

ALMAを用いた高赤方偏移のダストに隠された銀河の探索とその性質の理解

野澤大河(広島大学 M1), Hiddo Algera (ASIAA), 稲見華恵 (広島大学), REBELSチーム

1. 背景・目的

初期宇宙におけるダストに隠された星形成

- 宇宙の星形成率密度は主に静止系紫外線での観測から求められている。
- ALMAやJWSTによる近年の観測から、初期宇宙における星形成率密度はダストに隠された銀河からの寄与が大きいことが示唆されている。^[2, 3, 4]
- 観測された赤方偏移が $z \geq 2$ のダストに隠された星形成銀河の多くは、静止系紫外線で事前選択されたものである。
- ALMAによる既得データの観測視野内でダスト放射を探索し、より精度よく赤外線星形成率密度を求めることを目指す。

目的：赤方偏移 $z > 1$ のダストに隠された銀河をALMAを用いて発見し、星形成率密度への寄与を調査する。

2. 観測対象

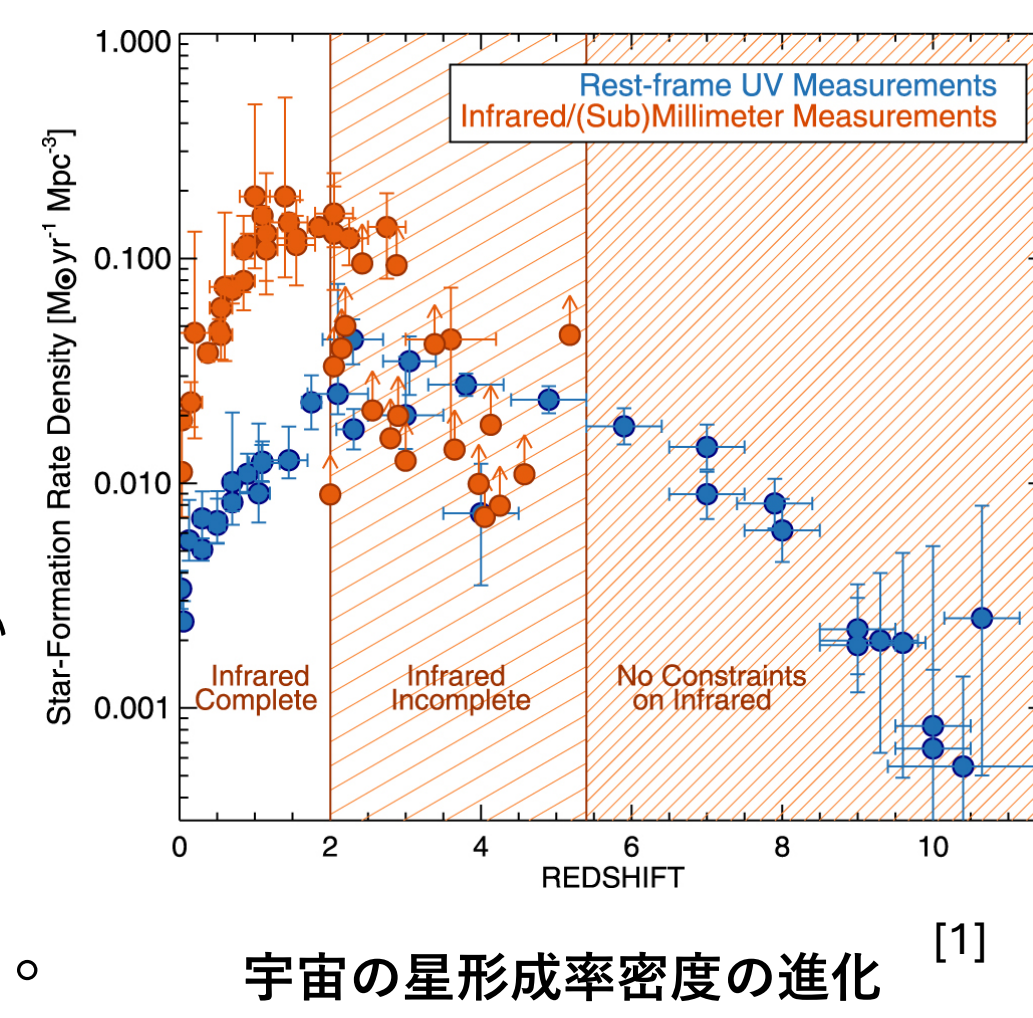
ダストを多く持ち、 $z > 1$ である銀河の探索

- 可視光線と近赤外線での検出が困難
- 観測視野の狭いALMAは大規模サーベイが困難
- ALMAの既存の観測データに対してブラインドサーベイを行う。

REBELS領域におけるブラインドサーベイ

Reionization Era Bright Emission Line Survey (REBELS)^[5]

- ALMA Cycle7の大型観測プログラムの一つ
- Band6を用いて波長 ~ 1.2 mmの連続光と輝線を観測
- 49個のターゲット：紫外線で明るく($M_{UV} < -21.3$ mag)、 $z_{photo} > 6.5$ の銀河
- 観測視野内のREBELSターゲットではない銀河を探索する。



宇宙の星形成率密度の進化^[1]

3. ダスト放射天体の検出

ソフトウェア

Python Blob Detector and Source Finder (PyBDSF)^[6]

- 画像に2次元ガウシアンをフィットして天体を抽出
- 検出に特に影響のあるパラメータ
- $pSNR$, $iSNR$: 背景光を基準としたしきい値

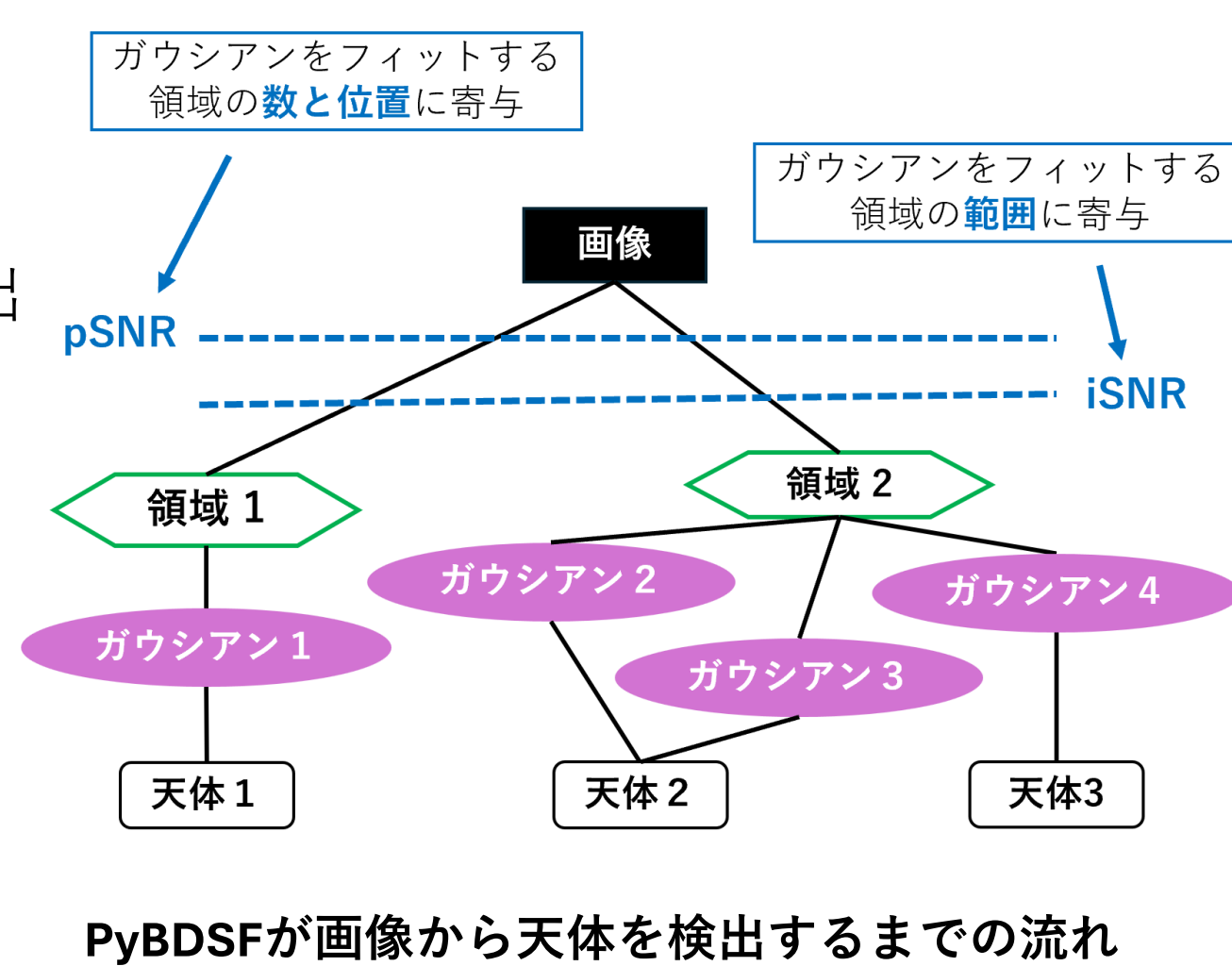
検出条件

- 様々な($pSNR$, $iSNR$)での検出の信頼性を評価
- 検出された天体の信頼度 p

$$p \equiv \frac{N_{pos} - N_{neg}}{N_{pos}} \geq 0.95$$

- N_{pos} : 通常画像における検出数
- N_{neg} : 反転画像における検出数

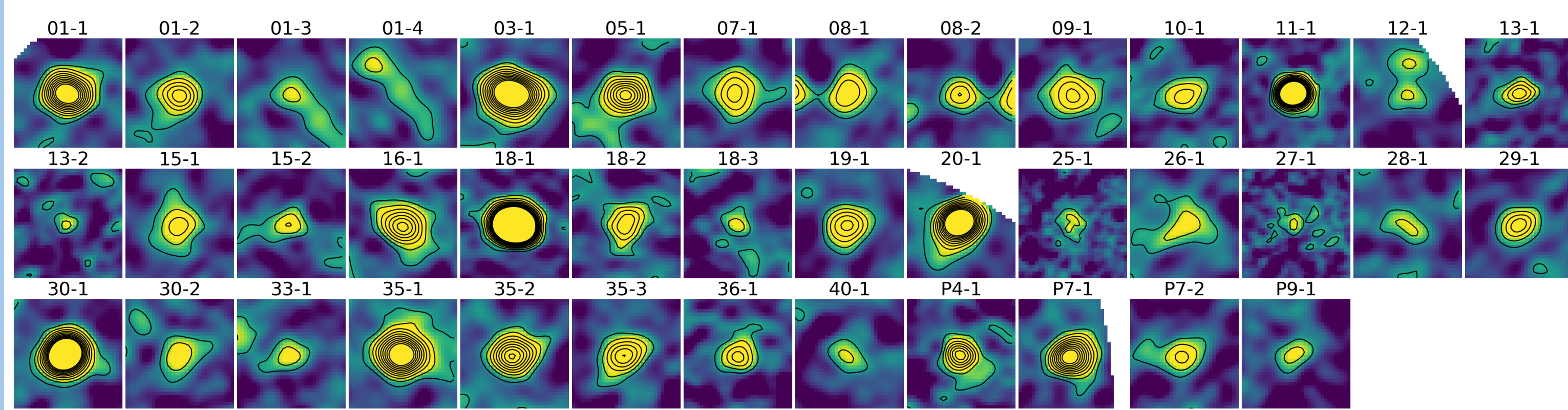
- $p \geq 0.95$ @ $pSNR \geq 4.5$
- 検出に用いた組み合わせ:
($pSNR$, $iSNR$) = (4.5, 3.0)



PyBDSFが画像から天体を検出するまでの流れ

結果

- 28枚の画像から**40天体**を検出することに成功した。



検出したダスト天体の切り抜き画像 (5" x 5"). コントアは2σから20σまでの2σ間隔。

4. SEDフィッティングの設定

可視光線、近赤外線データ

HSC-SSP DR3, Subaru COSMOS 20, UVISTA DR5, VIDEO DR5, CFHTLS, UDS DR11, S-COSMOS, SERVS^[7-14]

各物理量の事前確率分布 (一様分布を仮定)

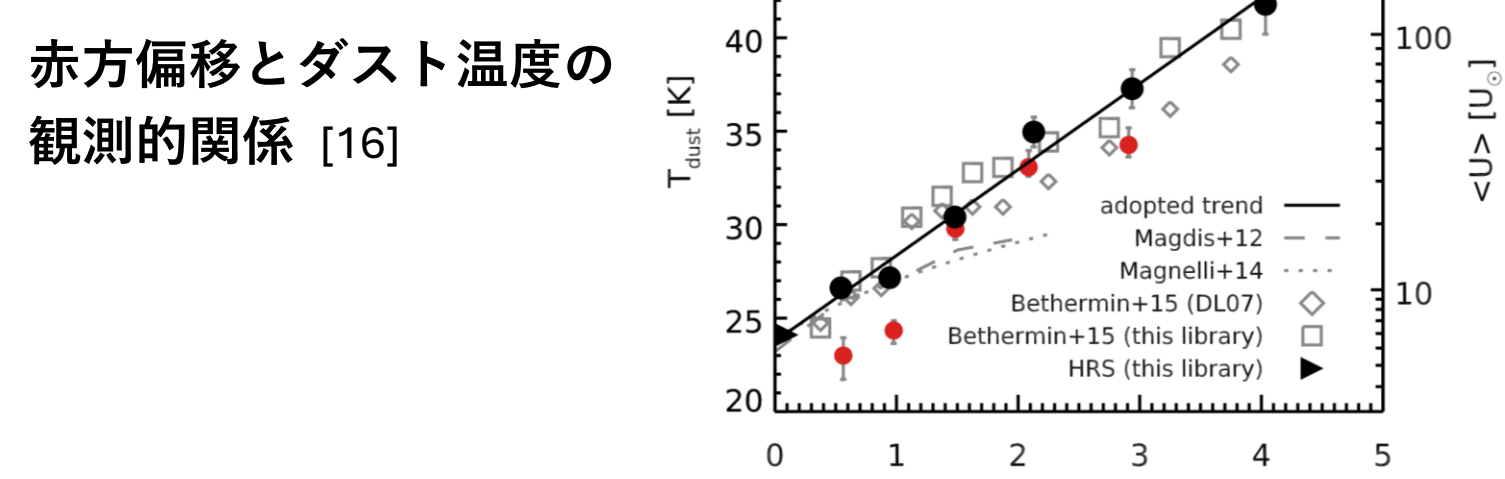
パラメータ	範囲	単位
赤方偏移 (z_{photo})	[0, 10]	
形成された恒星の総質量 ($M_{*,t}$)	[6, 13]	$\log_{10}(M_{*,t}/M_{\odot})$
金属量 (Z)	[0, 2.5]	Z_{\odot}
星形成開始からの経過時間 (Age)	[0.01, 10]	Gyr
星形成の減衰のタイムスケール (τ)	[0.01, 10]	Gyr
Vバンドにおけるダスト減光 (A_V)	[0, 4]	magnitude

赤方偏移、星質量、ダスト減光の推定

- ソフトウェア: BAGPIPES^[15]
- 星形成史: delayed- τ モデル
- ダスト減光: Calzetti et al. (2000)
- 全測光データに対してフィット

赤外線光度の推定

- 修正黒体放射 (MBB) を仮定
- ALMA/Band6のフラックスにスケール
- ダスト温度: $32.9 + 4.60(z - 2)$ [K]^[16]
- エミッシビティ: $\beta = 2.0$



赤方偏移とダスト温度の観測的關係^[16]

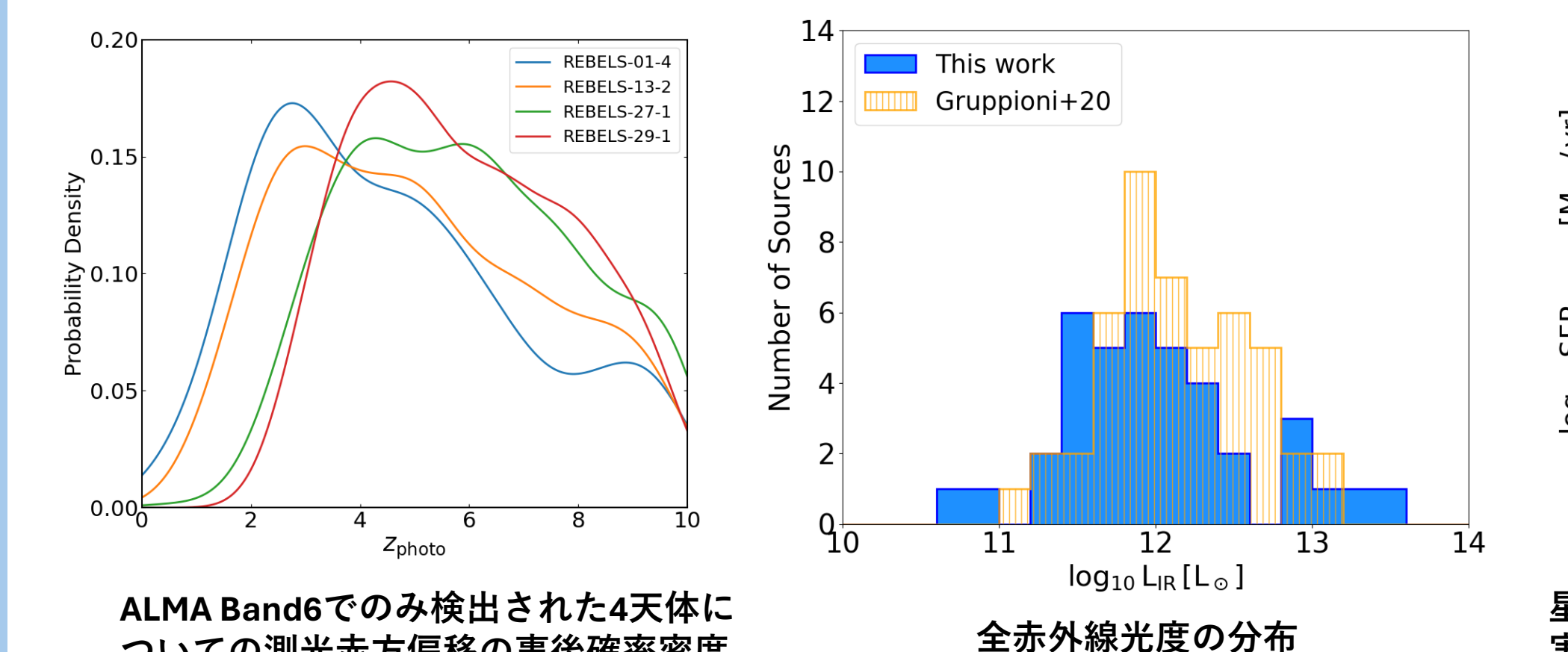
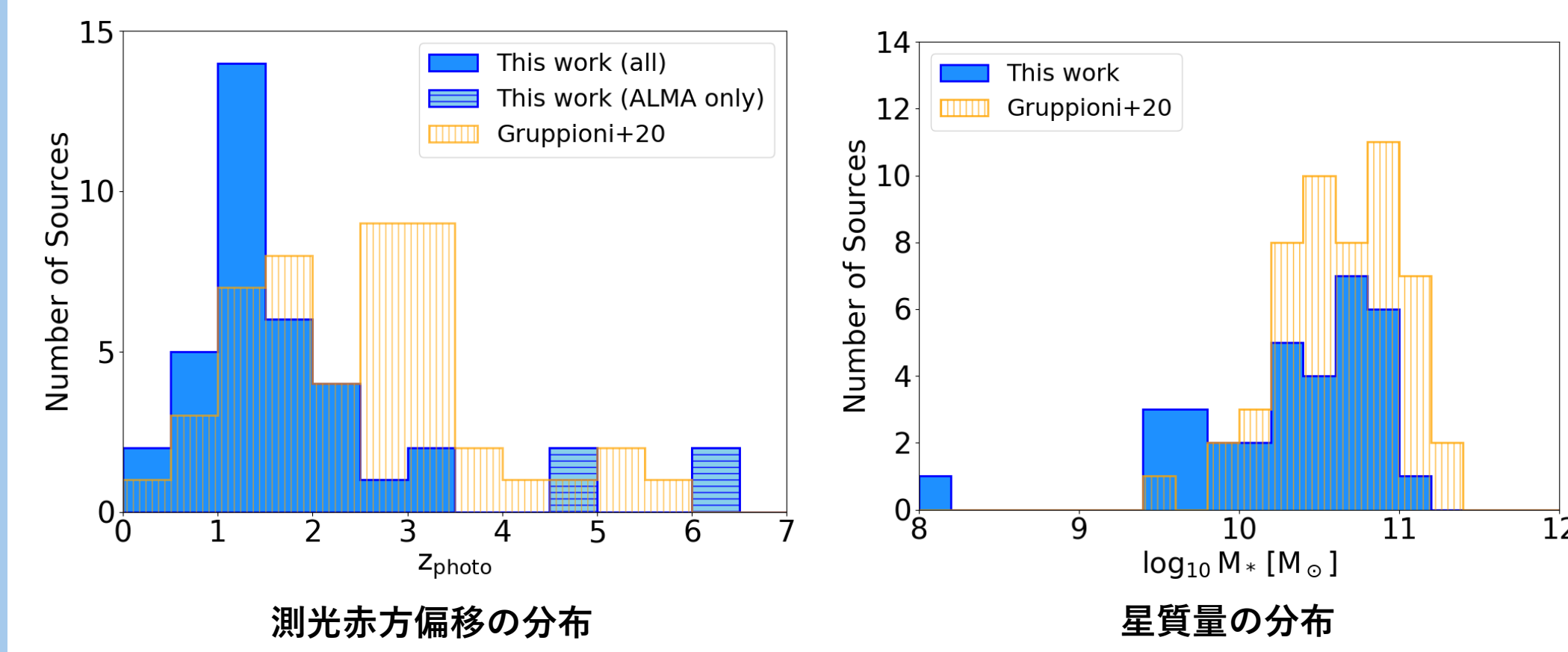
7. まとめ

- ALMAの既存データを用いたブラインドサーベイによりダスト放射が見られる銀河を**40個**検出した。
- ALMAでのみ検出された4天体は $z_{photo} > 4$ である可能性が高く、初期宇宙でダストに隠された未発見の赤外線銀河が存在することを示唆する。
- 32天体が $L_{IR} > 10^{11} L_{\odot}$ をもつ高光度赤外線銀河であった。

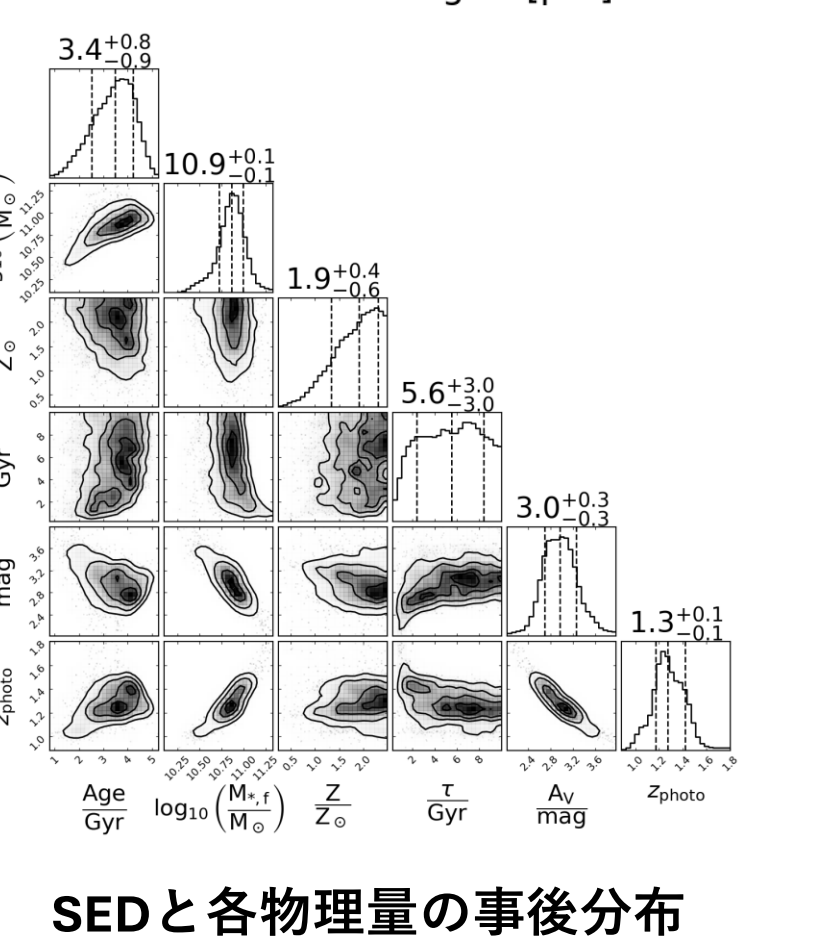
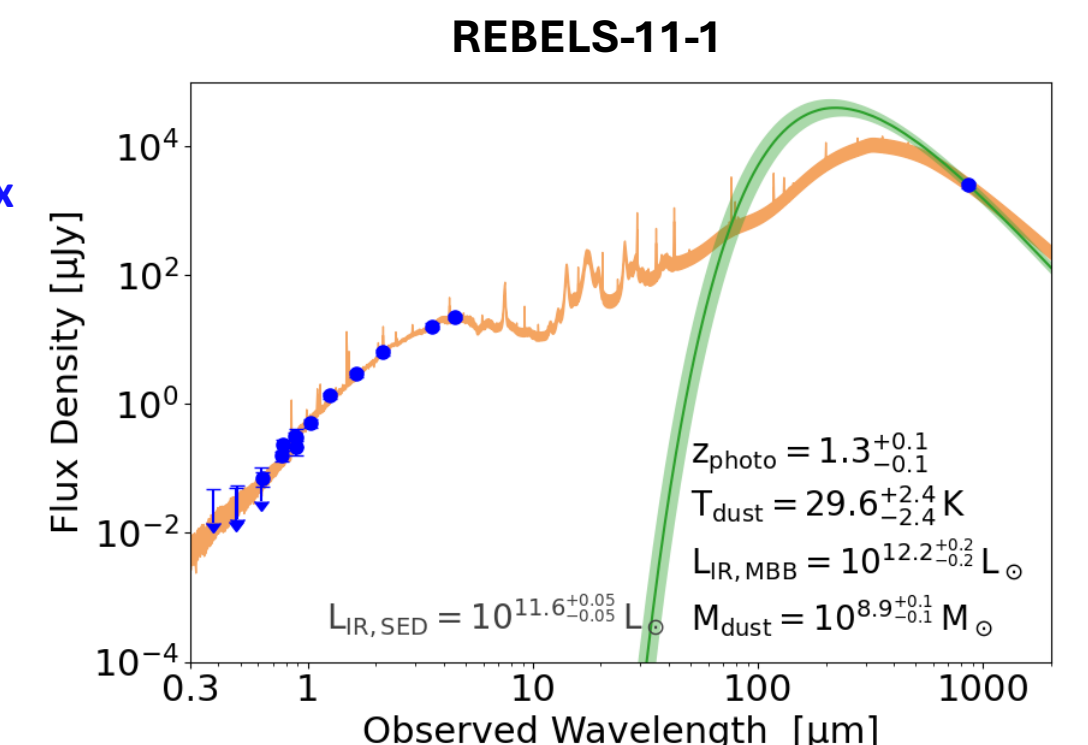
5. ダスト放射天体の性質

SEDフィッティングの結果

- モデルフィットを行った38天体のうち、27天体が $z_{photo} > 1$ であることが分かった。
- ALMA Band6でのみ検出された4天体は $z_{photo} > 4$ である可能性が高く、新発見の赤外線銀河である。
- 全赤外線光度が $L_{IR} > 10^{11} L_{\odot}$ である高光度赤外線銀河は32天体であった。



ALMA Band6でのみ検出された4天体についての測光赤方偏移の事後確率密度分布

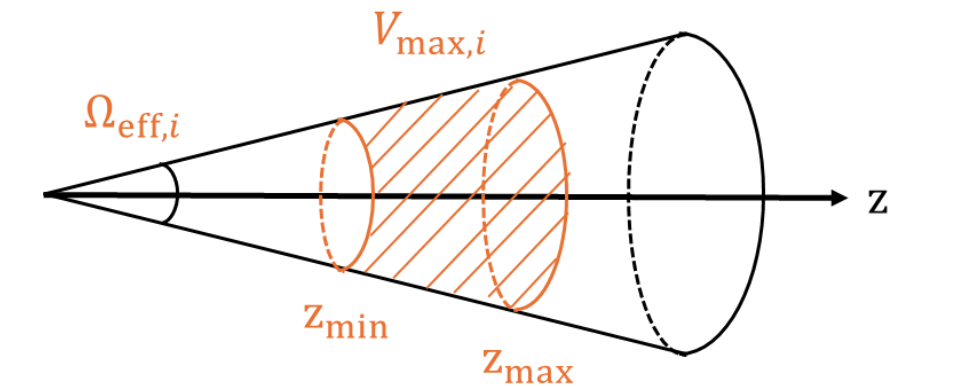


SEDと各物理量の事後分布

6. 赤外線星形成率密度

検出した天体に対するサーベイの有効面積

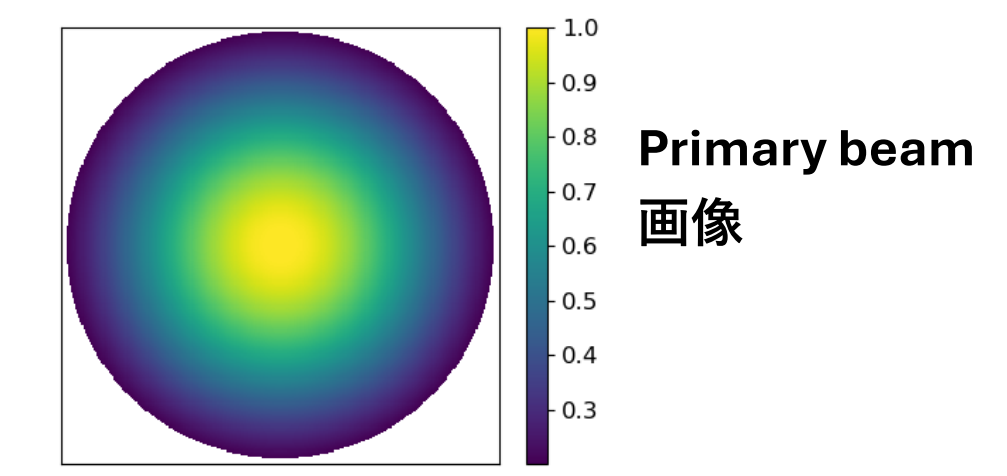
- 光源をランダムに画像に注入し、その復元率を計算することで、天体のフラックス、サイズ、画像上の位置を変数とするcompletenessを求める。
- Completenessと各視野のprimary beam画像を用いて、有効面積 Ω_{eff} を算出する。



天体 i の検出可能な最大体積と有効面積の関係の模式図。 $\Omega_{eff,i}$ は有効面積。

赤外線光度関数

- $1/V_{max}$ 法により推定
- 各天体の検出可能な最大体積 (V_{max}) の逆数の和を計算することで求める方法



$$\phi_{IR}(L, z) \Delta L = \rho(L, z) = \sum_i \frac{1}{V_{max,i}}$$

赤外線星形成率密度

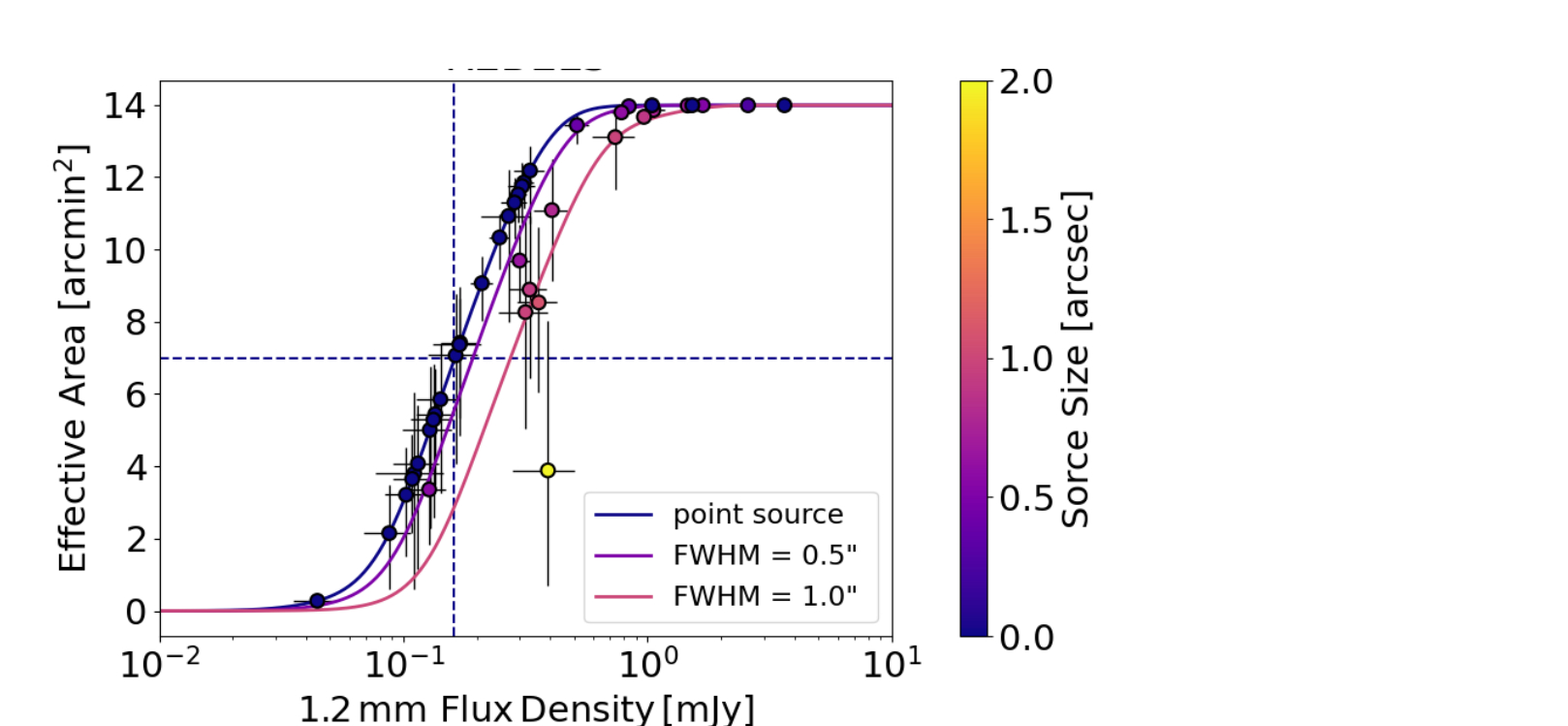
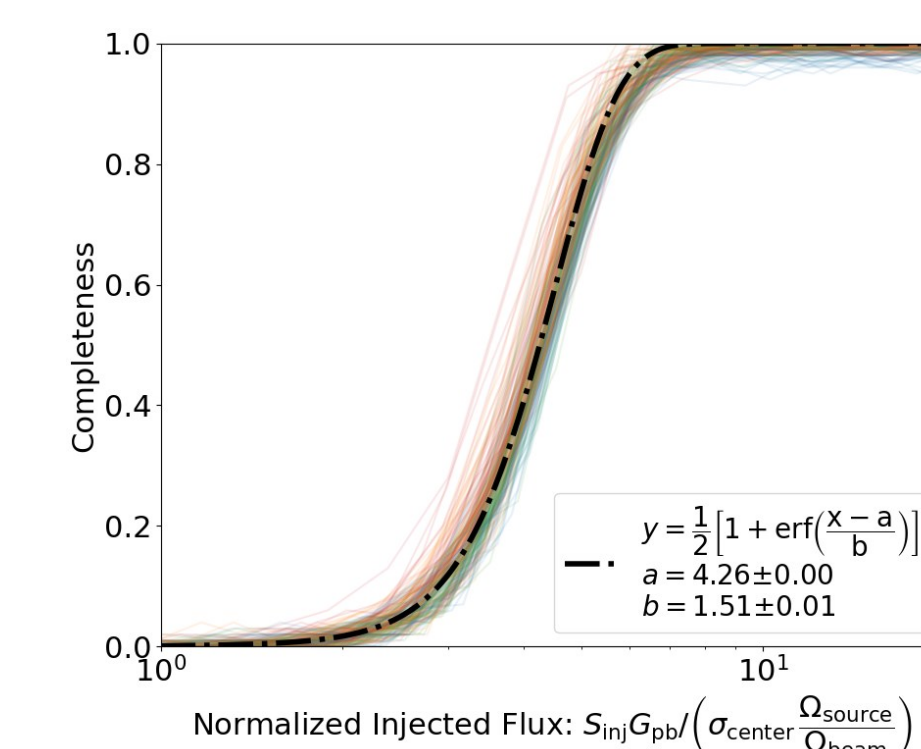
- 赤外線光度関数の積分から赤外線星形成率密度を算出

$$V_{max,i} = \int_{z_{min}}^{z_{max}} \Omega_{eff,i} dV$$

$$\Omega_{eff,i}(S_i, \theta_i) = \sum_{pointings} \iint C(S_i, \theta_i, x, y) d\Omega$$

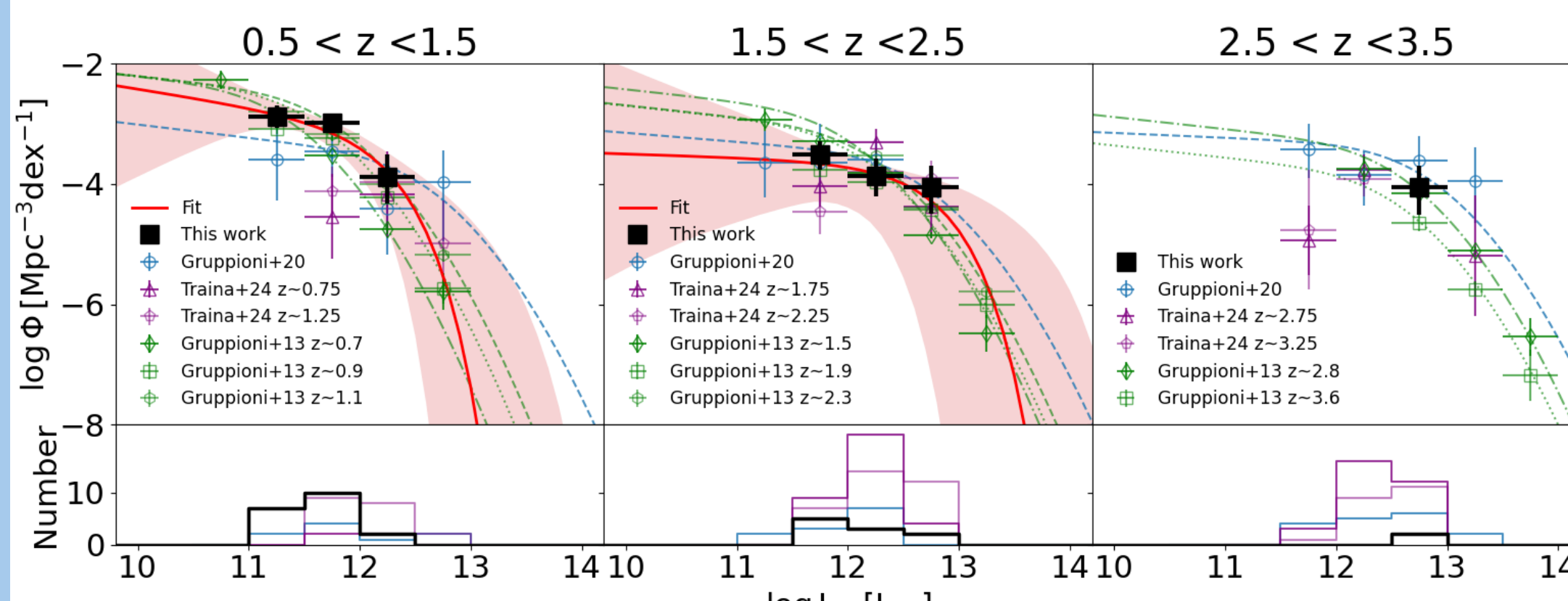
結果

- 点源の天体はフラックスがおおよそ > 1 mJyで有効面積がサーベイ全体の面積に匹敵
- $0.5 < z < 1.5$ において、 $L_{IR} \sim 10^{11} L_{\odot}$ へ小さくなるにしたがって、光度関数は $\phi \sim 10^{-3} \text{ Mpc}^{-3} \text{ dex}^{-1}$ まで増加することが確認できた。
- $1.5 < z < 2.5$ でも同様の傾向が見られ、将来の遠赤外線大型サーベイに期待できる。



モンテカルロ法で求めたcompletenessとフィットした関数

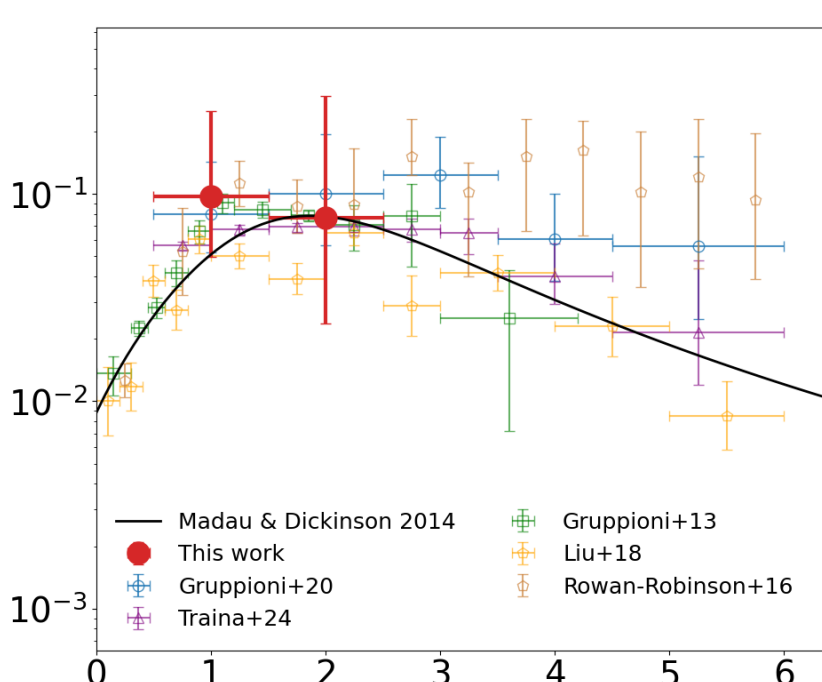
検出したダスト天体に対する有効面積



各赤方偏移における赤外線光度関数。赤線はフィットしたシェヒター関数を示す。

赤方偏移	$\log_{10} \phi$ [$\text{Mpc}^{-3} \text{ dex}^{-1}$]	$\log_{10} L$ [L_{\odot}]	α
$0.5 < z < 1.5$	$-3.0^{+0.6}_{-1.2}$	$12.0^{+0.9}_{-0.6}$	$-0.3^{+1.2}_{-0.6}$
$0.5 < z < 1.5$	$-3.6^{+0.5}_{-0.8}$	$12.6^{+0.9}_{-0.8}$	$-0.1^{+1.1}_{-0.7}$

シェヒター関数の各パラメータの事後分布



赤外線光度関数を積分して求めた赤外線星形成率密度*
*Madau & Dickinson (2014) は全星形成率密度。

- $z \sim 1$ において、 $L_{IR} \sim 10^{11} L_{\odot}$ へ小さくなるにしたがって、光度関数は $\phi \sim 10^{-3} \text{ Mpc}^{-3} \text{ dex}^{-1}$ まで増加することが確認できた。
- 将来の遠赤外線サーベイ (PRIMAなど) による、高赤方偏移における低光度銀河の統計的研究と高光度銀河のさらなる発見が期待される。

[1] Casey et al., 2018, ApJ, 862, 77 [2] Gruppioni et al., 2020, A&A, 643, A8 [3] Algera et al., 2022, MNRAS, 518, 6142 [4] Fudamoto et al., 2021, Nature 597.7877, 489 [5] Bouwens et al., 2022, ApJ, 931, 160 [6] Mohan et al., 2015, ASCL, record ascl:1502.007 [7] Aihara et al., 2022, PASJ, 74, 247 [8] Taniguchi et al., 2015, PASJ, 67, 104 [9] Moneti et al. (2023) [10] Jarvis et al., 2013, MNRAS, 428, 1281 [11] Almaini et al. in prep. [12] Sanders et al., 2007, ApJS, 172, 86 [13] Mauduit et al., 2012, PASP, 124, 714 [14] Carnall et al., 2018, MNRAS, 480, 4379 [15] Schreiber et al., 2018, A&A 609, A30 [16] Schreiber et al., 2014, A&A 575, A74