

ダストに埋もれた銀河の “人口調査”

廿日出 文 洋^{1,*1} ・ 太田 耕 司²

〈京都大学大学院理学研究科宇宙物理学教室
〒606-8502 京都市左京区北白川追分町〉

¹ e-mail: hatsukade@kusastro.kyoto-u.ac.jp

² e-mail: ohta@kusastro.kyoto-u.ac.jp



廿日出



太田

宇宙における星形成活動や銀河の形成・進化過程を探るには、可視光・近赤外線での観測とともに、ダストで隠された星形成活動をトレースするミリ波・サブミリ波での観測が必須である。これまでは、ミリ波・サブミリ波で明るい爆発的星形成銀河（サブミリ波銀河）が主に研究されてきた。しかし、銀河進化の全体像をとらえるためには、より「一般的」な星形成銀河を観測する必要がある。われわれはアルマ望遠鏡を用いて、波長1.3 mmで「すばる/XMM-Newton 深探査領域」を観測した。アルマ望遠鏡の高い感度と空間分解能を生かした観測の結果、これまで見つかったいなかった非常に暗い銀河を15個検出した。その個数密度は、銀河形成の理論予測とよく一致していることから、今回の観測では、これまで検出できなかった、より「一般的な銀河」に近い種類の銀河をとらえていると考えられる。従来見つかったミリ波・サブミリ波で特別に明るい爆発的星形成銀河と、一般的な銀河をつなぐ天体が検出されたことは、銀河進化の全体像に迫る大きな一歩である。

1. ダストに埋もれた星形成活動

1.1 ミリ波・サブミリ波観測

宇宙における星形成活動や銀河の形成・進化過程の解明は、天文学における最も大きな課題の一つである。遠方宇宙における銀河の研究は、これまで、主に可視光や近赤外線を使って進められてきた。しかし、可視光や近赤外線はダストによって大きく吸収を受ける。そのため、従来の研究では宇宙における星形成活動の多くが見逃されている可能性がある。そこで重要なのが、ミリ波やサブミリ波での観測である。ダストに吸収された星の光は、赤外線～ミリ波・サブミリ波の波長帯で

ダストからの熱放射として再放射される。そのため、ダストからの放射を観測することによって、“埋もれた”星形成活動を暴き出すことができる。また、ミリ波・サブミリ波には、他の波長と比較して遠くの銀河を効率的に検出できるという特徴がある。図1は、ミリ波・サブミリ波で明るい星形成銀河の典型的な Spectral Energy Distribution (SED) である。銀河が遠くなるにつれ、観測されるフラックス密度が減るとともに、ダストの熱放射のピークが長波長側にずれる。この効果によって、ミリ波・サブミリ波ではフラックス密度がほとんど変わらないという現象が起きる。そのため、ミリ波・サブミリ波を使えば、このような

*1 現在の所属：国立天文台チリ観測所 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1

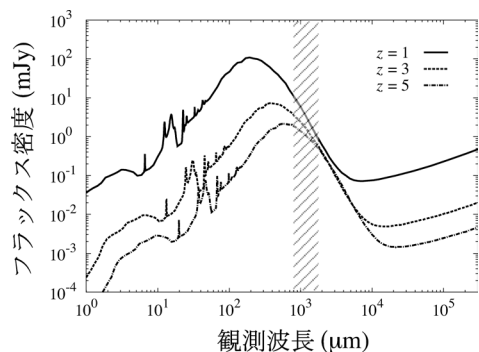


図1 ミリ波・サブミリ波で明るい星形成銀河の典型的なSED. $z=1, 3, 5$ にある場合、観測されるSEDがどのように変わるかを表している。斜線部分はミリ波・サブミリ波帯。銀河までの距離を大きくしていった場合、観測されるフラックス密度はミリ波・サブミリ波帯では変化が小さいのに対し、他の波長、例えば可視光やセンチ波などでは急激に減少する。

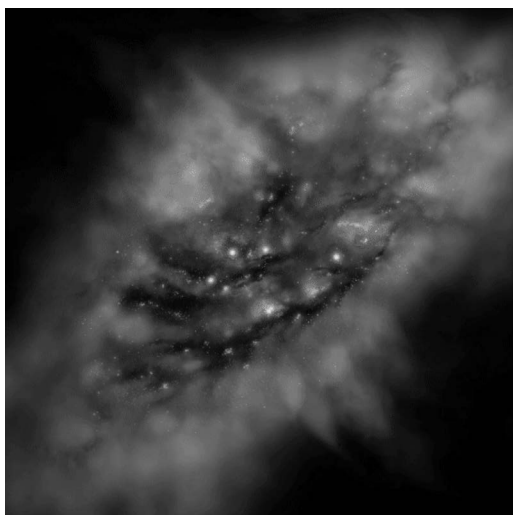


図2 ダストに厚く覆われた爆発的星形成銀河の想像図（国立天文台提供）。

SEDをもつ初期宇宙の銀河を他の波長と比較して容易に検出することができる¹⁾。

1990年代終わりから、ミリ波・サブミリ波を用いた遠方宇宙の探査が盛んに行われるように

なった。その結果、ミリ波・サブミリ波で非常に明るい銀河が新しい種類の銀河として発見された²⁾⁻⁴⁾。この銀河は「サブミリ波銀河」と呼ばれ、ダストに厚く覆われた巨大な銀河である。太陽質量に換算して年間数百個から1,000個もの星を生み出す非常に活発な星形成活動を行っている^{5), 6)} (図2)。サブミリ波銀河は、 $z\sim 2-3$ に多く見つかっている。その激しい星形成活動や分布する赤方偏移などの特徴から、現在の宇宙に存在する大質量楕円銀河の祖先ではないかと考えられており^{7), 8)}、銀河の進化を研究するうえで重要な銀河種族である。

1.2 より「一般的な」銀河の重要性

しかし、サブミリ波銀河が $z\sim 2-3$ での宇宙全体の星形成活動に占める割合は $\sim 10-20\%$ であり^{3), 9)}、残りの大部分を占めるのは、より穏やかな星形成活動を行っている銀河であると考えられる。また、このような銀河種族がミリ波での宇宙背景放射^{*2}へ寄与する割合も $10-20\%$ 程度である¹⁰⁾⁻¹²⁾。ミリ波での宇宙背景放射の大部分は、遠方宇宙にある銀河のダスト放射が寄与していると考えられており¹³⁾、より暗い銀河からの寄与が多くを占めている。

このように、宇宙に存在する銀河の全体像をとらえるには、ミリ波・サブミリ波で暗い、より「一般的な」銀河を観測する必要がある。しかし、高感度の観測は困難を伴う。ミリ波・サブミリ波は大気吸収を受けやすいため、できるだけ大気透過度の良い場所（ハワイのマウナケア山やチリのアタカマ高地など）で観測が行われている。近年は観測装置の性能も向上しているが、暗い銀河を検出するには長時間の積分が必要である。さらに問題なのは、空間分解能の不足からくる「コンフュージョン」である。高感度の観測を行えば検出される銀河の数も増えるが、空間分解能が足りないと銀河を分解して検出することができない。

*2 ここでは、ミリ波帯の宇宙背景放射のうち、3 K宇宙マイクロ波背景放射の寄与を除いた放射成分を指す。

この影響は、長波長での観測でより顕著である。近年の単一望遠鏡による高感度サーベイでは、このコンフュージョン限界が暗い銀河の検出を制限している。ミリ波・サブミリ波で深い観測を行うには、感度とともに空間分解能が重要となる。

2. アルマ望遠鏡での観測

この状況を打破できるのが、アルマ望遠鏡 (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array; ALMA) である。アルマ望遠鏡では、2011年から建設と並行して初期科学運用が行われている。今回の観測は第1回の観測募集 (サイクル0) で行われたものであるが、この段階ですでに、感度や空間分解能は既存のミリ波・サブミリ波望遠鏡と比較して10倍以上と、世界最高性能の観測装置である。

実を言うと、本来の観測提案の内容は、暗いサブミリ波銀河を検出するというものではなかった。われわれは、 $z \sim 1.4$ の星形成銀河の分子ガス質量とダスト質量を測定し、金属量との関係を明らかにしたいと考えていた。ターゲットは、すばる望遠鏡に搭載された多天体分光器FMOS (Fibre Multi-Object Spectrograph) で赤方偏移の求まっている天体^{14), 15)}の中から選んだ20天体であった。アルマ望遠鏡の視野は狭いため、ターゲットごとに視野を設定し、合計20視野の観測を行った。観測波長は1.3 mm, 観測領域は「すばる/XMM-Newton深探査領域」である。分子ガスのトレーサーである一酸化炭素 (CO) 分子輝線をとらえると同時に、ダストからの連続波の検出を狙った。

観測は2012年8月に行われ、2013年1月にデータが手元に届いた。アルマ望遠鏡の場合、実際に観測に行く必要はなく、観測されたデータが届くのを待っていれば良い。届いたデータも、Quality Assuranceというチェックを受けていて (必要な観測が行われているか、要求した感度に達しているか、など)、データの質が保証されて

いる。また、サポート体制も非常に充実している。観測提案が採択されると、ALMA Regional Center (ARC) からコンタクトサイエンティストが割り当てられ、観測準備やデータ配送のやり取り、必要に応じてデータ解析のサポートを受けられる。今回は、西合一矢氏にサポートをしていただいた。特にデータ解析の際には、三鷹のアルマ棟でつきっきりで解析方法を教えてもらい、たいへんありがたかった。

解析されたデータを眺めてみると、それは驚異的なものであった。観測時はまだアンテナが23-25台であり、また積分時間は1視野あたり10分程度であったにもかかわらず、ノイズレベルは $\sigma_{1.3\text{mm}} \sim 0.04\text{--}0.10\text{ mJy beam}^{-1}$ と、従来行われてきたミリ波サーベイと比較して約10倍も深いデータが得られていた。空間分解能は $\sim 0.6\text{--}1.3''$ であり、これも既存のミリ波単一望遠鏡より1桁以上良い。アルマ望遠鏡の威力を肌で感じた。

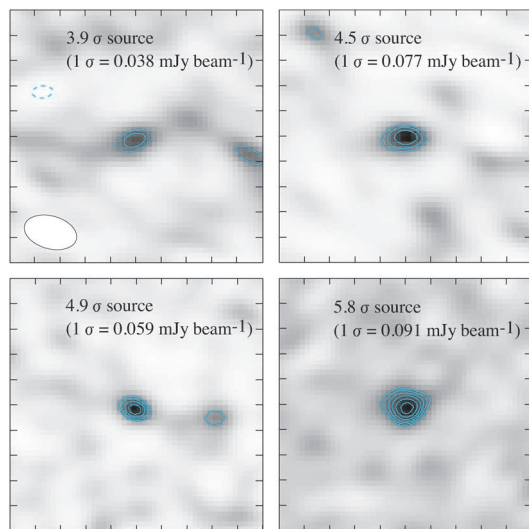


図3. アルマ望遠鏡で検出された天体の例。コントアは、 $\pm 3.0\sigma$ から 0.5σ 刻み。各図のサイズは $5'' \times 5''$, 左上には天体のsignal-to-noise ratioとノイズレベルを、左下にはアルマ望遠鏡のビームサイズを載せている。従来のミリ波サーベイで用いられてきた単一望遠鏡の空間分解能は $\sim 15\text{--}30''$ であり、アルマ望遠鏡の分解能が圧倒的に良いことがわかる。

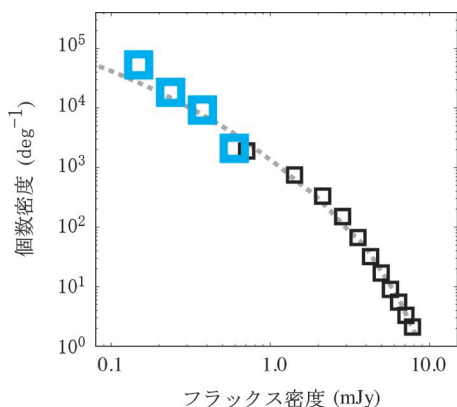


図4 1.3 mmでのナンバーカウント。横軸は観測されたフラックス密度 (mJy), 縦軸は1平方度あたりの天体数。青が今回の結果で、黒が従来のミリ波サーベイの結果¹⁹⁾。点線は、理論モデルによる予測¹⁶⁾。

3. 見えてきた「一般的な銀河」

ターゲット天体の解析は現在行っているところであるが、これだけの深いデータであったため、ターゲット天体のほかにも連続波で明るい天体が視野内に受かっていた (図3)。「このデータ、何かほかに使えないかな?」世界最高感度のデータであるが、1視野では面積が非常に狭い。しかし20視野を合わせると、狭いながらもある程度統計的に有意なことが言えそうである。20視野内では、ターゲット天体を除いて合計15個の天体が検出されていた。このデータを合わせて、天体の明るさごとの個数密度分布 (ナンバーカウント) を導出することにした。通常の広視野サーベイと異なり、視野中心から離れるに従って感度が落ちることや、視野ごとにノイズレベルが異なることなどの補正に苦心したが、最終的にナンバーカウントを作成することができた (図4)。従来のミリ波サーベイでの結果と比較して約10倍暗い部分までデータ点を打つことができ、これまで

で最も暗い部分を押さえることに成功した。

検出された天体の明るさは、サブミリ波銀河と比較して約10倍暗い。単純に考えると星形成活動は年間およそ数十から100太陽質量であり、サブミリ波銀河と比較して、より穏やかな星形成活動をしている銀河であると考えられる。この結果を理論からの予測と比較した。複数の研究者が理論予測を行っているが、今回の研究では最近発表された代表的な三つのモデル¹⁶⁾⁻¹⁸⁾と比較した*3。その結果、今回の観測結果はどのモデルともよく一致していることがわかった。理論モデルの予測では、今回検出された銀河はダストを豊富にもつ銀河ではあるが、サブミリ波銀河と比較して穏やかな星形成活動を行う一般的な銀河に近い種類の銀河である。従来見つけていた爆発的星形成銀河と、一般的な星形成銀河をつなぐ銀河が検出されたことは、銀河の形成過程や宇宙の星形成活動を明らかにするうえで大きな前進である。

得られたナンバーカウントを積分することで、検出された銀河がミリ波での宇宙背景放射にどの程度寄与しているのかを求めた。その結果、今回検出されたような暗い銀河の寄与は、全体のおよそ80%であることがわかった。従来のミリ波サーベイの結果 (~10-20%) と比較して、格段に大きい割合である。これは、アルマ望遠鏡の感度および空間分解能の向上によって、これまで見えていなかった暗い銀河をとらえることができたためである。

4. 今後の展望

今回の観測では、ミリ波のナンバーカウントでこれまで最も暗い部分を求めることができた。しかし、観測領域が狭く、またサンプル数も少ないため、不定性が大きい。この結果をより確かなものにするためには、さらに広い領域を探索する

*3 三つの理論予測とも、今回のフラックス密度の範囲ではおよそ一致しているため、図4ではそのうちの一つの理論モデルのみをプロットしている。

必要がある。

一般的な銀河をとらえるためには、より深い観測が必要である。アルマ望遠鏡は着々とアンテナ数を増やしており、今後ますます感度が向上する。今まで見えなかった暗い銀河をとらえることもできるようになるであろう。ミリ波での背景放射の起源を解明できるかもしれない。

今回の観測で検出された銀河の性質を調べるためには、ミリ波やサブミリ波のほかに、可視光や近赤外線など多波長の情報も重要である。今回アルマ望遠鏡で受かった銀河の多くは、対応する可視光・近赤外線の天体がまだ同定されていない。対応天体を探すには、より高感度の可視光・近赤外線観測が必要である。今後、すばる望遠鏡などを使った観測を行う必要がある。さらに暗い天体を検出するには、計画の進んでいる30 m望遠鏡TMTが必要になるであろう。

謝 辞

本稿の科学的な内容は、世古明史氏、矢部清人氏、秋山正幸氏らとの共同研究²⁰⁾に基づいています。清水一紘氏には、ナンバーカウントの理論データを提供していただきました。ALMAのデータについては、観測準備やデータ解析でサポートをしていただいた西合一矢氏をはじめとして、ALMAのスタッフの方々たいへんお世話になりました。この場を借りて、心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Blain A. W., Longair M. S., 1993, MNRAS 264, 509
- 2) Smail I., et al., 1997, ApJL 490, L5
- 3) Hughes D. H., et al., 1998, Nature 394, 241
- 4) Barger A. J., et al., 1998, Nature 394, 248
- 5) Blain A. W., et al., 2002, Phys. Rep. 369, 111
- 6) 田村陽一, 2009, 天文月報 102, 535
- 7) Lilly S. J., et al., 1999, ApJ 518, 641
- 8) Smail I., et al., 2004, ApJ 616, 71
- 9) Wardlow J. L., et al., 2011, MNRAS 415, 1479
- 10) Scott K. S., et al., 2008, MNRAS 385, 2225
- 11) Scott K. S., et al., 2010, MNRAS 405, 2260
- 12) Hatsukade B., et al., 2011, MNRAS 411, 102
- 13) Lagache G., Puget J.-L., Dole, H., 2005, ARAA 43, 727
- 14) Yabe K., et al., 2012, PASJ 64, 60
- 15) Yabe K., et al., 2013, MNRAS, submitted
- 16) Shimizu I., Yoshida, N., Okamoto, T., 2012, MNRAS 427, 2866
- 17) Béthermin M., et al., 2012, ApJL 757, L23
- 18) da Cunha E., et al., 2013, ApJ 765, 9
- 19) Scott K. S., et al., 2012, MNRAS 423, 575
- 20) Hatsukade B., et al., 2013, ApJL 769, L27

“Population Census” of Galaxies Buried in Dust

Bunyo HATSUKABE and Kouji OHTA

*Department of Astronomy, Kyoto University,
Kyoto 606-8502, Japan*

Abstract: We carried out targeting 20 star-forming galaxies at $z \sim 1.4$ in the Subaru/XMM-Newton Deep Survey field with the Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA). In the observations, we serendipitously detect 15 sources ($\geq 3.8\sigma$, $S_{1.3\text{ mm}} = 0.15\text{--}0.61\text{ mJy}$) other than the targeted sources. We create number counts by using the ‘sub-mJy sources’, which probe the faintest flux range among surveys at millimeter wavelengths. The ALMA number counts agree well with model predictions, which suggest that the sub-mJy populations are more like ‘normal’ star-forming galaxies than ‘classical’ SMGs with intense star-forming activity. In this flux range, $\sim 80\%$ of the extragalactic background light at 1.3 mm is resolved into individual sources.