

高感度 ALMA 観測で探る暗い SMG の統計的性質

藤本 征史 (東京大学大学院 理学系研究科天文学専攻 M1)

Abstract

本研究では ALMA アーカイブデータを用い、従来では捉えられていなかった「暗い」側も含めた Submillimeter Galaxies (SMGs) の統計的性質について報告する。本研究で使用したアーカイブデータは Band6(211-275GHz \simeq 1.2mm) の高感度連続波観測、計 27 視野分である。そこから 1mJy 以下の暗い 26 の SMGs を検出、1mJy 以上の SMGs の Number Count と合わせ、より正確に 1mm 帯での個数密度を求めることに成功した。この結果を用いると、宇宙系外背景光に対して 0.1-10.0mJy の SMGs は \simeq 50% ほどの寄与があり、100% までの寄与を考えると暗い SMGs の faint end は \simeq 0.06mJy だと見積もられる。また PACS100 μ m の観測により得られている光度関数について、赤方偏移別に 1mm 帯の個数密度へ変換したものを比べると、1mm 帯の個数密度に含まれる銀河は、高い赤方偏移のものがより支配的である傾向が見られた。最後に、今回得られた暗い側も含めた SMGs (0.1-10.0mJy) による宇宙ダスト密度を見積ると、 $\simeq 5.5 \times 10^{-6}$ となった。

1 Introduction

Submillimeter Galaxies (SMGs) は 100-1000 M_{\odot}/yr 程度の高い星形成率を持つ大質量の遠方銀河として知られ、宇宙初期の星形成、Metal-enrichment、銀河形成を考える上で重要とされる (e.g., Baugh+2005)。一方、宇宙初期におけるそのような明るい SMGs の実際の宇宙星形成率密度への寄与は \simeq 20% とされるなど (Swinbank+2013)、決して支配的ではなく、個数密度に関してより多く存在するとされる暗い SMGs の寄与も考えてやることが重要である。しかし現在に至るまで、観測の感度の問題もありこの暗い SMGs についてはあまり研究されていない。つまり星形成率が 100 M_{\odot}/yr 以下の暗い SMG についてはその個数密度や宇宙系外背景光への寄与など良くわかっていないのである。

この問題を解決するため、我々は高感度 ALMA 観測で得られたアーカイブデータを利用した。合計 27 視野分の 1mm 帯のデータから 1.0mJy 以下の暗い SMG を 26 個検出し、これらを元に個数密度を求めたところ 20 M_{\odot}/yr 程度の暗い SMG までの Number Count を得た。本研究ではこの暗い側までも含めた個数密度をもとに、これらがもたらす統計的な性質について紹介する。また宇宙ダスト密度の見積もりから暗い SMGs を含めた銀河形成の描像について見ていきたい。

2 Methods

2.1 Sample Selection

ALMA Band6 連続波観測のアーカイブデータから以下の基準を以て対象を選出した。

1. Integrated time \geq 100 s
2. Primary beam \geq 25% area
3. No QSO nor AGN in map
4. Source S/N \geq 3.8 σ

(1)「暗い」SMGs をターゲットとするため深いデータが必要となる。(2)電波望遠鏡は 1 つのアンテナサイズに基づいた Primary Beam と言われる、視野中心からの距離に応じて感度が落ちる性質を持っている。感度が落ちればその分、systematic なノイズが増える。図 1 の白線が感度として 0%、点線が 25% の等高線であり、点線の内側が今回対象とした感度 \geq 25% の領域となる。(3)観測視野内に非常に明るい天体が入ると、電波観測におけるビームパターンに基づいた side lobe の影響で calibration 処理後も偽天体が多く残った撮像画像となることがあるためである。(4)S/N の関数としての実際使用した撮像データから False detection rate とモンテカルロ・シミュレーションに基づき Completeness(後述) を求め、False detection が 1.0 を下回る 3.8 σ を、今回 faint SMGs 選択の基準とした (図 2)。

これらの基準により、最終的に 27 視野分のデータを用いて計 26 の暗い SMGs を検出した。用いた ALMA データの Project ID は以下である。2011.0.00243.S, 2011.0.00115.S, 2011.0.00648.S, 2011.0.00767.S, 2012.0.00602.S.

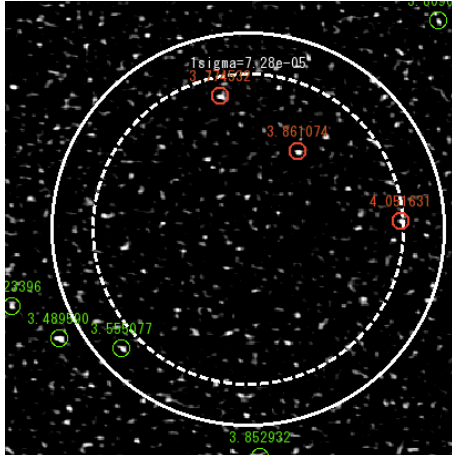


図 1: 実際の検出の様子。白線が Primary beam の感度が 0%、点線が 25% の等高線。緑丸が map 全域において 3σ 以上のもの、その中で上述した基準をクリアし最終的に faint SMGs として検出されたものが赤丸で記されている。各丸の上に記される値はそれぞれの S/N であり、 1σ の単位は Jy である。

2.2 Number Density

図 1 のように最終的に faint SMG として検出された天体数から個数密度を導くとき、それぞれの S/N において、その天体が検出される確率 (Completeness) とその天体が偽天体である確率 (False detection rate) の効果を考えた有効個数から個数密度を導いてやらないといけない。有効個数と個数密度は以下で表される。

$$N_{eff}(S) = \frac{1 - f_c(S/N)}{C(S/N)}$$

$$D(S) = \frac{\sum N_{eff}(S)}{A_{eff}(S)}$$

S がソースフラックス、 $N_{eff}(S)$ が有効個数、 $f_c(S/N)$ が false detection rate、 $C(S/N)$ が Completeness、 $A_{eff}(S)$ がサーベイ領域を表す有効面積、D(S) が最終的な個数密度である。適当にビンングをしてやるので Σ がついていない。ここで false detection rate と Completeness は各 map 上での S/N の関数として表されるのに対して、有効面積や最終的な個数密度はソースフラックスの関数として表される。false

detection rate は図 2 左軸で表される Average false detection number が 1 以下となる部分を割合として対応させた。

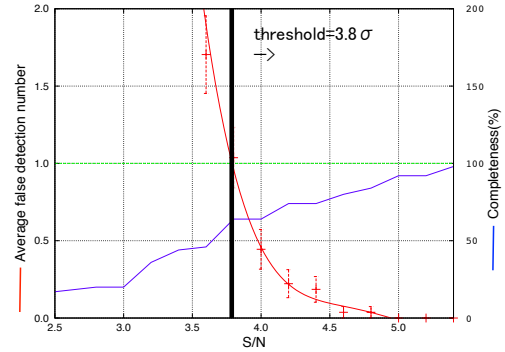


図 2: S/N vs Average false detection number(左軸、赤線)、Completeness(右軸、青線)。左軸: 使用した全 27 視野それぞれの撮像画像にマイナスをかけたノイズのみのマップで同じ条件で検出かけてやり各 S/N でビンングしてやると、S/N の関数としての偽天体の検出個数を求められる。それを使用した視野数 27 で割ると、各 S/N における 1 視野あたり平均的に存在する偽天体の個数となる。右軸: 各撮像画像上に人口天体をランダムな位置に埋め込んでやり、それが検出されるかどうかの試行を繰り返すことで各 S/N に応じた検出確率が求まる (モンテカルロ・シミュレーション)。

3 Results

こうして得られた 1.2mm における個数密度は以下である (図 3)。

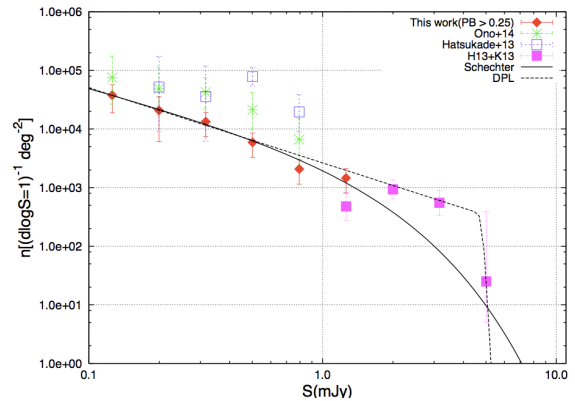


図 3: 1.2mm におけるソースフラックス vs 個数密度

赤点で記されるのが今回の結果であり、紫点で表される Hodge et al. 2013 (H13) や Karim et al. 2013 (K13) で示されている 1mJy 以上の Number Count と合わせて、Schechter 関数・Doble power law (DPL) 関数でフィッティングしてやったのがそれぞれ黒線と破線である。今回の結果は Hatsukade et al. 2013 や

Ono et al. 2014 での結果よりも多くの領域を用いたので誤差幅は小さくなっているが系統的に小さい値となってしまう。理由として Hatsukade+13 では 1 視野内で用いたサーベイ領域が Primary beam $\geq 50\%$ と小さいことから Cosmic variance の影響や、Ono+14 では Sample Selection において (3) の項目がなく偽天体を多く含めてしまっているためなど考えられるが、まだ詳しい検証が必要である。ともあれ、今回求められた個数密度としてフィッティングした関数を用いながら、以下議論をしていく。

4 Discussion

4.1 Contribution to the EBL

個数密度の図からすぐに得られる物理量として、個数密度をあるソースフラックスの範囲で積分してやり、宇宙の背景放射の中でどこまでの寄与を持っているか考えてやることができる。そこで 1.2mm の個数密度において、あるフラックス以上 (Slimint) の銀河達の宇宙系外背景光観測 (Extragalactic Background Light - EBL; COBE の観測により全強度が求められている。) に対する寄与を図 4 に載せた。

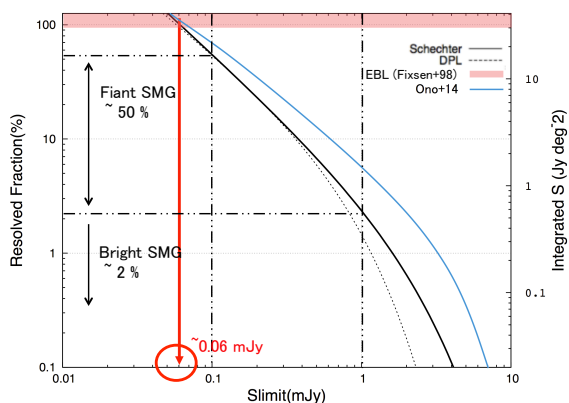


図 4: 積分時の暗い側の端 (Slimint) vs EBL への寄与 (左軸)・積分した値 (右軸)

1 mJy での垂直な破線が H13&K13 の研究で見えていた 1mJy までの SMGs の寄与であり、図よりそのような明るい SMGs の EBL への寄与は高々数%であることがわかる。一方、今回観測で見られた 0.01 mJy までの暗い SMGs も含めた寄与を見てみると左側の破線の対応するところから、 $\approx 50\%$ が暗い SMGs の寄与であることがわかる。やはり全体への寄与を考えたとき、暗い SMGs の占める割合は大きいので

ある。またそのまま Slimint を下げ続けると、EBL への寄与がやがて 100% に到達する。これは暗い SMGs の faint end を示唆しており、図より ≈ 0.06 mJy だと見積られる。この値は今後 ALMA のアンテナの台数が増え、より深い観測データが増えれば、そのような個数密度の減少を示す最も暗い SMG の発見もできるかもしれない。銀河形成を考える上でこのように暗い側を追う研究を続ける意義はでかい。もちろん、ここで出した 0.06 mJy という値は図 4 における積分値の傾きの多少の変化で大きく変わってくるので、だからこそ個数密度において暗い側の傾きを正しく捉えてやるのが大事なのである。

4.2 Redshift Distribution

ここでは暗い側も含めた SMGs の赤方偏移分布について考えてみる。実は 1mm 帯で受かる SMGs の赤方偏移分布については既に研究が進んでいるところでもある。例えば Yun et al. 2012 では AzTEC 1.1mm で受かった SMGs に対して多波長データを用いて対応天体について調べ、その z_{photo} から赤方偏移分布を出し、 $z \approx 1-5$ 、 $\langle z \rangle \approx 2.6$ 、という結果を得ている。しかしこれは Introduction でも述べたが、明るい SMGs についてのみであり、今回求めたような暗い SMGs に対して同じように適用できるかはわからない。

そこで今回、私達は PACS 100 μ m の観測から得られている光度関数 (Magnelli et al. 2013) に着目した。PACS 100 μ m は 1mm 帯と同じく銀河のダスト放射を捉えていながら波長が短いので、その分他の遠赤外線を受ける観測器よりも高分解能 ($\approx 7''$) を実現している。よって、その観測により得られた個数密度、並びに光度関数は今回 ALMA の 1mm 帯で捉えた個数密度と同じものを捉えられているかもしれない。ダスト放射の Spectral Energy Distribution (SED) として graybody を仮定し、赤方偏移別にある光度関数でそれぞれ中心赤方偏移を一意に決めてやれば、次の式を用いてそれぞれの光度関数を 1.2mm での個数密度に焼き直すことができる。

$$S_{obs} = \frac{L_{IR}}{4\pi\Gamma(\beta+4)\zeta(\beta+4)D_L^2} \times \frac{1}{\chi^{-(\beta+4)}(e^\chi - 1)\nu_{obs}}$$

PACS 100 μ m の観測では K 補正の影響で高い赤方偏移 ($z > 3$) の銀河は受かりにくい性質を持ってお

り、Magnelli+13 は検出された天体を多波長での対応天体同定、 z_{photo} の見積りを経て $z \simeq 0-2.3$ で赤方偏移別に 6 つの光度関数に分けた。今回は簡単な比較のため、その 6 つの中で低い赤方偏移である $z \simeq 0.4-0.7$ と最も高い赤方偏移となる $z \simeq 1.8-2.3$ の 2 つの光度関数を 1.2mm での個数密度に変換した。その結果が以下である (図 5)。

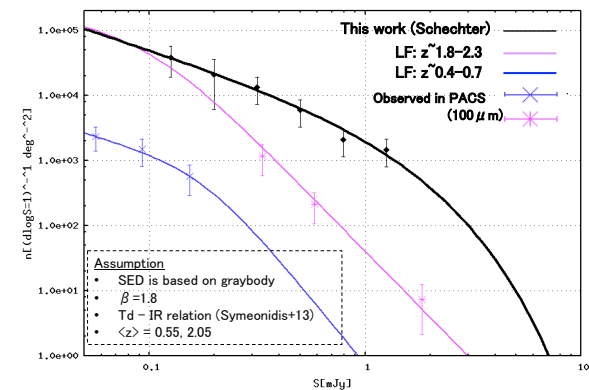


図 5: $z \simeq 0.4-0.7$ (青線), $1.8-2.3$ (紫線) の光度関数の 1.2mm における個数密度への寄与

図の左下に用いた仮定をまとめた。またダスト温度に関しては赤外光度とダスト温度に関する関係 (Symeonidis et al. 2013) を用いた。図から明らかのように 2 つの赤方偏移を比べたところ、高い赤方偏移を持った銀河の寄与の方が 1.2mm の個数密度において大きい傾向がわかる。今回は手始めとして 2 つの赤方偏移しか比べなかったが、今後は 6 つの赤方偏移分の光度関数を全て変換してやり、それぞれの寄与を足し合わせることで、 $z < 2.3$ までの銀河が 1.2mm の個数密度においてどこまで支配的かを調べ、赤方偏移分布に制限をつけていく予定である。

4.3 Cosmic Dust Abundance

最後に 4.1, 4.2 の議論の結果も踏まえながら、今回求められた暗い側も含めた SMGs の宇宙ダスト密度を見積る。仮定として、4.2 の結果より今回は Yun+12 の赤方偏移分布に従うものとして、赤方偏移は一意的に全て $z = 2.6$ 、密度として共動体積を見る上では $z = 1-5$ の幅で考えることにする。この下で 4.2 と同様の仮定で次の式を用いながら、1.2mm の個数密度をダスト質量関数に変換する。

$$S_{\nu_{obs}} = \kappa_{\nu} B_{\nu_{rest}}(T) M_{dust} D_L^{-2}$$

そして、今回観測できた 0.1 mJy から 10.0 mJy ま

で対応するダスト質量の幅で積分してやることで宇宙ダスト密度を $\simeq 5.5 \times 10^{-6}$ と求めた (図 6)。

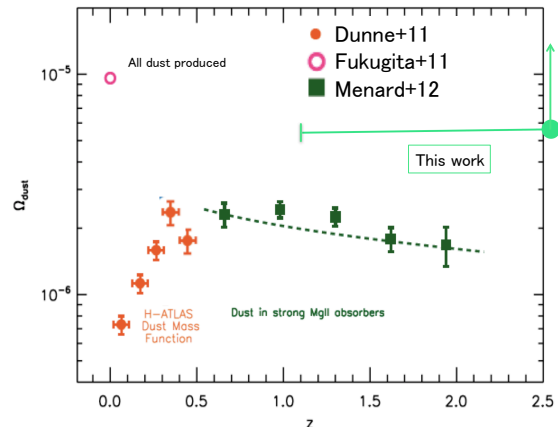


図 6: Cosmic dust abundant (Menard et al. 2012)

4.1 で見たように SMGs の faint end は 0.1 mJy よりも低いと考えられるので今回得られたのは 1mm 帯で受かる銀河の持つダスト密度に関して下限値である。Menard+12 はキューサー放射の Mg II の吸収線から銀河間ダストの密度を求めており、これと比べると今回求めた銀河にロックされているダスト量の方が宇宙全体において大きいことがわかる。今後、4.2 で述べたように赤方偏移分布に制限をつけることでより正確にこの値を求め、銀河のアウトフローや銀河間 Metallicity と合わせながら銀河進化について研究していきたい。

Reference

- Baugh, C. M. et al. 2005, MNRAS.356.1191B
- Cooray, C. M. et al. 2014, arXiv1402.1456C
- Dunne, L. et al. 2011, 2011MNRAS.417.1510D
- Fixsen, D. J. et al. 1998, ApJ...508..123F
- Fukugita, M. 2011, arXiv1103.4191F
- Hatsukade, B. et al. 2013 ApJ, 769, L27
- Hodge, J. A., et al. 2013, ApJ, 768, 91
- Karim, A., et al. 2013, MNRAS, 432, 2
- Magnelli, B. et al. 2013, A&A...553A.132M
- Menard, B., & Fukugita, M. 2012, ApJ...754..116M
- Ono, Y. et al. 2014. arXiv:1403.4360
- Symeonidis, M. et al. 2013, MNRAS.431.2317S
- Swinbank, M. et at. 2013, arXiv1310.6362S
- Yun, M. S. et al. 2012, MNRAS.420..957Y