

SXDF-UDS-CANDELS-ALMA 1.5 arcmin² survey: The multi-wavelength analysis of the 1.1 mm sub-mJy sources

山口 裕貴 (東京大学大学院 理学系研究科 M2)

Abstract

本研究では, ALMA を使った波長 1.1 mm の無バイアスサーベイ (SXDF-UDS-CANDELS 領域; P.I. Kohno) で検出された sub-mJy 天体 (観測フラックス密度 0.1 - 1 mJy 程度) の多波長解析による結果を報告する. 宇宙の星形成の進化において, ダストに隠された星形成活動というのは重要な役割を果たしている. これまでに単一鏡による大規模観測で, ダストに隠された爆発的星形成銀河 (サブミリ波銀河: SMG; 星形成率 $\sim 1000 M_{\odot}/\text{yr}$) が数多く発見され, その性質が調べられてきた. ところが, 単一鏡の観測では source confusion による感度低下のため, 宇宙の星形成活動の主役を担っているとされる一般的な星形成銀河 (星形成率 \sim 数 10 - 数 100 M_{\odot}/yr) の観測は難しい. したがって, 隠された星形成の全貌を明らかにするためには, 赤外背景光の 50% 以上を占めるこのクラスの天体 (sub-mJy 天体) を干渉計観測によって分解し, 多波長データ解析を通して, その性質を系統的に調査する必要がある. そこで本研究では ALMA 無バイアスサーベイで検出された 5 つの sub-mJy 天体について, 可視光・近赤外線 of データで対応天体を同定し, SED fitting によってその性質を調べた. 結果, 4 天体についてはそれぞれ測光赤方偏移 ($2.27^{+0.94}_{-0.87}$, $2.54^{+0.23}_{-0.51}$, $1.33^{+0.10}_{-0.16}$, $1.53^{+0.13}_{-0.18}$), 星質量 ($9.5^{+2.8}_{-7.3}$, $9.3^{+1.1}_{-6.7}$, $3.5^{+1.6}_{-0.9}$, $4.1^{+3.2}_{-2.2}$) $\times 10^{10} M_{\odot}$) そして星形成率 (42^{+297}_{-29} , 41^{+248}_{-28} , $7.9^{+13}_{-7.1}$, $30^{+72}_{-29} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$) が得られた. これらの値は, この 4 天体が main sequence に位置する星形成銀河であることを示している. 残る 1 天体は特徴的な性質を示している. 測光赤方偏移が $2.4^{+2.5}_{-2.0}$ と推察されるこの天体は, $\sim 100 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ という高い星形成率を示すにもかかわらず, $1.6 \mu\text{m}$ よりも短い波長帯では検出されていない. これは, すばる望遠鏡や VLT, Hubble 宇宙望遠鏡による既存の可視光・近赤外線探査で見逃されているダストに隠された星形成活動が ALMA によって見えてきた証拠になっている.

1 Introduction

ダストに隠された星形成活動が宇宙の星形成率密度 (cosmic SFRD) に対してどんな役割を果たしているのかという問題は, 遠赤外線 (FIR) からミリ波・サブミリ波, そして電波領域にわたる大規模サーベイの目標の一つである. 近年 Herschel 宇宙望遠鏡によって, 隠された星形成活動が $z \sim 2 - 3$ で cosmic SFRD に非常に大きな働きをしていることが分かってきた (Bouwens et al. 2010).

これまで単一鏡を用いた大規模ミリ波・サブミリ波サーベイにより, サブミリ波銀河 (SMGs; 観測フラックス密度 $S_{\nu} \gtrsim$ 数 mJy) と呼ばれる爆発的星形成銀河 (星形成率: $\text{SFR} \gtrsim 1000 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$) が多く見つかってきている (e.g. Smail et al. 1997; Tamura et al. 2009). SMGs はレアな天体であるが, 活発な

星形成活動を行なっているため, その cosmic SFRD への寄与は重要である (e.g. Casey et al. 2013). ところが, 単一鏡によるサーベイでは confusion limit のため, 宇宙で大部分を占める $S_{\nu} \lesssim 1 \text{ mJy}$ の天体を検出するのが難しい. したがって, ダストに隠された星形成活動の全貌を理解するためにはこれらの sub-mJy 天体 ($S_{\nu} \lesssim 1 \text{ mJy}$) の性質を系統的に調べなければならない.

本研究では, ALMA を用いた波長 1.1 mm の高感度・高分解能無バイアス探査 (SXDF-UDS-CANDELS 領域; Project code = 2012.1.00756.S; PI = K. Kohno) で検出した sub-mJy 天体について可視光 - 近赤外線 of データを用いた解析によって, それらの測光赤方偏移, 星質量 (M_{*}), SFR を求めた. 本要項では $\Omega_M = 0.3$, $\Omega_{\Lambda} = 0.7$ の Λ -CDM モデル宇宙論を仮定し, 等級は AB 等級を用いている.

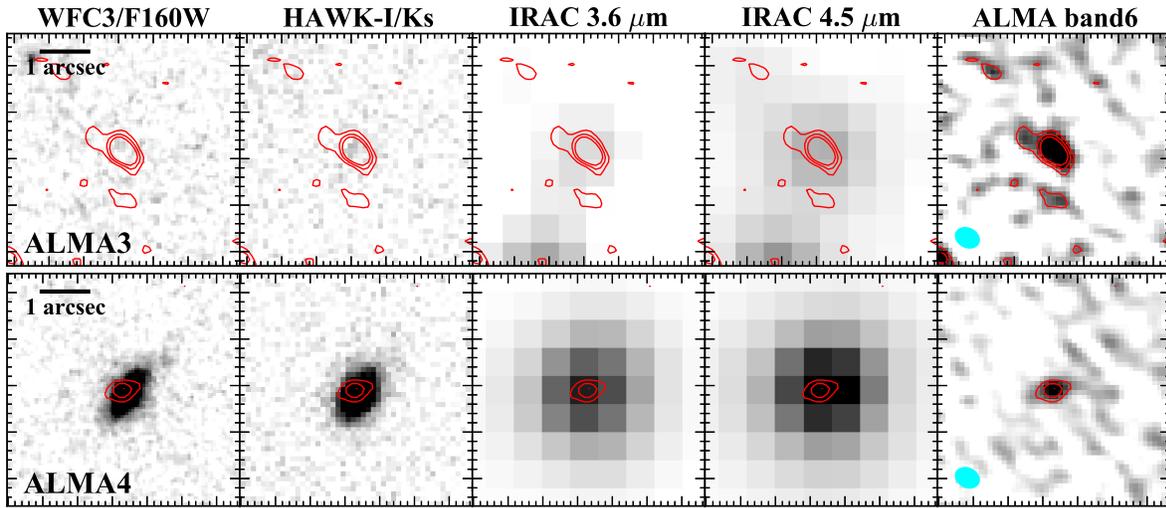


図 1: ALMA 天体の多波長イメージ . 左から右へ: *HST WFC3/F160W*, *VLT HAWK-I/Ks*, *Spitzer/IRAC 3.6 μm*, *4.5 μm*, ALMA 1.1 mm (イメージの大きさは $5'' \times 5''$) . 赤いコントアは ALMA 1.1 mm の 3σ , 5σ , 7σ レベル . ALMA 画像のシアン楕円は合成ビームを表す .

表 1: 今回多波長解析を行なう ALMA 天体

Source ID	$S_{1.1\text{mm}}$ [mJy/beam]	S/N
SXDF-ALMA1	1.689 ± 0.058	29.2
SXDF-ALMA2	0.915 ± 0.065	14.2
SXDF-ALMA3	0.838 ± 0.087	9.3
SXDF-ALMA4	0.358 ± 0.052	7.0
SXDF-ALMA5	0.283 ± 0.050	6.7

2 Multi-wavelength data

2.1 ALMA data

本研究では SXDF-UDS-CANDELS 領域の 1.5 arcmin^2 で行なわれた ALMA 1.1 mm deep continuum 探査のデータを用いる . この探査では合成ビームサイズ $\sim 0.53'' \times 0.41''$ で深さ $1\sigma \sim 0.055 \text{ mJy/beam}$ を達成している . Kohno et al. in prep では $S/N > 5$ となる天体が 5 つ検出された (表 1) . 今回はこの 5 つについて多波長データ解析を行なう . 座標等は Kohno et al. in prep を参照のこと .

2.2 Optical to NIR data

可視光 - 近赤外線 のデータを用いて検出された ALMA 天体の多波長対応天体の同定を行なう . 本研究で用いた多波長データは以下の通りである: Subaru/Suprime-Cam (B , V , Rc , i' , z' バンド); ハッブル宇宙望遠鏡 ($ACS/F606W$, $ACS/F814W$, $WFC3/F125W$, $WFC3/F160W$ バンド); VLT/HAWK-I (Y , Ks バンド); *Spitzer/IRAC* ($3.6 \mu\text{m}$, $4.5 \mu\text{m}$, $5.6 \mu\text{m}$, $8.0 \mu\text{m}$) . なお, これらは全て各望遠鏡のアーカイブデータとして公開され, 自由に利用できるデータである .

3 Counterparts and Photometry

3.1 Optical to NIR Counterparts

ALMA によって実現された高分解能観測のために, 本研究では ALMA による 1.1 mm データと可視光 - 近赤外線のデータを直接比較することができる . 図 1 には ALMA 画像とその多波長データ対応天体を示す (全ての ALMA 天体に対する画像は Yamaguchi et

表 2: SED fit によって得られた物理量

Source ID	z_{photo} (EAZY)	z_{photo} (HYPERZ)	M_* [$10^{10} M_{\odot}$]	SFR [$M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$]
SXDF-ALMA1	$2.27^{+0.94}_{-0.87}$	$2.94^{+0.45}_{-0.32}$	$9.5^{+2.8}_{-7.3}$	42^{+297}_{-29}
SXDF-ALMA2	$2.54^{+0.23}_{-0.51}$	$2.06^{+0.21}_{-0.08}$	$9.3^{+1.1}_{-6.7}$	41^{+248}_{-28}
SXDF-ALMA3	$2.4^{+2.5}_{-2.0}$	$3.1^{+3.9}_{-1.8}$	—	—
SXDF-ALMA4	$1.33^{+0.10}_{-0.16}$	$1.39^{+0.02}_{-0.02}$	$3.5^{+1.6}_{-0.9}$	$7.9^{+13}_{-7.1}$
SXDF-ALMA5	$1.53^{+0.13}_{-0.18}$	$1.63^{+0.03}_{-0.02}$	$4.1^{+3.2}_{-2.2}$	30^{+72}_{-29}

al. in prep を参照のこと) . 解析した 5 天体のうち 4 天体 (SXDF-ALMA1, 2, 4, 5) については Galametz et al. (2013) で求められた *HST WFC3/F160W* セレクトカタログに対応天体が見つかった . また , SXDF-ALMA1, 2 は $H\alpha$ emitters である (Tadaki et al. in prep) . SXDF-ALMA3 は図 1 で示してあるように *Spitzer/IRAC* 3.6 μm , 4.5 μm で明るい対応天体を持っている一方 , *WFC3/F160W* や *HAWK-I/Ks* では暗くなっている .

3.2 Photometry

本研究では IRAF を用いて直径 2" の aperture photometry を行なった . *Spitzer/IRAC* 以外の画像は FWHM=1" の PSF を採用し , *Spitzer/IRAC* の画像は分解能が最も悪い 8.0 μm のものに PSF をマッチングした . アパーチャー補正や photometric error の導出 , それぞれのバンドにおける測光結果については Yamaguchi et al. in prep を参照のこと .

4 SED fitting

4.1 The photometric redshifts calculation

本研究では , SED fitting を用いて ALMA 天体の測光赤方偏移を導出した . 今回測光赤方偏移を求めるために使用した SED fitting code は HYPERZ (Bolzonella et al. 2000) と EAZY (Bouwens et al. 2010) である . 求められた測光赤方偏移は表 2 にまとめておく . SXDF-ALMA3 は測光できた点が少ないので不定性が大きくなっている . 一方で SXDF-ALMA1,

2, 4, 5 は比較的小さい不定性で求まっている . 2 つのコードで得られた結果は不確かさの範囲内で一致しており , SXDF-ALMA1, 2 については分光赤方偏移 (Tadaki et al. in prep) と矛盾しない値が得られた . SXDF-ALMA3 の best fit SED を図 2 に示す . その他の SED は Yamaguchi et al. in prep を参照のこと .

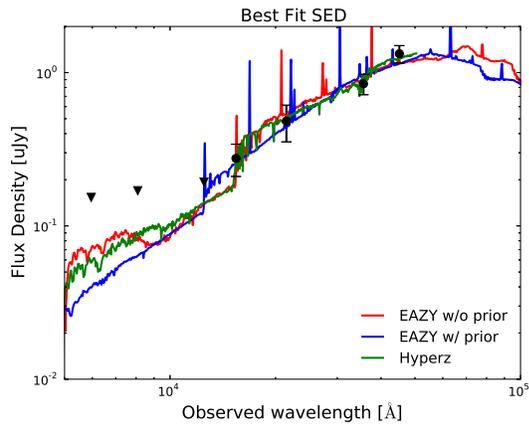


図 2: SXDF-ALMA3 の best fit SED . 三角形は 3σ limit を表す .

4.2 Stellar mass and SFR estimation

測光点が十分にある SXDF-ALMA1, 2, 4, 5 について星質量と星形成率を求めた . ここでは SED fitting code FAST (Kriek et al. 2009) を用いた . 得られた結果は表 2 にまとめておく . 仮定したパラメータは Yamaguchi et al. in prep 参照のこと .

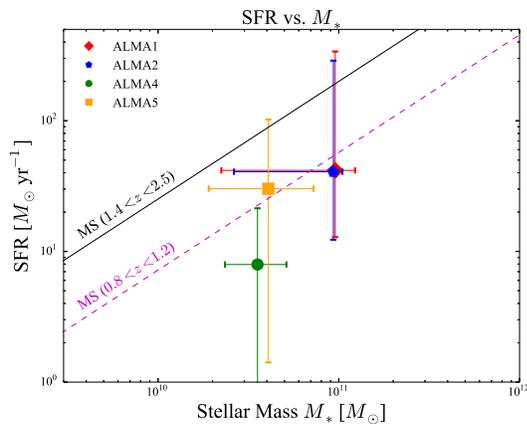


図 3: SFR vs. M_* . 黒の実線とマゼンタの実線はそれぞれ Daddi et al. (2007) と Elbaz et al. (2007) によって定義された *main sequence*.

5 Discussion

星形成銀河は星質量と星形成率に *main sequence* と呼ばれる相関があることが知られている．図 3 には SXDF-ALMA1, 2, 4, 5 について星質量に対する星形成率をプロットしている．図 3 に示された結果はこれらの ALMA 天体は *main sequence* に属する星形成銀河であることを示唆している．今回無バイアスな ALMA 探査で *main sequence* の星形成銀河が検出されたことは宇宙の星形成銀河の大部分を占める *main sequence* 星形成銀河でもダストに覆われた星形成活動が活発に行なわれていることを示している．

残る 1 天体 (SXDF-ALMA3) は特徴的な性質を示す天体である．測光赤方偏移が $z_{photo} = 2.4^{+2.5}_{-2.0}$ (EAZY) と推測されるこの天体は $SFR \sim 170 M_{\odot} yr^{-1}$ という活発な星形成を示す一方で、波長 $1.6 \mu m$ よりも短い波長では検出されていない．これは今まで行なわれてきた可視光 - 近赤外線の高い深さでは見逃されているダストに覆われた星形成銀河が ALMA によって分解され来たことを示唆している．

SXDF-ALMA3 が cosmic SFRD に与える影響は大きい．この天体が $z = 3 \pm 1$ または $z = 4 \pm 1$ に存在する場合 cosmic SFRD に与える寄与はそれぞれ $\rho(SFR) \sim 1.7^{+3.9}_{-1.4} \times 10^{-2} M_{\odot} yr^{-1} Mpc^{-3}$ と $\rho(SFR) \sim 1.9^{+4.4}_{-1.5} \times 10^{-2} M_{\odot} yr^{-1} Mpc^{-3}$ とな

り、これは紫外線で選択された銀河と同程度である (Bouwens et al. 2010).

ところが、SXDF-ALMA3 は赤方偏移の不定性が大きく、その物理的性質や cosmic SFRD に与える寄与を正確に議論することは難しい．したがって、次のステップとして JVLA や ALMA を用いた高感度の分光観測によって分光赤方偏移を決定することが必要である．われわれは ALMA Cycle 3 の観測提案に SXDF-ALMA3 の CO line survey を提案済である．

Reference

- Bolzonella, M., et al. 2000, A&A, 363, 476
- Bouwens, R., J., et al. 2010, ApJ, 709, L133
- Brammer, G., B., et al. 2008, ApJ, 686, 1503
- Casey, C., M., et al. 2013, MNRAS, 436, 1919
- Daddi, E., et al. 2007, ApJ, 670, 156
- Elbaz, D., et al. 2007, A&A, 468, 33
- Galametz, A., et al. 2013, ApJS, 206, 10
- Kohno, K., et al. in prep
- Kriek, M., et al. 2009, ApJ, 700, 221
- Snail, I., et al. 1997, ApJ, 490, L5
- Tadaki, K., et al. in prep
- Tamura, Y., et al. 2009, nature, 459, 61
- Yamaguchi, Y., et al. in prep