

論文内容の要旨

Dusty Starburst Galaxies in the High Redshift Proto-cluster around the Radio Galaxy 4C 23.56

(電波銀河4C23.56周辺の高赤方偏移原始銀河団におけるダスト
に覆われた爆発的星形成銀河)

氏 名 鈴木 賢太

宇宙で最も高い星形成率 (Star Formation Rates; SFRs) が見られる銀河種族はミリ波・サブミリ波帯で明るく検出されることからサブミリ波銀河 (Submillimeter Galaxies; SMGs) と呼ばれる。SMGs は $\sim 10^{12-13} L_{\odot}$ という高い遠赤外線光度 (Far-Infrared Luminosity; L_{FIR}) を持ち、多量のダストに覆われ、 $\sim 10^{2-3} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ にも達する極めて激しい爆発的星形成を行っていると考えられる。その極めて高い SFRs から、SMGs は銀河団環境で選択的に存在する巨大楕円銀河の祖先として有力な種族と考えられており、質量が $10^{11-12} M_{\odot}$ になるような銀河団中の巨大楕円銀河はその形成初期段階において SMGs に見られるような爆発的星形成を経験すると予想されている。しかし SMGs はダスト吸収とサブミリ波帯サーベイ観測の低分解能に起因する多波長同定および距離推定の難しさから、初期宇宙での高密度環境下、いわゆる原始銀河団領域に選択的に存在する種族であるかどうかは、未だ十分に明らかにされていない。

本研究では、既に独立な方法で原始銀河団領域と知られている領域においてミリ波サブミリ波帯観測による SMGs 探査および多波長高分解能観測を行い、銀河団に付随する SMGs、すなわちダストに覆われた激しい爆発的星形成銀河種族の存在や組成、星形成の性質を明らかにすることを試みる。観測対象として、すばる望遠鏡による狭帯域サーベイにより抽出された輝線銀河の高密度領域の中から、銀河団の現れ始める時期に相当する $z > 2$ の高密度領域として、 $z = 2.48$ の電波銀河 4C 23.56 の周囲およそ 2×2 平方分の領域に広がる $\text{H}\alpha$ 輝線天体 ($\text{H}\alpha$ Emitters; HAEs) の密度超過領域に着目した。本領域は一般領域に比べ5倍もの HAEs の密度超過がみられる領域で、それらの HAEs は $\sim 10^{10-11} M_{\odot}$ という大きい星質量、数 $100 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ という高い SFRs を持つことが知られている。本領域は銀河形成を活発に行っている原始銀河団領域であることが明らかになっているが、この領域に、どの程度の数や明るさのサブミリ波銀河が存在し、それらが HAEs などの銀河種族とどのような関係にあるかについては、これまで全く調べられていなかった。

こうした背景のもと、ASTE 望遠鏡の AzTEC 連続波カメラによる 4C 23.56 原始銀河団領域の 1.1 mm 連続波撮像サーベイを行い、1.1mm 選択の SMGs (以下、1.1 mm 源) の面分布を明らかにした (図 1 左)。この

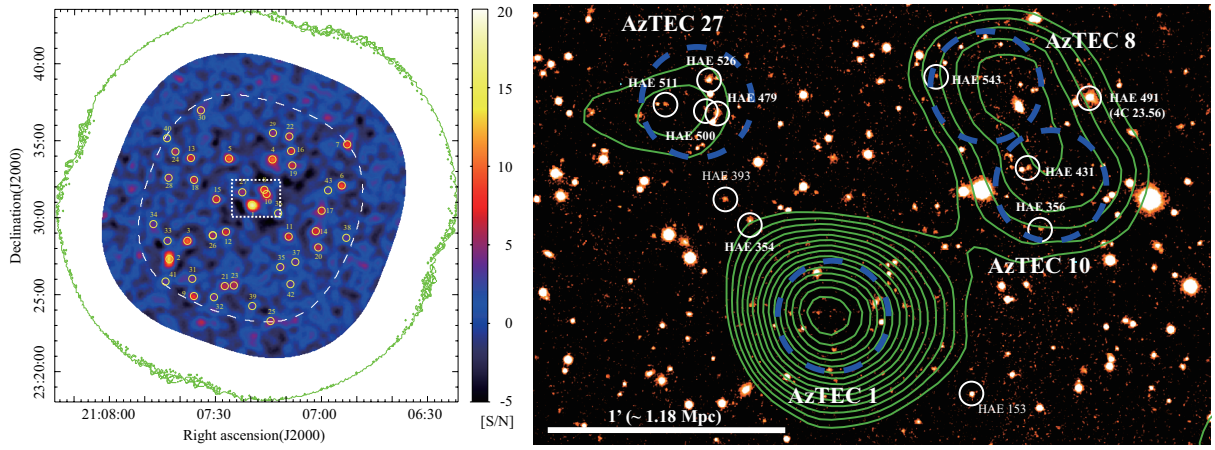


図1 左: *4C 23.56* 原始銀河団領域における *ASTE 10 m* 望遠鏡 *AzTEC* カメラによる 1.1 mm S/N マップ。166 平方分の領域 ($1\sigma = 0.6 - 0.9\text{ mJy}$) で $S/N > 3.5$ の 1.1 mm 源を 43 天体検出した。右: 電波銀河 *4C 23.56* の東側の領域 $\sim 2 \times 2$ 平方分の範囲 (左図中心の四角の領域に相当) に広がる HAEs (白丸) 高密度領域における *AzTEC 1.1 mm* 源 (等高線) の分布。青い破線円は *PdBI* により観測された視野。

観測は高赤方偏移の電波銀河領域サーベイとしては最も広く深いものの一つであり (166 平方分、 $1\sigma = 0.6 - 0.9\text{ mJy}$)、電波銀河周囲における銀河団スケールでのダストに隠された銀河形成の分布を明らかにするという観点で新しく有用な情報をもたらす観測である。この領域において、 $S/N > 3.5$ の基準で、43 の 1.1 mm 源が抽出された。抽出された 1.1 mm 源のナンバーカウントを他のフィールドにおける *AzTEC* サーベイの結果と比較したところ、Lockman Hole, GOODS-S, ADF-S, SXDF のようなフィールドに比べて 2 倍程度の密度超過があり、GOODS-N のような密度超過領域と同等の密度をもつことが分かった。特に電波銀河周辺の HAEs 高密度領域においては、 1.1 mm 源の分布が既知の明るい HAEs 分布と相関していることが明らかになった (図 1 右)。ASTE 1.1 mm の分解能は $30''$ と可視近赤外に比べて極端に悪く 1.1 mm 源がどの天体に由来するものかは *AzTEC* イメージのみからは不明であるが、面分布の相関から 1.1 mm 源がこの原始銀河団のメンバー銀河由来である可能性が示唆される。

我々はさらに *4C 23.56* 周囲に検出された 1.1 mm 源に対して Plateau de Bure 干渉計 (*PdBI*) によるミリ波高分解能観測を行い、*4C 23.56* 周囲の領域のミリ波源の対応天体を決定することに成功した。具体的には、*4C 23.56* 周囲およそ 5 平方分の領域に存在する、HAEs に重なる 4 つの *AzTEC 1.1 mm* 源 (*AzTEC 1*, *8*, *10*, *27*; 図 1 右) に対する *PdBI 1.8 mm* 連続波および分光観測を行った。その結果、4 視野 (合計 0.7 平方分) の中に 8 つの 1.8 mm 連続波源が $S/N > 4$ で検出され、その内の *AzTEC 10*, *27* に対応する 4 天体 (*PdB 5*, *6*, *7*, *8*) が HAEs と同定された (図 2; *AzTEC 27* の例)。さらにその内の 2 天体 (*PdB 7*, *8*) では輝線が見られ、 $H\alpha$ 輝線との関係からそれが $\text{CO}(5-4)$ 輝線であることが分かった。一方で *AzTEC 1*, *AzTEC 8* に対応する 4 天体 (*PdB 1*, *2*, *3*, *4*) は HAEs と対応せず、さらに中間赤外から可視にかけて対応天体が見られないことから、*4C 23.56* 原始銀河団より更に遠方にある、背景の SMGs であると考えられる。

HAEs と同定された 4 天体の SMGs に関して、それらがどのような星形成モードにあるかを調べるため、 CO 輝線光度 L'_{CO} から、ガスから星への転換効率の指標となる星形成効率 (Star Formation Efficiency; $\text{SFE} \equiv L_{\text{FIR}}/L'_{\text{CO}}$) を推定すると、2 天体は $> 80 L_{\odot} [\text{K km s}^{-1} \text{pc}^2]^{-1}$ の下限値が課された一方で、残りの 2 天体は $15-20 L_{\odot} [\text{K km s}^{-1} \text{pc}^2]^{-1}$ という先の 2 天体よりも有意に低い値が見積もられた。 SFE は SMG やクエーサーでは $> 100 L_{\odot} [\text{K km s}^{-1} \text{pc}^2]^{-1}$ 程度、円盤銀河では $< 100 L_{\odot} [\text{K km s}^{-1} \text{pc}^2]^{-1}$ 程度と大まかに

AzTEC 27

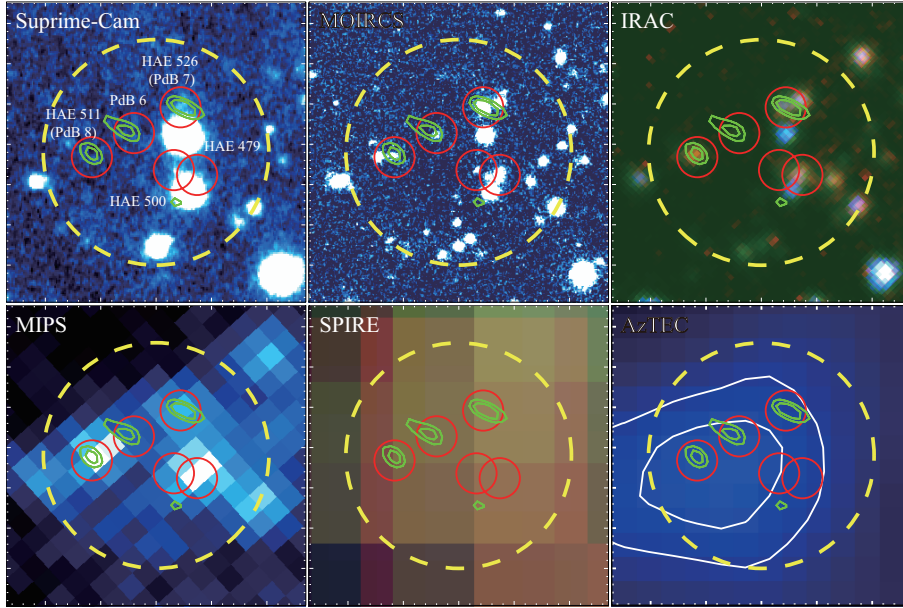


図 2 AzTEC 27 の可視からミリ波の多波長イメージ。Suprime-Cam/Subaru B band、MOIRCS/Subaru K_s band、IRAC / Spitzer $3.6/4.5/8.0\mu\text{m}$ 三色合成、MIPS $24\mu\text{m}$ 、SPIRE/Herschel $250/350/500\mu\text{m}$ 三色合成、AzTEC 1.1 mm 。各イメージ上における緑の等高線は PdBI 1.8 mm の S/N ($S/N = 3, 4, 5, \dots$)、赤丸は HAEs、黄色の破線は PdBI 主ビームの半値径 ($\sim 28''$)、白の等高線は AzTEC 1.1 mm の S/N ($S/N = 3.5, 4.5, 5.5, \dots$) をそれぞれ表す。

分かれるが、我々が検出した天体には SFE がディスクモード星形成に近いものものとスターバーストモードに近いものの両方が存在することが本結果から見られ、爆発的星形成を起こしているものと比較的静穏なものが混在することが示される。さらに CO 輝線が検出された PdB 7、8 に対しては輝線から銀河組成に対して制限を行うことができる。CO 輝線光度 L'_{CO} からガス質量 M_{gas} を求め、星質量 M_* は K_s バンド等級から換算することで推定を行い、バリオン質量におけるガスの割合 $M_{\text{gas}}/(M_{\text{gas}} + M_*)$ を評価した。 L'_{CO} および K_s バンド等級の測定値および換算係数における不定性を考慮して $M_{\text{gas}}/(M_{\text{gas}} + M_*)$ を評価したところ、PdB 7 では $0.04 - 0.40$ 、PdB 8 では $0.42 - 0.93$ とそれぞれ見積もられた。これらの見積もりから、PdB 7 は既に星形成を終えつつある銀河である一方、PdB 8 はバリオン質量のほとんどがまだ分子ガスの状態にある形成段階の銀河であると考えられる。同様の環境に存在する銀河においても形成段階が異なるという結果は、銀河進化に相互作用のような外的な作用が大きく寄与していることを示唆する。

我々は加えて Herschel 宇宙望遠鏡による $250/350/500\mu\text{m}$ の測光により、AzTEC 1.1 mm 源のダスト SED を決定し、ダスト温度を $T_{\text{dust}} = 35\text{ K}$ と仮定した条件で赤方偏移 z_{dust} を推定した。全 43 天体のうち 18 天体の赤方偏移範囲は $1.19 < z_{\text{dust}} < 4.75$ であり、平均で $\langle z_{\text{dust}} \rangle = 2.56$ という赤方偏移分布を得た。この分布は過去の SMG サーベイサンプルの z の分布と整合する結果であり、また、AzTEC による 1.1 mm 選択のサブミリ波銀河サーベイでは、Herschel のサブミリ波サーベイにもとづくサンプルに比べ、 $z > 2$ の天体が選択的に検出されていることが分かる。推定された z_{dust} にもとづいて L_{FIR} および SFRs も推定することができ、それぞれ $1.9 - 11 \times 10^{12} L_{\odot}$ 、 $220 - 1290 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ となった。また干渉計観測を行った AzTEC 天体で同定されたミリ波源のうち、赤方偏移の不明な PdB 1、2、3、4 については SPIRE の測光値から 4C 23.56 原始銀河団の背後にある $z > 3$ の SMGs である可能性が示唆された。HAE との対応から赤

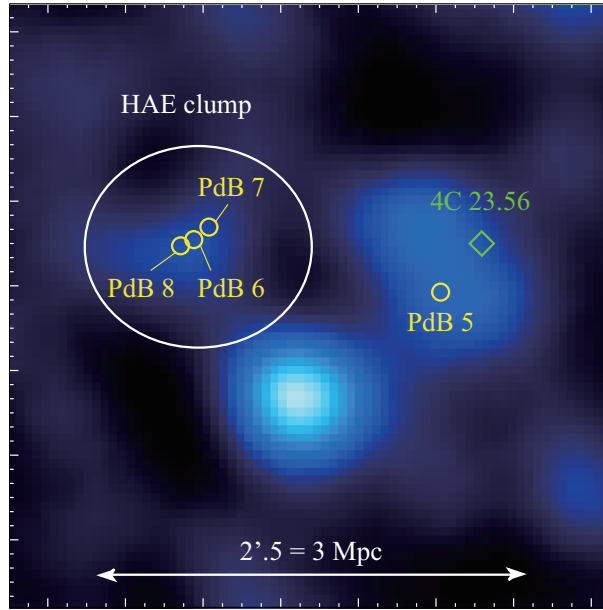


図3 PdBI観測によって検出された $z = 2.48$ の原始銀河団に付随する4つのミリ波源。およそ 300 kpc のスケールに複数の HAEs が集まった “HAE クラump” 中において、3天体 (PdB 6, 7, 8) がミリ波で検出され、さらに内2天体 (PdB 7, 8) から CO 輝線が検出された。

方偏移の分かった PdB 5, 6, 7, 8 に対しては、さらに T_{dust} の制限を付けることができ、それをもとに L_{FIR} および SFRs を推定することができた。この SFR 推定値は $\text{H}\alpha$ や MIPS にもとづく推定に対し $1/6 \sim 5$ 倍程度という差をもっていたが、SPIRE-AzTEC 測光にもとづく方法では $\text{H}\alpha$ で問題となる減光量に依存しないことと、 L_{FIR} 推定に大きく影響する T_{dust} の不定性を制限できることから、より信頼性のある SFR 推定値であると考えられる。

ミリ波干渉計高分解能分光観測によって正確な赤方偏移の値を得たことにより、原始銀河団における位置および相対運動が明らかになった。PdB 5 については、典型的な SMG と同等の遠赤外光度および星形成率を持つ爆発的星形成銀河であることが分かったが、PdB 6, 7, 8 は $\text{H}\alpha$ でも見られたおよそ 300 kpc 直径の領域に集中した星形成銀河のクラumpのメンバーであり、CO 輝線による PdB 7, 8 の相対速度はおよそ 1200 km s^{-1} であることが明らかになった。また各々の星形成率は $60\text{-}150 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ と見積もられた。CO の検出によって、このクラumpは近傍のコンパクト銀河群と類似した構造であることが明らかになった。

以上の結果から、4C 23.56 原始銀河団領域に付随する SMGs は、一般領域にみられる SMGs と比較して顕著な密度超過を示す一方で、それらの中では SFE から見られる星形成モードはディスクに近いものものとスターバーストに近いものがあり、爆発的星形成を起こしているものと静穏的なものが混在しているということ、また CO 輝線から組成比を求めた PdB 7 と PdB 8 に見られたように、同じ環境下における銀河においてもガスの割合 $M_{\text{gas}}/(M_{\text{gas}} + M_{*})$ がかなり異なるということが分かった。高密度環境下に存在する SMGs においても個々の進化段階や星形成モードには多様性があることが分かった。高密度環境下において、さまざまな進化段階や星形成モードの銀河が、HAE clump に見られるような合体により集められることで、このような多様性が発現している可能性がある。