

宇宙で最も活発な星の工場—サブミリ波銀河—

伊王野 大 介

〈国立天文台チリ観測所・総合研究大学院大学 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: d.iono@nao.ac.jp

遠方宇宙にはサブミリ波で明るく輝く「サブミリ波銀河」が存在することが20年ほど前から知られている。大量の星を非常に効率よく生成している「星の工場」であり、1年間に1,000個以上もの星を作っているサブミリ波銀河も発見されている。これに匹敵する速さで星を生成している銀河は近傍宇宙には存在せず、サブミリ波銀河の形成には、銀河に分布する分子ガスの量が関係していると考えられている。しかしながら、どのようなプロセスを経て星を爆発的に生成しているのか、いまだ詳細はわかっていない。私たちのグループでは、2015年秋にALMA望遠鏡の最高分解能に近い解像度(0.02秒角)でサブミリ波銀河を3天体観測した。その結果、サブミリ波銀河の形成には、銀河衝突が深くかかわっている可能性があることがわかった。本稿では、その結果について紹介する。

1. サブミリ波銀河

遠く彼方に存在し、星を大量に生成している銀河が1990年代後半にサブミリ波を使った観測によっていくつも発見された¹⁾⁻³⁾。サブミリ波で明るく輝いていることから、これらの銀河を「サブミリ波銀河」と呼ぶ。その後のASTE望遠鏡などを使った広域サーベイ^{4), 5)}により、数千個規模のサブミリ波銀河が発見されている。その中でも特に明るいものは、1年間に1,000個以上の星を生成している。興味深いことに、近傍宇宙にはここまで速いスピードで星を作っている銀河は存在しない。深海には巨大で不思議な魚が存在するように、深宇宙には不思議な銀河が存在するのである。このような特異な銀河は、ダークマターが作る重力場の一番深い場所で形成されることが予想されており、初期宇宙の大規模構造のトレーサーとしても注目されている^{6), 7)}。

どのようにして、これほどまでにたくさんの星を短時間に生成することができるのか、なぜ近傍

宇宙には存在しないのか、素朴な疑問がいくつも浮かんでくる。この謎を解くための手掛かりは、銀河の中に存在する「分子ガス」にありそうだ。私たちの住む天の川銀河では、星の質量に対して分子ガスの質量は約10%であることが知られている。一方、遠方宇宙の星形成銀河の多くでは、この割合が50%程度であることが最近の研究からわかってきた^{8), 9)}。分子ガスは星の材料であるため、分子ガスがたくさん存在する場所では局所的に星が生まれやすい。つまり、遠方の星形成銀河には、銀河全体で星を作るための条件が備わっているのである。このように、サブミリ波銀河での星形成、ひいてはサブミリ波銀河の形成には、分子ガスの量が深く関係しているところまではわかってきた。

しかしながら、どのようなプロセスを経て、どのような場所で星が爆発的に増えるのか、その詳細についてはいまだ不明である。初期の宇宙では、銀河の衝突が頻繁に起こるため¹⁰⁾、銀河衝突やそれによるガスの噴出¹¹⁾がプロセスとして

働いているのかもしれない。一方、宇宙の大規模構造に沿って冷たいガスが流れ込み、そのガスを材料としてサブミリ波銀河が成長するというシナリオも提唱されている¹²⁾。この問題を解くためには、サブミリ波銀河の細部を研究する必要がある。これまでに、重力レンズを利用した手法^{13), 14)}から興味深い結果も得られているが、サブミリ波銀河を高い分解能で直接観測した例は少ない。

なぜ、そのような観測例が少ないのか。サブミリ波銀河には、分子ガスとともに塵が豊富に存在する。可視光線の観測を専門とする望遠鏡にとって、この塵の存在は邪魔だ。銀河内部から放射される可視光線は塵によって遮られてしまい、地球まで届かなくなる。そのため、可視光線画像には、暗い「暗黒」銀河として映ってしまう。実際、ALMA望遠鏡の観測によって、実に40%の銀河が可視光で暗い「暗黒」銀河であることがわかってきている¹⁵⁾。そこで、ミリ波・サブミリ波望遠鏡の出番となる。この波長を観測できる望遠鏡を使うと、若い星によって温められた塵の熱放射を直接観測できるため、サブミリ波銀河のように、塵に覆われている「暗黒」銀河を観測するにはたいへん都合が良い。実際に、私たちはSubmillimeter Array (SMA) や Rainbow 干渉計などを使って、塵に覆われたサブミリ波銀河の観測^{16), 17)}を進めてきた。しかし、これまでの観測では、解像度が足りない、という問題点があった。技術的な制限により、どれだけ頑張っても0.5秒角程度の解像度までしか達成しないのである。それでも、数値解析を駆使することにより、サブミリ波銀河の正体を明らかにする大きな第一歩を踏み出すことができた¹⁸⁾。しかし、銀河の内部構造を議論するためには、さらに高い解像度が必要である。

2. ALMA 望遠鏡の観測

そこで登場したのがALMA望遠鏡である。ALMAは非常に感度が高いうえに、高い解像度

を実現する。この優れた性能によって、サブミリ波銀河のどこで、どのように星が生まれるのかを詳しく調べることができるのである。私たちのグループでは、ALMA Cycle 1から観測提案を行ってきた。100億年前の宇宙に存在し、星形成率が1,000 M_{\odot}/yr を超えるサブミリ波銀河3天体の内部構造の解明を目指した。10年前にSMAで同じ天体を観測したが、SMAの0.5秒角分解能ではいずれの天体も点源に見え、内部構造の解明には至らなかった。Cycle 1ではファイラー (Highest priorityで採択された観測の間に時間があつた場合に実行される) で採択されたが、実行されず。Cycle 2でも採択されたが、またしても実行されず。三度目の正直と言おうか、Cycle 3で最も高いクラスの評価を得て、ついに2015年11月に観測が実行された。気象条件にも恵まれたうえに、試験的に組み込まれていた長い基線長のアンテナのデータも含まれており、要求した分解能よりも倍近く高い0.02秒角のデータが手元に届いた。この分解能は、過去の観測の約25倍に相当する。面積にすると、600倍以上の解像度の向上である。

3. 観測結果

ALMAの観測によって得られた画像を図1に示す。等高線は、若い星によって温められた塵の分布を表している。つまり、新しい星が形成されている場所の大まかな分布を示している。以下に、本観測から新たにわかった各天体の特徴を挙げる。

1. 図1に示すように、中心付近に複数の塵の塊が見つかった。AzTEC1/8は二つの塊の距離が200–300 pc程度と非常に近く、それぞれが銀河核に対応する場合、AzTEC1/8は銀河衝突の最終段階にあると考えられる。一方、AzTEC4では二つの塊が1 kpc程度離れているため、銀河衝突の中期段階を表している可能性がある。

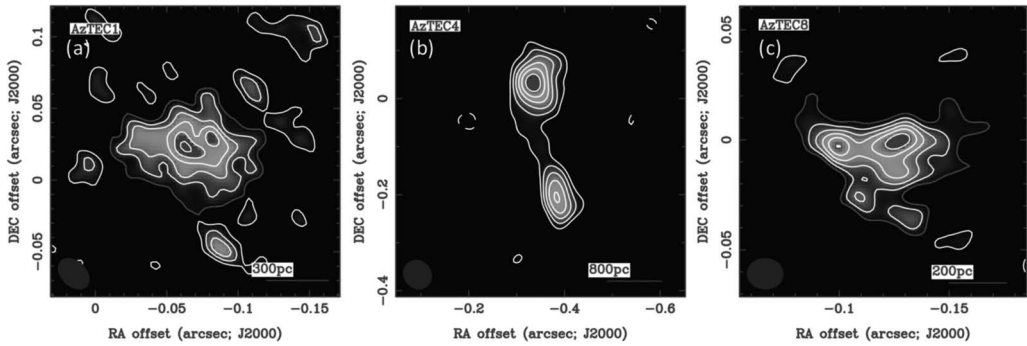


図1 ALMAで観測したサブミリ波銀河の画像。図中左下には各画像の解像度，右下には実スケールを表示している。コントアは 3σ から 1σ のステップで表示。

2. 全3天体とも Maximum Starburstに近いスピードで星を生成している。Maximum Starburstは、星からの輻射とガスの自己重力の釣り合いの関係から求まる星形成の上限値である。
3. 中心付近の物理的な特性が、近傍宇宙で最も活発な星形成銀河である Arp220（の東側の核）と類似している。具体的には、Luminosity Surface Densityが同等である。
4. 中心1 kpc より内側で生成されている星の割合は銀河全体の50%以下であり、残りの半分以上の星形成は「広がった」成分に付随している。

4. 見えてきたサブミリ波銀河の描像と今後の展望

今回得られた観測結果から、どの天体も中心付近が非常にコンパクトであり、かつ複数の塊からなることがわかった。中心付近は近傍の Arp220 と同等の物理状態を示すが、星形成の大部分が1-数kpc に広がっていることが Arp220 との大きな違いである。少なくとも今回観測した三つのサブミリ波銀河においては、中心付近は非常に速いスピードで星を生成しており、そのメカニズムとして銀河の衝突が深くかかわっている可能性があると言えよう。

高分解能観測に特化した今回の観測では、干渉

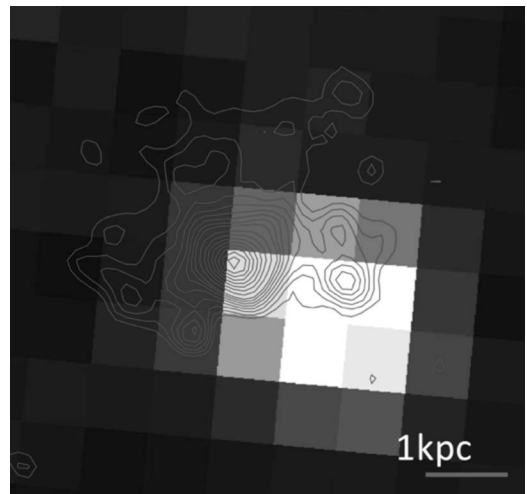


図2 AzTEC1のALMA画像（等高線）とHST（白黒画像）の比較。

計特有の Missing Flux 問題のために、広がった成分を描き出すことはできなかった。短い基線を含む観測データを足し合わせることでこの問題は解消され、より正しく塵の分布を描き出すことができる。そのための観測を Cycle 4 で実行中であり、ここで紹介したサブミリ波銀河の全体像が見えてくる日もそう遠くはない。また、ALMA を使った遠方宇宙の大規模なサーベイ観測が日本を含めた各国で進行中であり^{19), 20)}、近い将来、サブミリ波銀河の描像の解明が進むことが期待される。

最後に、光赤外線観測から得られた画像との比較を紹介したい。図2に示すように、電波 (ALMA)

画像と近赤外線 (HST) 画像では、明るい場所にずれがあることがわかった。このオフセットが実在するものなのか、それとも位置精度の誤差によるものなのかは今後精査していく必要があるが、いずれにせよ、塵に隠された星形成領域と星の構造を直接比較できるようになったのはとても興味深く、大きな進展である。

本観測成果は、2016年9月付けの *Astrophysical Journal Letters* に出版された²¹⁾。

謝 辞

いつも文章の添削をしてくださる植田準子さん、甘日出文洋さんにはたいへん感謝しています。本研究は2015年稲盛財団研究助成の援助をいただいています。

参考文献

- 1) Huges D., et al., 1998, *Nature* 394, 241
- 2) Blain A., et al., 2002, *Phys. Rev.* 369, 111
- 3) Casey C., et al., 2014, *Phys. Rev.* 541, 45
- 4) Hatsukade B., et al., 2011, *MNRAS* 411, 102
- 5) Umehata H., et al., 2014, *MNRAS* 440, 3462
- 6) Tamura Y., et al., 2009, *Nature* 459, 61
- 7) Umehata H., et al., 2015, *ApJ* 815, L8
- 8) Tacconi L., et al., 2013, *ApJ* 768, 74
- 9) Seko A., et al., 2016, *ApJ* 819, 82
- 10) Lagner C., et al., 2014, *ApJ* 148, 77
- 11) Narayanan D., et al., 2015, *Nature* 525, 496
- 12) Keres D., et al., 2005, *MNRAS* 363, 2
- 13) Tamura Y., et al., 2015, *PASJ* 67, 72
- 14) Hatsukade B., et al., 2015, *PASJ* 67, 93
- 15) Fujimoto S., et al., 2016, *ApJS* 222, 1
- 16) Iono D., et al., 2006, *ApJ* 640, L1
- 17) Iono D., et al., 2006, *PASJ* 58, 957
- 18) Ikarashi S., et al., 2017, arXiv:1701.01448
- 19) Kohno K., et al., 2016, *IAUS* 319, 92
- 20) Dunlop J., et al., arXiv:1606.00227
- 21) Iono D., et al., 2016, *ApJ* 829, L10

Understanding the Mechanism of the Most Intense Starbursts in the Universe Daisuke Iono

*National Astronomical Observatory of Japan/
SOKENDAI (The Graduate University of
Advanced Studies), 2-21-1 Osawa, Mitaka,
Tokyo 181-8588, Japan*

Abstract: Submillimeter Galaxies are known to harbor the most intense starbursts in the universe, some of which are forming stars at $1,000 M_{\odot}$ per year. Yet, the detailed processes of the starburst activities are not well understood. We have observed three Submillimeter Galaxies at 0.02 arcs resolution using ALMA, and found that galaxy collisions may be an important mechanism that triggers the immense starburst activity.