

## 論文の内容の要旨

# A Study of Dusty Star-Forming Galaxies in the $z=2-3$ Protoclusters with Herschel and ALMA

（ ハーシェル宇宙望遠鏡とアルマ望遠鏡で探る  
赤方偏移 2-3 原始銀河団における爆発的星形成銀河の研究 ）

氏名 加藤 裕太

原始銀河団では、遠赤外線で観測される、爆発的星形成銀河 (Dusty Star-forming Galaxies; DSFGs) が多く観測されることが期待されていたが、観測的には明らかにされていなかった。本研究は、ハーシェル宇宙望遠鏡/SPIRE カメラを用いた遠赤外線観測によって赤方偏移 2-3 の 3 つの原始銀河団において DSFGs の探査を行い、DSFGs の個数密度超過領域があることを示すとともに、DSFGs の遠赤外線光度 ( $L_{\text{FIR}}$ ) から見積もられる星形成率 (Star-Formation Rate; SFR) は、宇宙の平均と比べて最大 100 倍以上になる可能性があることを示した。さらに本研究では、赤方偏移 3.1 の原始銀河団 SSA22 において、ハーシェル宇宙望遠鏡で検出された  $\text{Ly}\alpha$  ブロップ (LAB)、LAB18 をアルマ望遠鏡によって観測した。その結果、ハーシェル宇宙望遠鏡で 1 つに見えていた DSFGs は、アルマ望遠鏡では 4 つの DSFGs で構成されていることを示した。さらに、そのうちの 1 つである LAB18.b で CO J=4-3 輝線を検出し、 $L_{\text{FIR}}$  の不定性の範囲を考慮しても  $L'_{\text{CO}(4-3)}$  が約 3 倍小さいことを示した。 $L'_{\text{CO}(4-3)}$  から見積もった分子ガス質量を SFR で除したガス枯渇時間  $\tau_{\text{dep}}$  は LAB18.b で  $22^{+14}_{-6}$  Myr であり、DSFGs の典型的な  $\tau_{\text{dep}} \sim 100-200$  Myr と比べて小さい値を示した。アルマ望遠鏡とハーシェル宇宙望遠鏡/SPIRE カメラによるダスト連続光の測光値から、LAB18.b は同程度の  $L_{\text{FIR}}$  を持つ銀河に対し、ダスト放射率インデックス  $\beta$  が高く、ダスト温度  $T_d$  が低いことを示した。 $\beta$  は、ダスト質量吸収係数  $\kappa_\nu$  の周波数依存性であり、今後短-長波長のダスト連続光が次々とアルマ望遠鏡によって観測されることで、様々な銀河に対する  $\kappa_\nu$  が明らかにされるだろう。

原始銀河団は、赤方偏移 2 以上の宇宙で、静止系紫外光/可視光によって見つかる銀河の数十 Mpc を超える個数密度超過領域として知られている。DSFGs は、 $\sim 10^{2-3} M_\odot \text{ yr}^{-1}$  というその高い星形成率から、近傍銀河団の中心部に存在する質量  $10^{11-12} M_\odot$  のような楕円銀河の祖先と考えられている。銀河の個数密度超過領域である原始銀河団では、宇宙の構造形成理論によって、より高頻度での銀河衝突や、大規模構造に沿って銀河に流れ落ちて来るガスの高い供給ポテンシャルを背景にして、多くの DSFGs が観測されることが期待されているが、遠赤外線による観測が不足していたため、観測的には明らかにされていなかった。爆発的星形成は銀河内部に多量のダストを撒き散らし、ダストは大質量星による紫外光によって得たエネルギーを数十 K の黒体放射として放出するため、DSFGs は遠赤外線観測を行うことで検出が可能である。

DSFGs の遠赤外線エネルギースペクトルは、一温度の修正黒体放射でよく近似される。ハーシェル宇宙望遠鏡に搭載されている SPIRE カメラは、250、350、500  $\mu\text{m}$  の同時測光観測が可能であり、赤方偏移 2-3 の黒体放射のピーク付近を唯一複数捉え、 $T_d$  をよく見積もることができる。本研究では DSFGs の測光値

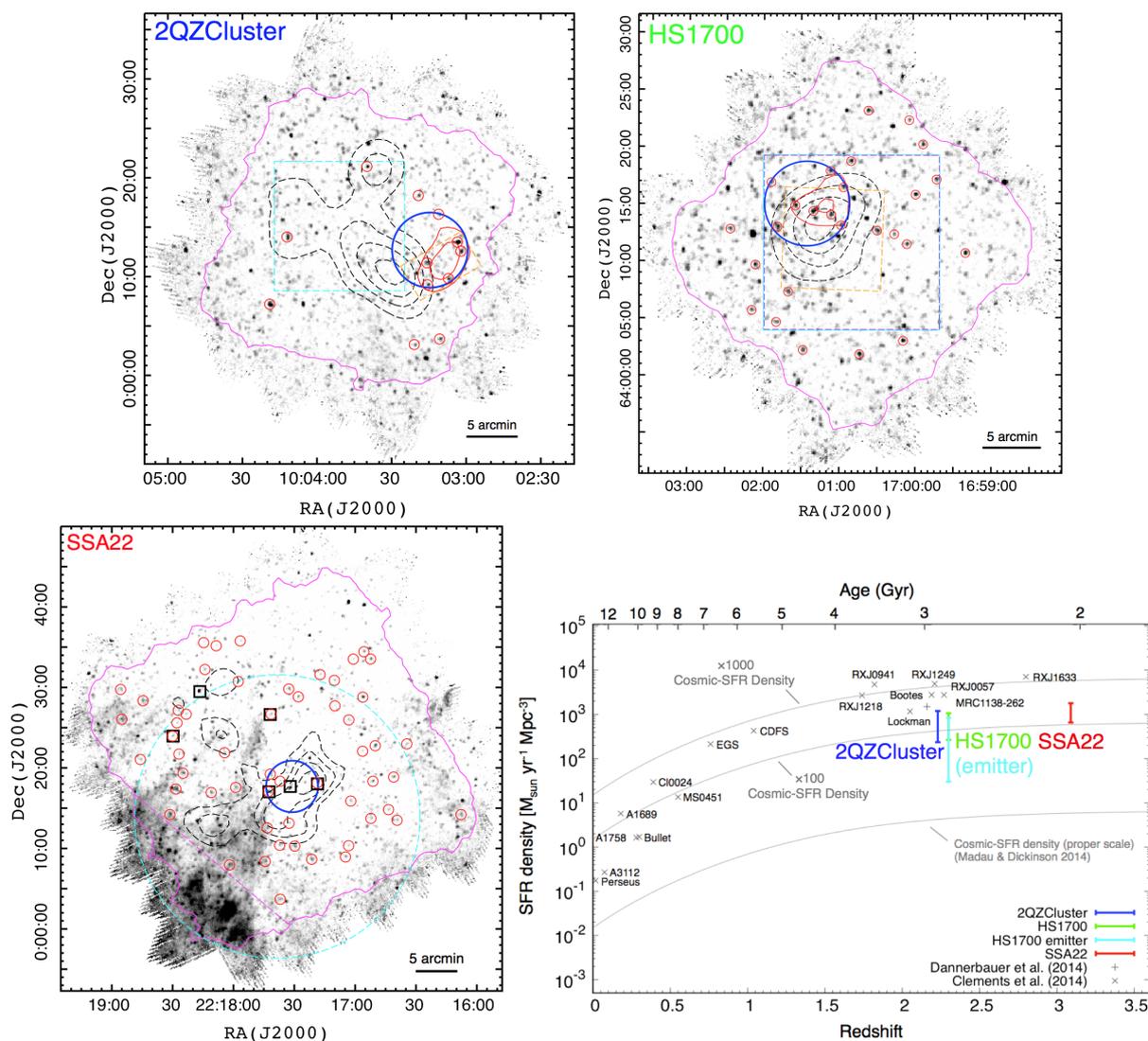


Figure 1: (上段及び下段左):  $250\mu\text{m}$  で検出し、SPIRE カラーで選択した  $L_{\text{FIR}} > 5 \times 10^{12} L_{\odot}$  の DSFGs の位置を赤い円で示している。背景は全て  $250\mu\text{m}$  の画像である。マゼンタの実線は今回解析に使用した領域で、データ積分値が最大の 30% 以上の領域を示している。SSA22 においては、マゼンタの破線以下を銀河系シラスの寄与の大きい部分として除いている。黒い破線コントアは、2QZCluster においては 19 個の HAEs と 3 個の QSOs で、HS1700 では 45 個の LBGs で、SSA22 では 742 個の LAEs で引かれており、それぞれ  $1-4\sigma$ ,  $1-4\sigma$ ,  $3-6\sigma$  の銀河個数密度超過を示している。赤い実線コントアは 2QZCluster、HS1700 において検出された DSFGs の  $3-4\sigma$ ,  $4-5\sigma$  の銀河個数密度超過を示している。また、それらの銀河個数密度超過領域を青い円 (共同距離で半径 6 Mpc、近傍銀河団のおよその広がりと同程度) で示している。SSA22 においては  $500\mu\text{m}$  で検出し、SPIRE カラーで選択した  $L_{\text{FIR}} > 5 \times 10^{12} L_{\odot}$  の DSFGs を黒い正方形で示し、これを含んだ個数超過領域を示している。以下は他波長の観測領域を示す。2QZCluster; 水色と橙色の破線は HAEs に対するイギリス赤外線望遠鏡の観測領域とすばる望遠鏡の観測領域。HS1700; 水色と紫の破線、橙色の破線はそれぞれ LAEs、LBGs に対するケック望遠鏡の観測領域、LAEs に対するパロマー望遠鏡の観測領域。SSA22; 水色の破線はアステ望遠鏡の観測領域。(下段右): 3 つの原始銀河団に対して求めた星形成率密度の上限値。誤差の上限値は全ての DSFGs を含んだ最大値で、下限値は各原始銀河団での DSFGs の平均の個数と明るさを差し引いたもの。赤方偏移 2.2–3.1 の 3 つの原始銀河団で平均と比べて 100 倍以上高い可能性を指摘している。

から  $S_{500}/S_{350}$  及び  $S_{350}/S_{250}$  のバンド比を測定し、それが各原始銀河団の赤方偏移における、 $T_d=30-40$  K、 $\beta = 1.5$  の光学的に薄い修正黒体輻射の示すバンド比から誤差 20%の範囲内に収まり、かつ  $L_{\text{FIR}}$  が  $5 \times 10^{12} L_{\odot}$  を超えるものを、原始銀河団に付随する DSFGs の候補天体として選択した。天体検出及び各バンドの測光は、最も空間分解能のよい  $250 \mu\text{m}$  マップ上での位置に合わせて行った。原始銀河団における DSFGs の個数密度超過領域の有無の検証は、近傍銀河団の広がりと同程度の共動距離 6 Mpc の円の半径内に入る DSFGs の個数を調べることで行った。

その結果、2QZCluster においては  $4\sigma$  の有意性で 6 個の DSFGs の個数密度超過を、HS1700 においては  $5\sigma$  の有意性で 8 個の DSFGs の個数密度超過を、SSA22 においては、赤方偏移 3.1 でのダスト温度の低い DSFGs を見落とさないため、 $500 \mu\text{m}$  で検出した 3 つの DSFGs と合わせて合計 5 つの DSFGs の個数密度超過を検出し、実際に多くの爆発的星形成が観測されることを示した。さらに、個数密度超過領域内で最も多くの原始銀河団に付随する DSFGs の候補天体の入る、固有スケールで半径 1 Mpc (近傍銀河団の中心部の典型的なスケール) の位置を探しだし、その球が作る体積を用いて、星形成率密度を求めた。その結果、選択した DSFGs が原始銀河団に全て付随すると仮定した上での原始銀河団における DSFGs の示す最大の星形成率密度は、当時最遠方である赤方偏移 3.1 の SSA22 を含み、それぞれの赤方偏移の平均的な宇宙の星形成率密度と比べて 100 倍以上高い可能性があることを示した (Figure 1)。

多くの DSFGs が原始銀河団で観測される説明の 1 つとして、長い  $\tau_{\text{dep}}$  が挙げられている一方、観測的には明らかにされていないため、本研究ではさらに、ハーシェル宇宙望遠鏡で検出されている 1 つの DSFGs である、赤方偏移 3.1 の原始銀河団 SSA22 に付随する  $\text{Ly}\alpha$  プロップ 18 (LAB18) に対してアルマ望遠鏡によるバンド 7 ( $860 \mu\text{m}$ )、及びバンド 3 (3 mm、CO J=4-3 輝線) の観測を行った。LABs は、原始銀河団によく見つかる、大きいもので 100 kpc スケールの  $\text{Ly}\alpha$  輝線の広がりを持つ巨大なガス天体で、遠赤外線でも明るいものも報告されていることから、DSFGs の形成環境の 1 つとして知られている。LAB18 は SSA22 原始銀河団中で遠赤外線でも最も明るい LABs として知られており、100 kpc に渡って細長く伸びている  $\text{Ly}\alpha$  輝線の形状、淡く広がった紫外連続光とその内側に存在する紫外連続光のクランプ、及び X 線 AGNs の存在で知られているもので (Figure 2)、これらの特徴から高いガスの供給ポテンシャルが予想されている。

アルマ望遠鏡のバンド 7 による  $860 \mu\text{m}$  ダスト連続光観測からは、ハーシェル宇宙望遠鏡の空間分解能では 1 つであった LAB18 の DSFGs から、 $5\sigma$  以上の有意性で 4 つの DSFGs (LAB18.a, LAB18.b, LAB18.c, LAB18.d) が検出され、それらが LAB18 の  $\text{Ly}\alpha$  が示すフィラメント形状に沿った形で DSFGs が並んで存在していることを発見した (Figure 2)。さらにアルマ望遠鏡のバンド 3 による CO J=4-3 輝線と 3 mm ダスト連続光の観測から、LAB18.b において  $11\sigma$  の有意性で CO J=4-3 輝線を検出し、LAB18.a, LAB18.b, LAB18.c, LAB18.d において  $3\sigma$  以上の有意性で 3 mm ダスト連続光を検出した。アルマ望遠鏡 ( $860 \mu\text{m}$ 、3 mm) 及びハーシェル宇宙望遠鏡 (天体混同が激しいため、最も空間分解能の良い  $250 \mu\text{m}$  のみを使用) の測光データに対し、光学的に薄い温度を仮定した修正黒体輻射をフィットすることで  $L_{\text{FIR}}$ 、 $T_d$ 、 $\beta$  を求めた。不定性の範囲は  $250 \mu\text{m}$  の天体混同による測光値の幅を考慮した。

Figure 3 (左) は  $L_{\text{FIR}}$  と  $L'_{\text{CO}(4-3)}$  の関係を、LAB18 中の 4 つの DSFGs に対して示したものである。LAB18.b の  $L'_{\text{CO}(4-3)}/L_{\text{FIR}}$  比は、近傍から遠方の典型的な DSFGs の関係よりも、不定性の範囲で小さく見積もっても相対的に約 3 倍  $L'_{\text{CO}(4-3)}$  が  $L_{\text{FIR}}$  に対して小さいことを示した。 $L'_{\text{CO}(4-3)}$  と  $L'_{\text{CO}(1-0)}$  の光度比、 $L'_{\text{CO}(1-0)}$  の光度とガス質量の比を仮定して見積もられるガス質量に対して求められる LAB18.b の  $\tau_{\text{dep}}$  は  $22^{+14}_{-6}$  Myr であった。LAB18 の特徴から予想していた高いガスの供給ポテンシャルに反して、むしろ近傍から遠方の典型的な DSFGs の  $\tau_{\text{dep}} \sim 100-200$  Myr と比べて小さい値を取り得る可能性を示した。

Figure 3 (右) は  $T_d$  と  $\beta$  を様々な  $L_{\text{FIR}}$  の銀河で色分けして示したものである。LAB18.b は、 $L_{\text{FIR}} > 10^{12} L_{\odot}$  であるにも関わらず、低い  $T_d$  と高い  $\beta$  を示すことが示された。これは、赤方偏移 3.1 においてアルマ望遠鏡により  $860 \mu\text{m}$  及び 3 mm ダスト連続光 (静止系  $210 \mu\text{m}$  と  $710 \mu\text{m}$ 、 $\beta$  への依存が強い) の観測があり、かつハーシェル宇宙望遠鏡によって  $250 \mu\text{m}$  ダスト連続光 (静止系  $60 \mu\text{m}$ 、 $T_d$  への依存が強い) の観測があることの両方によって初めて示されたものである。 $\beta$  は、ダスト質量吸収係数  $\kappa_{\nu}$  と  $\kappa_{\nu} = \kappa_o(\nu/\nu_o)^{\beta}$  で結びつく  $\kappa_{\nu}$  の周波数依存性であり、今後、アルマ望遠鏡によって短-長波長のダスト連続光が次々と観測されることで、近傍から遠方の様々な銀河に対しての  $\kappa_{\nu}$  への制限がついていくであろうことを示唆する。

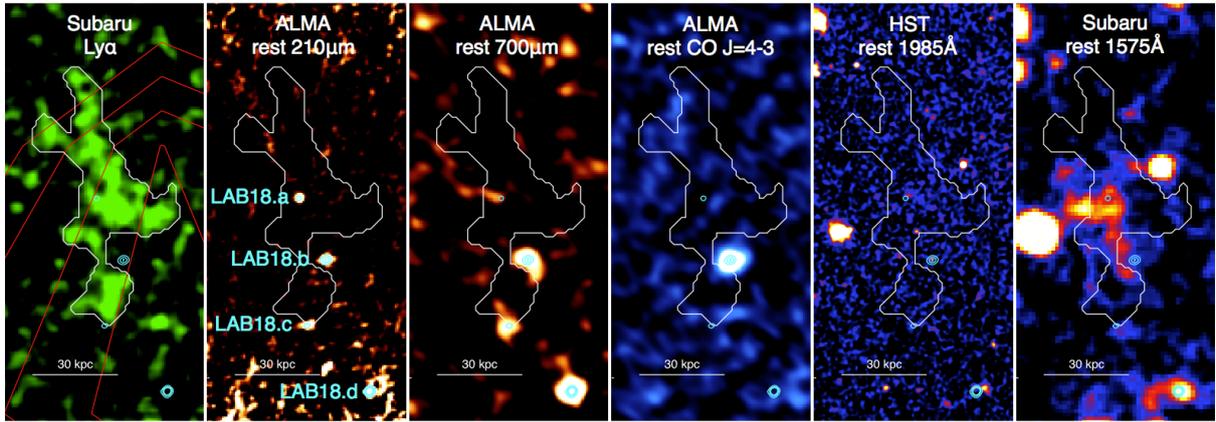


Figure 2: 左から順に、すばる望遠鏡による  $\text{Ly}\alpha$  輝線、アルマ望遠鏡による  $860 \mu\text{m}$  ダスト連続光、 $3 \text{ mm}$  ダスト連続光、CO J=4-3 輝線、ハッブル宇宙望遠鏡による  $814 \text{ nm}$  紫外連続光、すばる望遠鏡による  $646 \text{ nm}$  紫外連続光の観測を示している。白実線のコンタは  $\text{Ly}\alpha$  輝線の  $1.4 \times 10^{-18} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ arcsec}^{-2}$  を示し、水色のコンタは上から順に LAB18.a、LAB18.b、LAB18.c、LAB18.d の位置を示し、 $860 \mu\text{m}$  の  $5, 10, 15\sigma$  のコンタである。 $\text{Ly}\alpha$  輝線画像の赤色コンタはハーシェル宇宙望遠鏡/SPIRE カメラの  $500 \mu\text{m}$  における  $16\text{--}19 \text{ mJy}$  のコンタを示している。

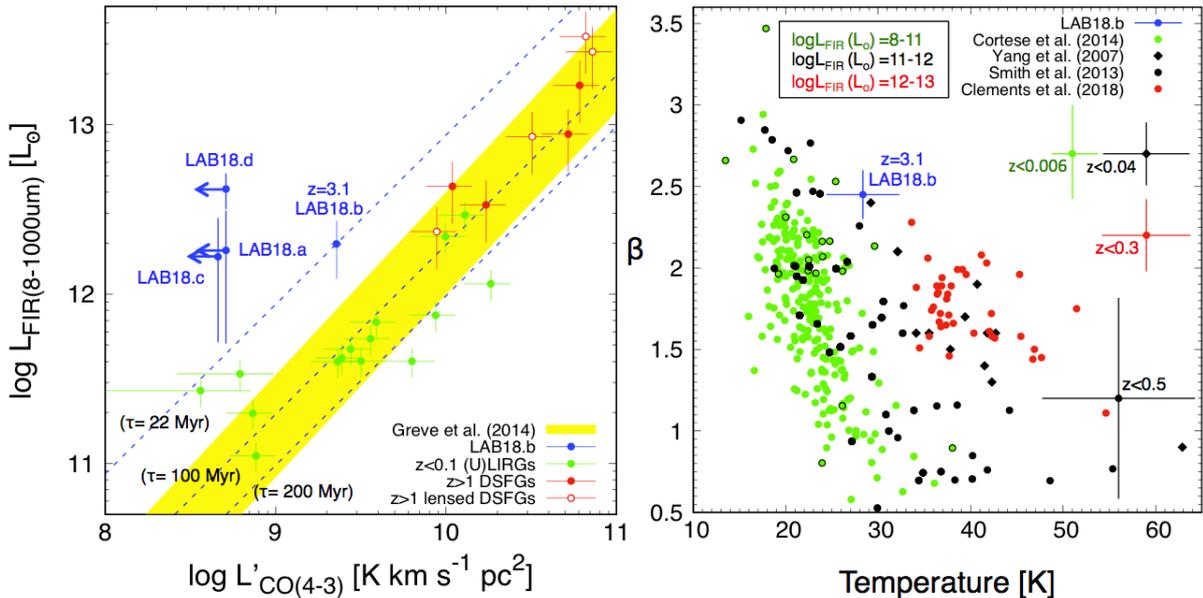


Figure 3: (左):  $L_{\text{FIR}}$  と  $L'_{\text{CO}(4-3)}$  の関係。赤方偏移 3.1 の DSFGs である LAB18.b の  $L_{\text{FIR}}$  と  $L'_{\text{CO}(4-3)}$  の関係は、近傍から遠方の典型的な DSFGs の関係よりも相対的に  $L'_{\text{CO}(4-3)}$  が小さいことを示している。解釈の 1 つとして、 $L'_{\text{CO}(4-3)}$  光度から見積もられる分子ガス質量を、 $L_{\text{FIR}}$  から見積もられる SFR で除して求められる  $\tau_{\text{dep}}$  が短いことが挙げられる。点線は、同じ仮定のもと導出されたガス枯渇時間の位置を示している。(右): アルマ望遠鏡 ( $860 \mu\text{m}$ 、 $3 \text{ mm}$ ) 及びハーシェル宇宙望遠鏡 (天体混同が激しいため、最も空間分解能の良い  $250 \mu\text{m}$  のみを使用) の測光データに対し、光学的に薄い一温度を仮定した修正黒体放射をフィットすることで、赤方偏移 3.1 で初めて  $T_d$  と  $\beta$  を決定することに成功した。各研究の誤差棒付き点は、プロット点の  $1\sigma$  のばらつきまたはフィッティングの典型的な誤差を表している。LAB18.b は、 $L_{\text{FIR}} > 10^{12} L_{\odot}$  であるにも関わらず、低い  $T_d$  と高い  $\beta$  を示すことが示された。 $\beta$  は、 $\kappa_{\nu}$  の周波数依存性であり、今後、アルマ望遠鏡によって短-長波長のダスト連続光が次々と観測されることで、近傍から遠方の様々な銀河に対しての  $\kappa_{\nu}$  への制限がついていくであろうことを示唆する。