

ALMA 望遠鏡による SXDF サーベイ

山口 裕 貴

〈東京大学大学院理学系研究科 天文学教育研究センター 〒181-0015 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉
e-mail: yyamaguchi@ioa.s.u-tokyo.ac.jp



観測フラックス密度が0.1–1 mJy 程度以下の暗いサブミリ波銀河は、宇宙の星形成活動に対して重要な役割を果たしていると考えられている。しかしながら、この種族の銀河はALMA 望遠鏡による高感度・高空間分解能観測の実現により、ようやく研究できるようになってきた種族であり、その詳細はまだよくわかっていない。本記事では、SXDFで行われた観測波長1.1 mm・観測面積2平方分のALMA 探査の結果と暗いサブミリ波銀河の多波長解析について述べる。それに加えて、関連するALMA 探査の結果についても紹介する。

1. はじめに

塵に埋もれた星形成銀河が宇宙の星形成率密度にどのように寄与しているかという問題の解決は、遠赤外線から電波にわたる波長帯での大規模探査の主目的の一つである。赤外線天文衛星「あかり」やハーシェル宇宙望遠鏡などを用いた大規模探査によって、塵に覆われた星形成銀河が、赤方偏移1から3の宇宙において星形成率密度に大きな寄与をしているということがわかってきた^{1),2)}。

そのような塵に覆われた星形成銀河の代表例として、サブミリ波銀河が挙げられる。サブミリ波銀河とはサブミリ波と呼ばれる波長1 mm 程度以下^{*1}で非常に明るい銀河（観測フラックス密度が数mJy程度以上）である。このような種族の天体は、過去の単一鏡望遠鏡を用いた大規模サブミリ波探査によって数多く発見されてきた。多量の塵をもつ星形成銀河は、サブミリ波で観測すると、その見かけの明るさが赤方偏移1から10程

度までほぼ一定となる性質（負のK補正；より詳しくは参考文献3を参照のこと）があり、遠方の銀河まで比較的容易に観測できる。サブミリ波銀河は、活発な星形成活動（星形成率は1年あたりおよそ数百から1,000太陽質量）を行っており、宇宙の歴史を通して、最も激的な星形成をしている銀河種族であると考えられる⁴⁾。

ところが、上で説明したようなサブミリ波銀河だけでは、宇宙赤外線背景放射^{*2}の大部分が説明できない。例えば波長1.1 mmでは全体のおよそ10–20%程度しか説明できないことが知られている⁶⁾。宇宙赤外線背景放射は、視線方向にある系外銀河からの赤外線放射の総和であり、宇宙における塵に覆われた星形成活動の歴史を反映していると考えられている。したがって、サブミリ波銀河の観測だけでは、塵に埋もれた星形成活動の一部しか理解できないということになる。

近年、ALMAの登場によって、高感度・高空間分解能での観測が可能になり、宇宙赤外線背景

^{*1} 本記事では1.1 mmのような1 mmよりも僅かに長い波長帯に対しても「サブミリ波帯」という言葉を用いる。

^{*2} 天球面のあらゆる方向から、ほぼ等方的に観測される「銀河背景放射」のうち赤外線域にピークをもつ部分のこと。COBE衛星により初めて発見され、可視光域における銀河背景放射と同等のエネルギーをもつことが明らかになった⁵⁾。

放射の大部分を暗いサブミリ波銀河^{*3}が担っていることがわかってきた^{7), 8)}。暗いサブミリ波銀河は、一般的なサブミリ波銀河に比べて数倍-数十倍暗い銀河種族で、単一鏡望遠鏡ではコンフュージョン限界^{*4}のため観測することが難しい。したがって、ALMAの登場によりようやく研究できるようになってきた種族である。ゆえに、暗いサブミリ波銀河がどのような星形成活動の性質を有していて、宇宙のどの時代でどのくらい星形成率密度に寄与しているかは、よくわかっていない。

本記事では、われわれのグループが、すばる/XMM-Newton 深宇宙探査領域（以降SXDF）で行ったALMA連続波探査、いわゆるALMAディープ・サーベイの結果⁹⁾⁻¹³⁾を紹介し、特に暗いサブミリ波銀河の多波長解析について詳しく述べる。また、ALMAによる無バイアス探査で見えてきた天体についても紹介する。

2. ALMA 観測

2.1 観測領域

本研究で取り扱ったALMAデータはSXDFで行われた、観測波長1.1 mm、探査面積2平方分の連続波探査である。SXDFはすばる望遠鏡をはじめ、可視光から電波まで幅広い波長帯で深い画像を利用できるという利点がある。また、SXDFではALMA観測に先立ち、サブミリ波望遠鏡ASTE 10 m鏡に波長1.1 mmを観測するカメラ、AzTECを搭載して大規模なサブミリ波銀河探査が行われており、200個以上のサブミリ波銀河が検出されている¹⁴⁾。今回ALMAで観測したのは、この探査で見つかったサブミリ波銀河のうちの一つの周辺であり、サブミリ波銀河に伴って波長1.1 mmで淡いフィラメント状の構造が見える領域である（図1）。また、観測領域にはすばる望

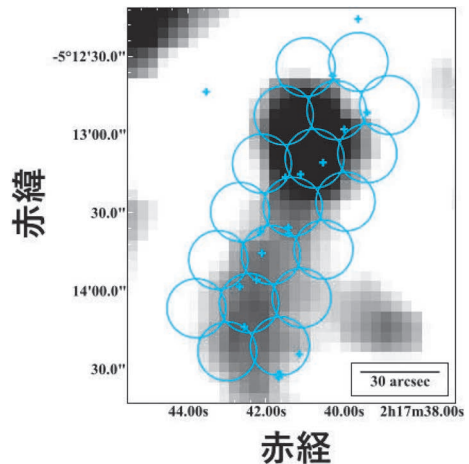


図1 ALMAで観測した領域のAzTECによる1.1 mmマップ。図中の円はALMAの視野を示している。ALMAの観測が、1.1 mmで見える淡い構造（灰色の部分）に沿って行われているのがわかる。十字はすばるによって見つかったH α 輝線銀河の場所を示している。

遠鏡のMAHALOプロジェクト¹⁵⁾で検出されたH α 輝線銀河も多く含まれている（図1）。

2.2 ALMA 観測

観測は、2014年7月に行われた。総観測時間は3.6時間である。30-32台のアンテナが使用され、基線長は最小20 m、最大650 mであった。この基線長により、空間分解能はおよそ0.5秒角を実現している。探査面積は2平方分で、1ビームあたりの感度55 μ Jyを実現している。このALMA画像は単一鏡望遠鏡をもちいた観測に比べ、分解能は30"から0.5"（60倍）、感度は500 μ Jyから55 μ Jy（9倍）へと劇的に改善している。われわれはこの画像データから、信号雑音比（S/N）4以上の検出を25天体、6以上の検出を5天体発見した¹¹⁾。検出された最も明るい2天体は、2.1節で紹介したAzTEC探査で見つかったサブミリ波銀河が、ALMAの分解能によって二つに分解されたものであることがわかった^{10), 13)}。

^{*3} 本記事では観測波長1.1-1.3 mmで観測フラックス密度が0.1-1 mJy程度の明るさの天体のことを暗いサブミリ波銀河と呼ぶことにする。

^{*4} 検出器の感度ではなく、分解できない背景天体の構造によって決まる観測限界。

3. 天体のナンバーカウントと赤外線背景放射への寄与

検出された天体が宇宙赤外線背景放射ほどの程度寄与しているのかを知るためには、ある明るさの天体が単位面積あたりいくつあるのか、すなわち天体のナンバーカウントを調べる必要がある。われわれは $S/N > 4$ (フラックス密度 $0.2\text{--}1.7\text{ mJy}$) で検出された天体についてナンバーカウントの導出を行った¹¹⁾。われわれの観測領域はすでにサブミリ波銀河が含まれているため、ナンバーカウント導出の際には、既存のサブミリ波銀河由来の明るい2天体は除外していることに注意が必要である。

得られたナンバーカウントのベストフィット関数を積分することにより、宇宙赤外線背景放射を求めると図2のようになる。ナンバーカウントは、シェヒター関数 (Schechter) と二重べき乗則 (double power law) の2種類の関数でフィットしている。この結果を宇宙背景放射探査機 (COBE) によって得られた 1.1 mm の赤外線背景放射の観測値と比較すると、本観測の検出限界 ($S/N > 4$, フラックス密度 $> 0.2\text{ mJy}$) で COBE の観測値のおよそ 40% に到達しており、先行研究の結果⁸⁾ と一致している。検出限界以下の外挿部分を見ると、フラックス密度 $\sim 0.01\text{--}0.03\text{ mJy}$ で COBE の観測値のおよそ 100% に達することがわかる。この結果は、同じ ALMA 観測のデータを用いた、近赤外線銀河のスタッキング解析による結果^{*5}からも示唆されている¹²⁾。

見つかった天体のうち、多波長データ解析は、可視光/近赤外線に対処天体のある $S/N > 6$ の五つの ALMA 天体 (以降では明るい順に SXDF-ALMA1, 2, 3, 4, 5 と呼ぶ) に対して行った。解析した5天体のうち、明るい2天体 (SXDF-ALMA1,

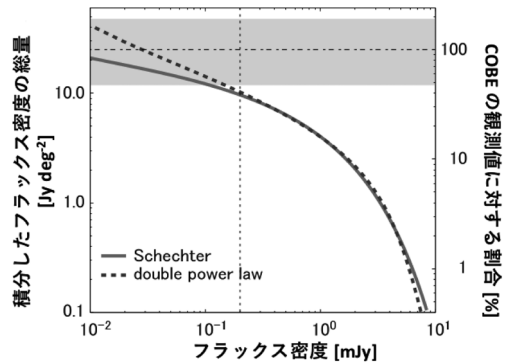


図2 ナンバーカウントにフィットした関数を積分することによって得られた、波長 1.1 mm の積分フラックス密度と COBE による宇宙赤外線背景放射の観測値との比較¹¹⁾。水平の一点鎖線と灰色の影の部分は COBE による観測結果。垂直の点線は今回の観測の検出限界 (0.2 mJy) を表す。

2) は 2.2 節で述べた AzTEC で検出されたサブミリ波銀河由来の天体である。残りの 3 天体 (SXDF-ALMA3, 4, 5) は、今回 ALMA による探査で新たに検出された暗いサブミリ波銀河である。

4. 多波長解析

4.1 解析に用いた多波長画像と多波長対応天体

2.1 節で述べたように、SXDF では多波長の深い画像を利用できる。今回用いたのは、可視光から近赤外線にかけて、すばる (主焦点カメラ)・ハッブル宇宙望遠鏡 (ACS, WFC3)・VLT (HAWK-I)・スピッツァー宇宙望遠鏡 (IRAC) の画像、中間赤外線から電波にかけて、スピッツァー宇宙望遠鏡 (MIPS)・ハーシェル宇宙望遠鏡 (PACS, SPIRE)・JVLA (6 GHz)・VLA (1.4 GHz) の画像である。

可視光から近赤外線の画像においては、五つの ALMA 天体に対し、最低でも四つのバンドで対応天体が見つかった。SXDF-ALMA1 と SXDF-

*5 近赤外線天体の位置で ALMA データを足し合わせることで、検出限界がフラックス密度 $\sim 0.03\text{--}0.05\text{ mJy}$ まで到達している。

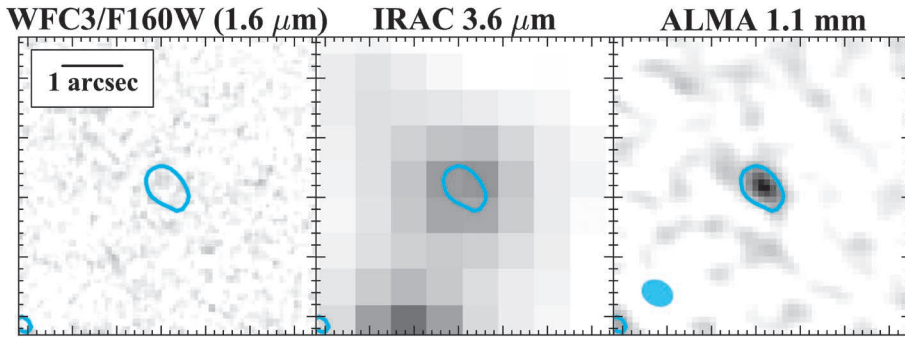


図3 左から、SXDF-ALMA3に対するハッブル宇宙望遠鏡WFC3/F160W (1.6 μm) の画像、スピッツァー宇宙望遠鏡3.6 μm 画像、ALMA 1.1 mm の画像。図中のコントアはALMA画像のS/N=5のコントア。ALMA画像中の左下の青い楕円はALMAの合成ビームを表す。波長が短くなるほど急激に暗くなっているのがわかる。

ALMA2については、同じ領域のすばる狭帯域フィルターによる観測¹⁶⁾で検出された赤方偏移2.5のH α 輝線銀河と一致することがわかった。また、SXDF-ALMA3については、ハッブル望遠鏡WFC3/F160W (1.6 μm) よりも短い波長で急激に暗くなり、検出されないというたいへん興味深い性質があることがわかった(図3)。中間赤外線から電波の波長帯の画像はSXDF-ALMA3のような、可視光で非常に暗い天体の性質を調べるうえで重要である。これについては後の節で改めて議論する。

4.2 赤方偏移の推定

ALMA天体の宇宙星形成率密度への寄与を調べるためには、天体の赤方偏移を知る必要がある。本研究では、可視光-近赤外線のスペクトルエネルギー分布 (SED) をもとに、測光赤方偏移 (z_{photo}) の推定を行った。結果はSXDF-ALMA1, 2, 3, 4, 5に対して $z_{\text{photo}} = 2.27^{+0.94}_{-0.87}$, $2.54^{+0.23}_{-0.51}$, $2.4^{+2.5}_{-2.0}$, $1.33^{+0.10}_{-0.16}$, $1.52^{+0.13}_{-0.18}$ となった。

SXDF-ALMA3に関して、 z_{photo} の不確かさが0.4から4.9と大きいのは、SXDF-ALMA3は短い波長で急激に暗くなる性質があるため、可視光-近赤外線のSEDだけで測光赤方偏移を推定するのが困難であるからである。そこで、われわれは可視光-電波の波長帯のSEDを調べることで、SXDF-ALMA3の赤方偏移推定を試みた。

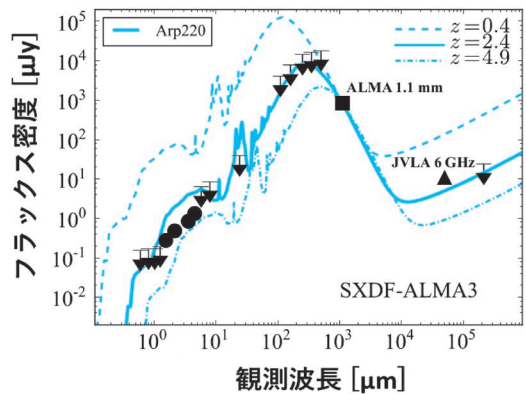


図4 SXDF-ALMA3の可視光-電波SED。図の黒のシンボルはそれぞれの波長における測光値である(未検出の場合は矢印で上限値を付けている)。四角形と三角形のシンボルはそれぞれALMA 1.1 mmとJVLA 6 GHzの測光値である。青の線はArp 220のSEDである。Arp 220のSEDは、可視光-近赤外SEDにより推定された測光赤方偏移(実線)、推定信頼区間の下限(破線)、上限(一点鎖線)の場合それぞれに赤方偏移させている(すべてALMA 1.1 mmのフラックス密度でスケールしてある)。

図4はSXDF-ALMA3の可視光-電波のSEDと近傍の塵に覆われた銀河Arp 220のSEDを比較したものである。図4のように、SXDF-ALMA3はJVLAの電波画像(6 GHz)で検出されている。ALMAとJVLAによる観測値が与える制限とArp 220のSEDを比較すると、SXDF-ALMA3の赤方偏移は2から3程度であると推定される。

次節以降では、この節で得られた赤方偏移をもとにして、ALMA天体の物理量（星質量と星形成率）の推定を行う。銀河の星質量と星形成率は宇宙の星形成率密度への寄与や銀河の星形成活動の性質を知るうえで、重要な物理量である。

4.3 星質量と星形成率の推定

可視光-近赤外線にかけて、多くのバンドで検出されているSXDF-ALMA1, 2, 4, 5については可視光-近赤外線SEDをもとに、星質量を推定した。結果、これら4天体の星質量は $(3.5-9.5) \times 10^{10}$ 太陽質量ほどであることがわかった。これら四つのALMA天体は、同じ時代の典型的な星質量銀河と比べて大きな星質量をもっている。こうした、星質量の大きな銀河で、選択的に塵に覆われた星形成活動が検出される傾向は、われわれも含めた複数のALMAディープ・サーベイによる星形成銀河の研究^{9), 17), 18)}で共通に示唆されている。これは、赤外線光度と紫外線光度の比（すなわち、隠された星形成率の割合。しばしばIRXと呼ぶ）が銀河の星質量に強く依存するという近傍銀河の傾向¹⁹⁾と同様である。

一方でSXDF-ALMA3については、検出バンド数が少なく、可視光-近赤外線のSEDで星質量の推定が難しい。そこでわれわれは静止波長 H バンドの質量-光度関係を用いることにした。静止波長 H バンドの光は、減光などの影響を受けにくく、銀河の星質量を比較的良好に反映していると考えられている²⁰⁾。ここでは、SXDF-ALMA3の赤方偏移を2または3と仮定する（静止波長 H バンドは赤方偏移2で $4.8 \mu\text{m}$ 、赤方偏移3では $6.4 \mu\text{m}$ である）。その結果、星質量が 5×10^9 太陽質量または $< 2 \times 10^8$ 太陽質量と推定できた（それぞれ赤方偏移2, 3の場合。赤方偏移3の場合が上限値になっているのは、静止波長 H バンドが未検出のためである）。SXDF-ALMA3の星質量はほかの4天体に比べて小さい傾向にあることがわかった。

ALMA天体の星形成率は紫外線光度と赤外線

光度から推定した。赤外線光度はALMA 1.1 mmの観測値のみを用いて推定したため、不定性が大きいものの、ALMA天体の星形成率は1年あたり30-200太陽質量程度である。

5. 宇宙赤外線星形成率密度への寄与

本研究でALMA天体の赤方偏移・星形成率が推定されたことにより、これまでのハーシェル宇宙望遠鏡や口径10-15 m級の地上サブミリ波望遠鏡による研究では到達できない暗い天体が、宇宙の赤外線星形成率密度にどの程度寄与しているのか直接調べることができる。

3章と同様の理由で、SXDF-ALMA1とSXDF-ALMA2を除き、のこる三つのALMA天体が宇宙赤外線星形成率密度に与える影響を考える。推定されたALMA天体の赤方偏移から、ALMA天体が存在する赤方偏移の範囲を1から4と仮定すると、暗いサブミリ波銀河3天体の赤外線星形成率密度は、単位共動体積（ 1 Mpc^3 ）で1年あたり $(0.3-2) \times 10^{-2}$ 太陽質量であることがわかった。これは同じ赤方偏移の赤外線星形成率密度の3-20%にあたり、 $870 \mu\text{m}$ のフラックス密度が4 mJy以上の明るいサブミリ波銀河と同程度である。以上より、今回検出された暗いサブミリ波銀河は宇宙の星形成率密度へ重要な寄与をしていることがわかった。

先行研究²¹⁾では、SXDF-ALMA3のような可視光-赤外線で検出されない暗いサブミリ波銀河の存在が示唆されてきた。本研究ではそのような種族の銀河が宇宙赤外線星形成率密度に与える寄与を初めて制限できた。赤方偏移範囲を1から4とすると、SXDF-ALMA3による赤外線星形成率密度は単位共動体積で1年あたり $(0.1-1) \times 10^{-2}$ 太陽質量で、当時の宇宙赤外線星形成率密度の1-10%にあたる。

本研究の観測領域はまだまだ狭いため、観測領域の個性が原因の不確かさを十分排除できていない。今後のALMAディープ・サーベイによって、

より広い領域で暗いサブミリ波銀河が検出されるようになれば、より正確に、暗いサブミリ波銀河の宇宙赤外線星形成率密度への寄与を調べることができるようになるだろう。

6. 星形成活動の性質

宇宙の星形成率密度へ大きな寄与をしている、暗いサブミリ波銀河の星形成活動の性質は、星形成率密度の進化を司る物理過程を理解するうえで重要なパラメータの一つである。

図5には、4.3節で求めたALMA天体の星形成率を星質量の関数としてプロットしてある。これを見ると、五つのALMA天体のうち4天体(SXDF-ALMA1, 2, 4, 5)は「星形成銀河の主系列」*6と呼ばれる、星形成率-星質量の相関関係に乗っていることがわかる。この相関関係に乗る星形成銀河は、その時代の星形成に支配的な働きをしていると考えられている銀河である。一方で、SXDF-ALMA3は星形成銀河の主系列から外れており、星質量の小さな爆発的星形成銀河であることがわかる。

7. ALMA 探査で見えてきたもの

最後に、われわれの研究を含めた近年のALMAディープ・サーベイで見えてきた天体について紹介する。ALMAの威力により、赤方偏移がおよそ1から3の時代における“普通の”星形成銀河における塵に隠された星形成活動が、サブミリ波でも見えてきた。もちろん、こうした「可視光や近赤外線観測ですでにカタログされている銀河」ばかり見えてきたのであれば、視野の狭いALMAを使って、わざわざ「無バイアスな」*7観測をする意義が問われる。しかし、今回われわれが見いだしたSXDF-ALMA3のような星質量の小さな爆発

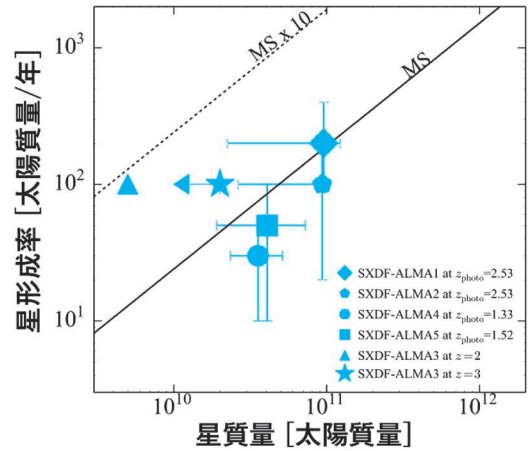


図5 五つのALMA天体について、星形成率を星質量の関数としてプロットした図。図中の実線は過去の観測²²⁾で得られた、星形成銀河の主系列にある銀河が示す星形成率-星質量の相関関係、破線はその相関関係よりも10倍星形成率が高い場合を表す。SXDF-ALMA3の場合は赤方偏移2と3の場合をプロットしてある(赤方偏移3の場合の星質量は上限値であることに注意)。

的星形成銀河や、重力レンズ銀河団Abell 1689で見つかった赤方偏移7.5の塵に覆われた星質量の小さい銀河²³⁾など、ALMAの無バイアス探査で初めて観測できるような種族も見えてきている。このような種族を理解するために、より広く深いディープ・サーベイを進めていくことはもちろん、次のステップとして、ALMAの分光観測が求められるだろう。

ALMAを使ったディープ・サーベイの特徴として、空間情報に加えて周波数方向の情報が利用できることも挙げられる。そのため、ミリ波サブミリ波帯の特定の周波数のみで輝く「(サブ)ミリ波輝線天体」の探査も行うことができる。輝線天体はいろいろな赤方偏移にあるCO分子やC⁺イオンからのスペクトル線であると考えられ、そ

*6 恒星の分野で用いられる「主系列星」と紛らわしいが、星形成銀河には星形成率と星質量との間に相関があることが知られており、その相関関係にある星形成銀河を「星形成銀河の主系列」にあると表現する。

*7 例えば図1のように、ある領域内をくまなく観測すること。

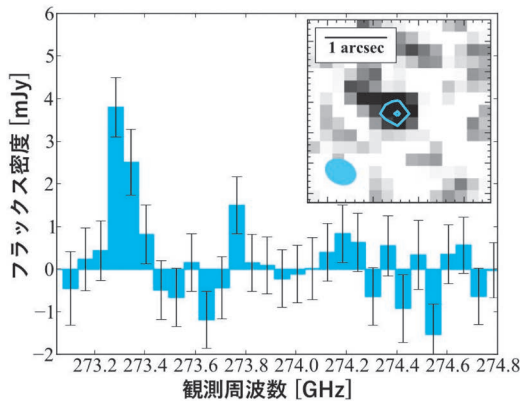


図6 偶然検出された輝線天体のスペクトル。内挿されているのは、輝線天体のピークチャンネルのALMA画像である。実線は $S/N=3, 5$ のコンタア、青の円はALMAの合成ビームを示す。

の輝線光度から得られる物理量（銀河の水素分子ガス質量など）は、宇宙の星形成史を理解するうえで必要不可欠なパラメータである。われわれの観測データからも、 $S/N=5.4$ の輝線天体を検出することに成功した（図6）。

上で説明したALMA天体と同様に、多波長画像を解析することで、われわれはこの輝線が赤方偏移0.7のCO(4-3)輝線または、赤方偏移5.95の[C II]158 μm 輝線である可能性が高いことを突き止めた。輝線がCOであった場合、推定される星質量は、 $10^{8.5}$ 太陽質量程度であり、CO輝線から推定された水素分子ガス質量の数-数十%程度であることがわかった。このような「ガスが過剰な」銀河種族は、可視光/赤外線等で選択された銀河に対して行われてきた、従来の分光観測では発見が難しい種族である。

このようなALMAディープ・サーベイのデータを用いた輝線銀河探査は、最近、急速に進み始めており²⁴⁾⁻²⁶⁾、新たな輝線銀河探査の手段としても有用である。今後、多くのALMAを使った探査により、輝線銀河という観点からも宇宙の星形成史とその背後にある物理過程に迫ることができると期待される。

謝辞

この記事は、主に2016年に筆者らが発表した投稿論文^{11), 13)}に基づくものです。より詳しい科学的内容はそちらをご覧ください。また、記事中で紹介した最新のALMAディープ・サーベイについての詳細は、それぞれの論文をご覧いただければ幸いです。指導教官の東京大学の河野孝太郎教授・田村陽一助教には、日頃からさまざまな議論に付き合っていただき、たいへん感謝しております。なお、筆者の研究は、日本学術振興会特別研究員奨励費・ALMA PI経費制度にサポートしていただいております。こちらも併せて感謝いたします。

参考文献

- 1) Goto T, Arnouts S, Malkan M., et al., 2011, MNRAS 414, 1903
- 2) Burgarella D., Buat V., Gruppioni C., et al., 2013, A&A 554, A70
- 3) 田村陽一, 2009, 天文月報9月号, 535
- 4) Casey C. M., Narayanan D., Cooray, A., 2014, Phys. Rep. 541, 45
- 5) 松浦周二, 2012, 天文月報11月号, 686
- 6) Hatsukade B., Kohno K., Aretxaga I., et al., 2011, MNRAS 411, 102
- 7) Hatsukade B., Ohta K., Seko A., Yabe K., Akiyama M., 2013, ApJ 769, L27
- 8) Fujimoto S., Ouchi M., Ono Y., et al., 2016, ApJS 222, 1
- 9) Tadaki K.-i., Kohno K., Kodama T., et al., 2015, ApJL 811, L3
- 10) Kohno K., Yamaguchi Y., Tamura Y., et al., 2016, Galaxies at High Redshift and Their Evolution Over Cosmic Time 319, 92 (arXiv:1601.00195)
- 11) Hatsukade B., Kohno K., Umehata H., et al., 2016, PASJ 68, 36
- 12) Wang W.-H., Kohno K., Hatsukade B., et al., 2016, ApJ 833, 195
- 13) Yamaguchi Y., Tamura Y., Kohno K., et al., 2016, PASJ 68, 82
- 14) Ikarashi S., Ivison R. J., Caputi K. I., et al., 2015, ApJ 810, 133
- 15) Kodama T., Hayashi M., Koyama Y., et al., 2013, The Intriguing Life of Massive Galaxies 295, 74
- 16) Tadaki K.-i., Kodama T., Tanaka I., et al., 2013, ApJ 778, 114
- 17) Dunlop J. S., McLure R. J., Biggs A. D., et al., 2017 MNRAS 466, 861

- 18) Bouwens R. J., Aravena M., Decarli R., et al., 2016, *ApJ* 833, 72
- 19) Whitaker K. E., Franx M., Leja J., et al., 2014, *ApJ* 795, 104
- 20) Hainline L. J., Blain A. W., Smail I., et al., 2011, *ApJ* 740, 96
- 21) Chen C.-C., Cowie L. L., Barger A. J., Wang W.-H., Williams J. P., 2014, *ApJ* 789, 12
- 22) Daddi E., Dickinson M., Morrison G., et al., 2007, *ApJ* 670, 156
- 23) Watson D., Christensen L., Knudsen K. K., et al., 2015, *Nature* 519, 327
- 24) Miller T. B., Chapman S. C., Hayward C. C., et al., 2016, arXiv:1611.08552
- 25) Hayatsu et al., PASJ, submitted
- 26) 山口裕貴, 2016, 修士論文 (東京大学)

SXDF-ALMA Deep Survey

Yuki YAMAGUCHI

Institute of Astronomy, University of Tokyo, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-0015, Japan

Abstract: Faint submillimeter galaxies with flux density of ~ 0.1 – 1 mJy are considered to play an important role in the cosmic star formation activities. However, physical properties of these sources are still uncertain, because high sensitivity with high angular resolution observation with ALMA is needed to study these sources. Here, we present results of SXDF-ALMA 1.1 mm deep survey and a multi-wavelength analysis of detected faint submillimeter sources. We also introduce related results of ALMA deep surveys.