネルギー分布の解釈モデルがなければなし得なかった成果です。また、この天体をいち早くすばるFOCASで分光観測に成功した古澤久徳氏の論文の成果があってこそ、この天体のALMA観測が実現しました。この三氏をはじめ、本研究の共同研究者の皆様に感謝いたします。そして、本研究成果のプレスリリースの際には、平松正顕氏をはじめ広報関係者の方々にも大変お世話になりました。この場をお借りしてお礼を申し上げます。

## 参考文献

- [1] Walter, F., et al., 2009, *Nature*, 457, 699
- [2] Capak, P. L., et al., 2015, *Nature*, 522, 455
- [3] Ota, K., et al., 2014, *ApJ*, 792, 34
- [4] Ferland, G. J., et al., 2013, *RMxAA*, 49, 137
- [5] Inoue, A. K., et al., 2014, *ApJL*, 780, 18
- [6] 井上昭雄, 2017, *天文月報*, 110, 274
- [7] Madden, S., et al., 2013, *PASP*, 125, 600
- [8] Inoue, A., et al., 2016, *Science*, 352, 1559
- [9] Hashimoto, T., et al., 2018, *Nature*, 557, 392
- [10] Tamura, Y., et al., 2019, *ApJ*, 874, 27
- [11] Bowler, R. A. A., et al., 2014, *MNRAS*, 440, 2810
- [12] Furusawa, H., et al., 2016, *ApJ*, 822, 46
- [13] Bowler, R., et al., 2017, *MNRAS*, 466, 3612
- [14] Bowler, R., et al., 2018, *MNRAS*, 481, 1631
- [15] Watson, D., et al., 2015, *Nature*, 519, 327
- [16] Laporte, N., et al., 2017, *ApJL*, 837, 21
- [17] Hashimoto, T., et al., 2019, *PASJ*, 71, 71
- [18] Mawatari, K., et al., 2020, *IAUS*, 341, 285
- [19] Sugahara, Y., et al., 2021, *ApJ*, 923, 5
- [20] Harikane, Y., et al., 2020, *ApJ*, 896, 93
- [21] Bowler, R., et al., 2022, *MNRAS*, 510, 5088
- [22] Schouws, S., et al., 2022, *ApJ*, 928, 31
- [23] Verhamme, A., et al., 2006, *A&A*, 460, 397
- [24] Hashimoto, T., et al., 2013, *ApJ*, 765, 70
- [25] Stark, D. P., et al., 2017, *MNRAS*, 464, 469

### Big Three Dragons: Detections of [OIII] 88 $\mu\text{m}$ , [CII] 158 $\mu\text{m}$ , and Dust Continuum in a Distant Galaxy

Takuya HASHIMOTO

*Faculty of Pure and Applied Sciences, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8577, Japan*

Abstract: Using ALMA, we have succeeded for the first time in detecting all the three features of [OIII] 88  $\mu\text{m}$ , [CII] 158  $\mu\text{m}$ , and the dust continuum emission from a star-forming galaxy in the epoch of reionization (EoR). Owing to the ALMA's high angular resolution and spectral (i.e., velocity) information, we demonstrate that the source is a major merger at  $z=7.15$ , the farthest of this type of galaxies. In this article, we describe the target in detail and statistically discuss i) the intense [OIII] 88  $\mu\text{m}$  emission at high- $z$ , ii) dust attenuation law, and iii) Ly $\alpha$ 's escape in galaxies in the EoR.