

アルマ望遠鏡が明かす 遠方銀河のガスとダスト

稲見華恵

〈広島大学宇宙科学センター 〒739-8526 広島県東広島市鏡山1-3-1〉
e-mail: hanae@hiroshima-u.ac.jp



宇宙初期から現在までの星形成がどのように進化しているのか、アルマ望遠鏡の運用が始まった約10年前にはおおよそのコンセンサスが得られていた。だが、星形成の原材料である分子ガスの観測は近傍宇宙に限られていた。また、初期宇宙における星間ダストによる星形成の影響は未知の領域だった。アルマ望遠鏡の登場は、これらの謎に挑むための待望の瞬間だったのだ。この10年間でアルマ望遠鏡は分子ガスの進化と初期宇宙のダストに関する観測を実現し、宇宙の新たな姿を見せてくれた。初期宇宙のガスとダストの全体像を捉えることで宇宙進化の基礎についての理解が深まり、アルマ望遠鏡を用いた次の10年での遠方銀河探査への準備が整った。

1. 約10年前…アルマ望遠鏡運用開始の頃

アルマ望遠鏡の10周年記念国際会議の開催は、慌ただしい日々の中で一歩立ち止まり、自分自身の10年前を思い出すきっかけとなった。ちょうど博士課程を何とか無事に修了し、学生からポストドクになるキャリアの転換期であった。ただ、当時をときめく赤外線宇宙望遠鏡のあかり天文衛星やスピッツァー宇宙望遠鏡を使った近傍宇宙の星形成銀河を研究していた私は、アルマ望遠鏡とのダイレクトな関わりはほとんどなく、唯一あったのは電波天文学を専攻する友人から毎度のように聞かされる、ウワサのアルマ望遠鏡のスゴさだけだった。その友人はアルマ望遠鏡の運用開始を心底楽しみにしていたようで、我々の宇宙観を一変させる望遠鏡！とよく口にしていた。そうは言っても干渉計とかよくわかんないし…と私が尻込みすると、大丈夫！経験がなくても使えるような工夫をしているから！と心強い励ましをもらったこともよく覚えている。実際に、この友人は正し

かった。だからこそ、私は10周年記念国際会議に出席および成果発表することができ、今この特集記事の原稿を書いている。でも、先見の明があるその友人であっても、私が近傍宇宙を飛び出して遠方宇宙の研究に挑戦することまでは予想していなかっただろう。アルマ望遠鏡は私の研究対象を遠方宇宙の星形成銀河にまで広げてくれたのだ。

1.1 宇宙の星形成史とその要因

宇宙の歴史は星の誕生と死によって支配されている。つまり、星々の集まりである銀河が宇宙誕

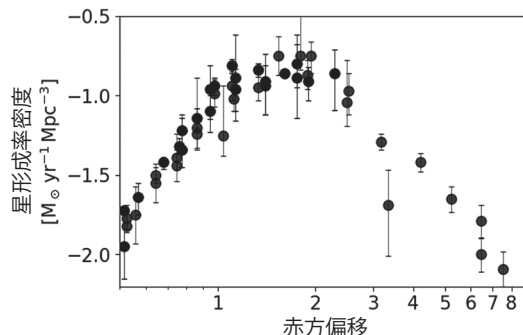


図1 宇宙星形成率密度の時間進化。[1]のレビュー論文をもとに作成。縦軸は常用対数スケール。

生から現在までどのように進化してきたのかを調査することで、宇宙史の概要を掴むことができる。図1は、アルマ望遠鏡による観測が始まる頃にコンセンサスが得られていた、宇宙星形成率密度の時間進化を示した図である [1]。宇宙での星形成率 (SFR, star formation rate) は、現在から約100億年前に遡った頃がピークだった。この図だけ見ると、まるで宇宙進化の大部分を既に理解しているような錯覚をもつが、実際にはどうだろうか。特に、星の原材料であるガスと星形成の現場でガスと混在するダストに着目すると、肝心な部分の理解が進んでいなかったことがわかる。

1.1.1 星形成の原材料：ガス

星が生まれるには、まず、その原材料となる分子ガスが必要である。更には、ガスを何らかのメカニズムで重力収縮させなければ星は生まれないが、その指標となるのが、単位ガス質量あたりの星形成率、星形成効率 (SFE, star formation efficiency) というパラメータだ。つまり、ガス質量と星形成効率を掛け合わせたものが星形成率になる。言い換えれば、ガス質量または星形成効率のどちらかがわからなければ、図1の星形成進化史の根底を解明することができない。もし、ガス質量の進化が星形成率の進化と相似するならば、宇宙のどの時代でも星形成効率はほぼ進化せず一定であったと考えられるし、その逆に、ガス質量がほぼ一定であった場合、時代によって星形成効率が変化したと考えられ、星形成メカニズムの変動が宇宙進化の鍵を握っていたと考えられる。しかし、10年前、銀河がもつガス質量の測定は近傍宇宙に限られ、遠方銀河の星形成の成因は未知のままであった [2]。

1.1.2 隠された星形成：ダスト

図1に依存して話は進んでいるが、この図は本当に宇宙での星形成の姿を網羅しているのだろうか。生まれたての星は紫外線を放射するので紫外線光度から星形成率を見積もることができるが、星が生まれる環境は往々にしてダストに覆われて

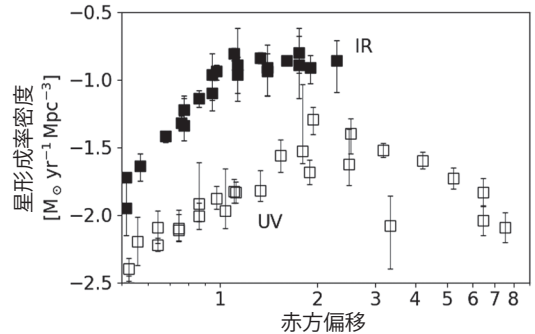


図2 図1に示した宇宙星形成率密度の時間進化を紫外線 (白四角) と赤外線 (黒四角) による測定結果に分離した。 [1] のレビュー論文をもとに作成。縦軸は常用対数スケール。

いるために紫外線放射が観測者に届かないことがある。一方で、隠された紫外線はダストに吸収され、赤外線領域で再放射される。星形成率を正確に求めるには、紫外線と赤外線の両方による観測が必須なのだ。図1は、紫外線と赤外線の両方を足し合わせた星形成率密度であるが、両者を分離させたプロットを図2に示す。紫外線による観測は宇宙の極初期である120億年以上前まで達成できているが、赤外線による観測は100億年程度前、宇宙進化のピーク頃までしか実現できていなかった。そのため、初期宇宙 (およそ100億年よりも前) での星形成の全体像、特に赤外線で見えないダストに隠された星形成は明らかにされていなかった。ダストの存在がいつ頃から顕著になったのか、初期宇宙はダストに溢れていたのか、最初のダスティな銀河はどのようにして生まれたのか、未解明であった [3]。

ガスとダスト両者の進化の解明に対して、これまでの電波望遠鏡よりも格段に感度がよいアルマ望遠鏡に寄せられる期待は大きかった。

2. アルマ望遠鏡による銀河ガス探査

アルマ望遠鏡のもつ連続した観測バンドは深宇宙探査に都合がよい。観測バンドをうまく組み合わせることで複数の輝線を同時に検出することが

でき、確実に分光赤方偏移を決めることができるのである。アルマ望遠鏡の遠方宇宙探査分野での最初の大型プログラムである ASPECS (the ALMA Spectroscopic Survey in the Hubble Ultra Deep Field) はこの特徴をうまく利用し、バンド3と6の全周波数帯域をスペクトラル・スキャンするサーベイ観測をハッブル・ウルトラ・ディープ・フィールドで行った [4]。この2つのバンドを使うことで、水素分子ガス (H_2) をトレースする一酸化炭素 (CO) の輝線を複数の回転遷移で赤方偏移1から10程度まで同時に捉えられる。つまり、銀河の赤方偏移をバッチリ決めたいうえで、念願のガス質量も測れるのである。おまけに、輝線が受かっていない周波数帯のデータを用いることでダスト連続光も同時に測定できる。

ASPECSがとったこの観測手法でサーベイ観測を行う最大の利点は、ターゲット銀河を事前に選択する必要がなく、一定の検出限界で、とある宇宙体積での観測をするため、バイアスが少なくより完全な分子ガス探査を実現できることである。実際に、ASPECSがサーベイ観測で検出した銀河は、ターゲット観測では選ばないような、主系列銀河でありながらも星形成率も星質量も低めなのが含まれている [5-7]。また、スタック解析により、天の川銀河の1/10程度の小さな銀河がもつガス量の調査も可能にした [8]。肝心のガス質量の調査では、プロジェクトの当初の目標通り、約100億年前から現在までの宇宙での分子ガス質量密度の進化を突き止めることができた (図3) [9, 10]。図1の星形成率の進化と見比べると、両者がよく類似していることがわかる。この結果から、星形成率の進化は分子ガスの存在量によって左右されていたことが示された。星形成効率に密に関係する星形成メカニズムは、現在も過去もそれほど変化がなかった可能性が高いとも言える。アルマ望遠鏡のおかげで、長年の期待であった宇宙星形成を支配する要因がようやく明かされたのである。

アルマ望遠鏡の輝線観測では、隠された星形成

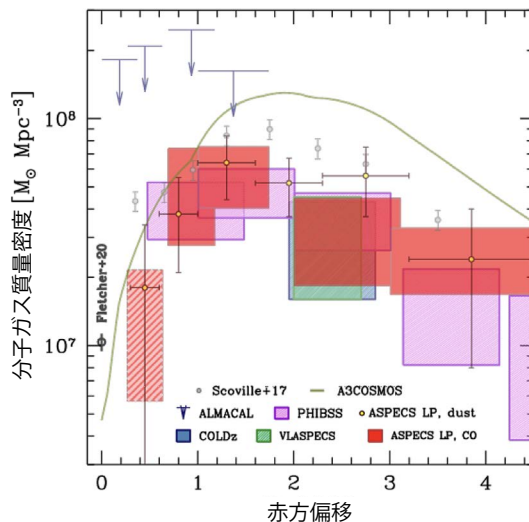


図3 アルマ望遠鏡が突き止めた分子ガス質量密度の進化。赤方偏移1-4にある4つの濃い四角がASPECS大型プログラムにより得られた結果である。 [10] より転載。

を示唆するダスト連続光も同時観測できると述べたが、次はこちらの結果も見てみよう。果たして、未探査だった100億年以上前の宇宙にダスティな銀河はいたのか。

3. アルマ望遠鏡が見つけたダスティな銀河

ASPECSはハッブル・ウルトラ・ディープ・フィールドの探査を行ったが、この領域はGOODS-S深宇宙探査領域の中にある。この有名領域全体やその一部で、アルマ望遠鏡によるダスト連続光サーベイ観測がいくつか実施された [11-14]。最大の目的は遠方宇宙にあるダストに隠された銀河の検出である。いずれのプロジェクトも狙い通りにダスティな銀河の検出に成功したが、その大半は赤方偏移3程度 (約110億年前) までであった。また、これらの銀河は短波長での観測 (可視光線や近赤外線) でも対応天体があるものがほとんどであった。だが、データを更に掘り下げてみると、あのハッブル宇宙望遠鏡でさえも見つけられなかった銀河がアルマ望遠鏡から発

見されたのだ [15, 16]. 銀河スペクトルと赤方偏移の関係から、近赤外線よりも短い波長では見えないが、より長い波長で見える銀河は、高赤方偏移である確率が非常に高い。実際にこれらの銀河の測光赤方偏移は3以上ばかりである(全サンプルの測光赤方偏移の中央値は4程度)。アルマ望遠鏡により、ついに、100億年以上前にもダスティな銀河がいたこと、しかも、ひょっとしたら予想していた以上にその存在は普遍的であったかも知れない可能性が示されたのだ。

とは言っても、赤方偏移4(約120億年前)程度までの検出である。図2で紫外線による星形成率密度と比較すると、赤外線による調査の空白領域は赤方偏移8までである。アルマ望遠鏡で更に昔の宇宙までダスティな銀河を見つけられるのだろうか。

4. 120億年以前の銀河を探せ

赤方偏移4以上のダスティ銀河探しは、連続光観測ではなく輝線観測でも実現できる。アルマ望遠鏡は輝線と連続光を同時に観測できるからだ。輝線検出で赤方偏移も正確に決まるし、ある意味一石二鳥である。欠点は、2節で述べた ASPECS の利点を全て失うことである(ターゲットの事前選定が必要、検出限界や観測する宇宙体積もバラバラになる可能性あり)。だが、高赤方偏移の銀河が放つ非常に高光度な炭素イオン ($[\text{CII}]158\ \mu\text{m}$) と酸素イオン ($[\text{OIII}]88\ \mu\text{m}$) のガス輝線がアルマ望遠鏡の観測領域に入ってくる利点を利用しない手はない。実際に、この作戦は赤方偏移4以上の遠方銀河探しに効率がよいことが示され、アルマ望遠鏡により次々に赤方偏移4から8にある銀河が見つかったのだ [17-21]。宇宙誕生からわずか10億年の頃に既にダスティな銀河がいたことはかなりエキサイティングな結果だが、大きなサンプルによるまとまった観測で統計的な調査を行わない限り、初期宇宙においてダストが普遍的に存在していたかはわからない。

5. 宇宙誕生からわずか10億年頃の銀河探索

宇宙の極初期(宇宙年齢10億年頃)の銀河を統計的に調査すべく、アルマ望遠鏡の大型観測プログラム REBELS (the Reionization Era Bright Emission Line Survey) がサイクル7で採択、実施された [22]。こちらもターゲット観測の利点を活かしたプロジェクトである。測光赤方偏移で6.5以上(宇宙年齢8.5億年以前)と想定されるライマン・ブレイク銀河を40個選び、アルマ望遠鏡の分光スキャン観測で $[\text{CII}]158\ \mu\text{m}$ または $[\text{OIII}]88\ \mu\text{m}$ の検出を目指した。この作戦が功を奏し、27/40(68%)の割合で $[\text{CII}]158\ \mu\text{m}$ を見つけ、宇宙年齢10億年以前であることを示す遠赤外線輝線銀河のサンプルを3倍以上にも増やした。特に目覚ましいことに、アルマ望遠鏡による約60時間のこの大型プログラム観測で発見された赤方偏移7以上の銀河数は、10年以上前から推進されてきた紫外線領域にあるライマン・アルファ輝線を用いた超遠方銀河探索で発見された2022年当時の数を凌いだのだ。

ガス輝線の発見で大活躍したアルマ望遠鏡だが、同時観測されたダスト連続光の検出についても驚くものであった。40個のターゲットのうち16個の銀河でダスト放射を見つけたのだ [23]。これにより、宇宙年齢7億年頃でのダスティ銀河のサンプル数が5倍以上に拡大された。更に興味深いことに、短波長側で対応天体がない銀河が2つも発見された [24]。宇宙誕生から約7億年の時代に、紫外線も可視光線も放射されない、完全に塵に覆われた銀河が存在したのだ! この大量の塵がわずか7億年で形成されるとは予想外である。ダストの形成と成長は、我々が思っていたよりも早かったのか効率がよかったのか、新たな発見により新たな謎が生まれた。アルマ望遠鏡は、未達成であった初期宇宙探査の新たな扉を開くと同時に、ワクワクする新たなミステリーをもたらしてくれた。

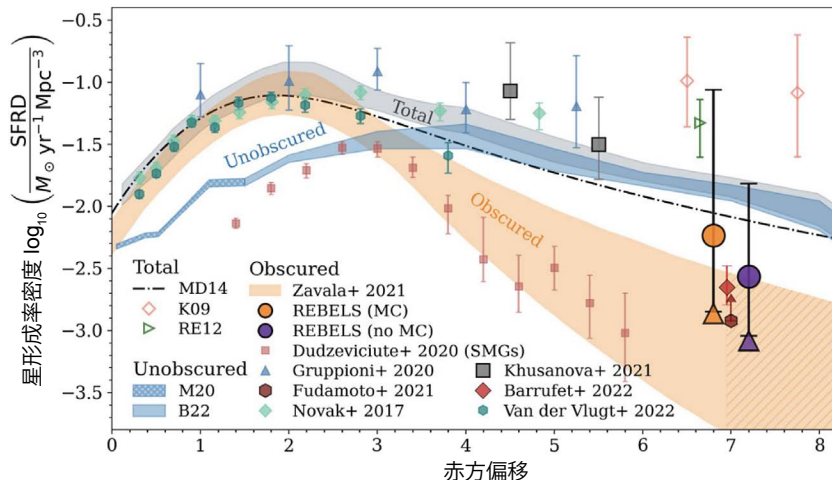


図4 アルマ望遠鏡により得られた、ダストに隠された星形成率密度（赤方偏移7にある大きな丸 [28]・菱形 [29]・六角 [24]、赤方偏移5前後の大きな四角 [26]、赤方偏移1-5の三角 [27]）。予想されていたよりも初期宇宙にはダスティな銀河が多く存在していたようだ。[28]より転載。縦軸は常用対数スケール。

6. 約120億年前の隠された星形成

では、新たに発見されたダスティな銀河たちは、図2（下図）の赤外線のみで星形成率に一体どれだけ寄与するのだろうか。先に述べた通り、ターゲット観測の欠点である、観測対象銀河の選定バイアス、検出限界と観測した宇宙体積が一定でないこと等をうまく補正しないと、宇宙全体での平均値を正しく求めることができない。私と一緒に研究を進めているポスドク研究員Algera氏の尽力により、REBELS銀河を用いた赤方偏移7での赤外線星形成率密度を求めることができた（図4）。本稿では触れなかったが、もう一つのアルマ望遠鏡大型観測プログラムであるALPINE（ALMA Large Program to INvestigate CII at Early Times[25]）が求めた赤方偏移4から5あたりの結果 [26, 27] と合わせると、アルマ望遠鏡以前に未知だった赤方偏移3以上の時代でも、ダストに隠された星形成が有意にあったことが見て取れる。宇宙初期に向かうに連れて次第に減少していくが、赤方偏移7でも予想以上に多くのダスティ銀河が存在していたようだ。

ダストの形成には、AGB星（漸近巨星分枝星，asymptotic giant branch stars）や超新星爆発が必要だが、宇宙開闢から10億年程度では主系列星はAGB星に進化できないため、初期宇宙では超新星爆発が主なダストの供給源だと考えられる。超新星爆発は、寿命が約数1千万年以下と短い大質量星に起因するからだ。しかし、超新星爆発はその衝撃波でダストを破壊することもあり、現在の理論計算が推定する超新星爆発によるダスト供給で実際に観測されたダスト質量を説明するには結構ギリギリである。アルマ望遠鏡によるさらなる観測およびダスト形成理論の発展が期待される。

7. アルマ望遠鏡が明かした初期宇宙のガスとダスト

この10年間のアルマ望遠鏡の活躍により、長年期待されていた図3と図4の成果を得ることができた。宇宙の極初期にはダストを大量にもつ銀河が既に存在し、ダストに隠された星形成が行われていた。また、星形成の進化は主に分子ガスの存在量に支配されていた、つまり、星形成効率の変化はほとんどないことを明らかにすることができ

た。10年前にはベールに隠されていた宇宙進化の全体像をようやく捉え始めることができるようになったのだ。だが、これはまだ始まりに過ぎない。

全体として、ガスの存在量が星形成の進化を担うようだが、銀河によっては星形成効率のバラツキが結構大きいことも分かってきた。比較的安定した星形成を行う主系列銀河の星形成の7割程はガスの存在量によって促されているが、激しい星生成活動を行うスターバースト銀河ではその割合は3割程度だとする結果もでてきている [30]。アルマ望遠鏡運用から10年たった今、ようやくと銀河を種族等に分けて調査することができるようになってきており、銀河の多様性が見え始めてきている。

8. 次の10年

実は、本稿に触れた成果ではアルマ望遠鏡の実力のほんの一部しか使われていない。バンド1と2の運用はこれからだが、利用可能だったバンド3から10のうち使用されたのはバンド6から8までに集中している。また、コンパクトなアンテナ配置を用いた空間分解能が低め（1秒角程度）のものばかりである。これまで得られた結果をもとに、さらにアルマ望遠鏡のスペックをフル活用することで、まだまだ新たな発見が期待される。

高空間分解能の観測は特に明るい銀河を対象にしたものが既に始まっているが、ガスやダストのクランプが見つかった一方で、スムーズな分布をしている銀河や中心にコンパクトにまとまっている銀河も見つかってきている [31-34]。これまで、ごく近傍の銀河でしか実現できなかった、銀河を空間分解した星形成率面密度と分子ガス質量面密度の関係（ケニカット・シュミット則）の調査も始まりつつある [35, 36]。また、複数の観測バンドを同時観測することで、仮定値を減らしてダスト放射スペクトルを描くことができるようになり、ダストの性質や隠された星形成率を正確に求められるようになる [37]。低周波側バンドの観測では、高赤方偏移銀河におけるCO分子輝線

の複数同時検出を可能にする [38]。高周波側バンドでは、これまであまり狙われてこなかった [CII]158 μm と [OIII]88 μm 以外の輝線 [OIII]52 μm , [NIII]57 μm , [OI]63 μm などを捉え、星間物質の物理や化学に迫ることができる。そう、遠方銀河の真の姿を捉えるのは、まだまだこれからなのである。

10年経ったアルマ望遠鏡は、まだまだ天文学の最前線にいるのだ。遠方銀河がどのように生まれ進化するのか、次の10年はその物理的・化学的背景を明らかにする10年だ。

謝辞

電波観測の素人だった私がALMAに深く関わるきっかけを作ってくれたASPECSやREBELSの共同研究者に感謝します。本稿の寄稿にお声掛けいただきました廿日出さんと天文月報編集委員の皆さんに大変お世話になりました。この場を借りてお礼を申し上げます。

参考文献

- [1] Madau, P., & Dickinson, M., 2014, *ARA & A*, 52, 415
- [2] Carilli, C. L., & Walter, F., 2013, *ARA&A*, 51, 105
- [3] Casey, C. M., et al., 2018, *ApJ*, 862, 77
- [4] Walter, F., et al., 2016, *ApJ*, 833, 67
- [5] Aravena, M., et al., 2019, *ApJ*, 882, 136
- [6] Boogaard, L. A., et al., 2019, *ApJ*, 882, 140
- [7] Boogaard, L. A., et al., 2020, *ApJ*, 902, 109
- [8] Inami, H., et al., 2020, *ApJ*, 902, 113
- [9] Decarli, R., et al., 2019, *ApJ*, 882, 138
- [10] Decarli, R., et al., 2020, *ApJ*, 902, 110
- [11] Dunlop, J. S., et al., 2017, *MNRAS*, 466, 861
- [12] Hatsukade, B., et al., 2018, *PASJ*, 70, 105
- [13] Franco, M., et al., 2018, *A&A*, 620, A152 (ADS Bibcode: 2018A&A...620A.152F)
- [14] Yamaguchi, Y., et al., 2020, *PASJ*, 72, 69
- [15] Wang, T., et al., 2019, *Nature*, 572, 211
- [16] Xiao, M. Y., et al., 2023, *A&A*, 672, 18
- [17] Harikane, Y., et al., 2020, *ApJ*, 896, 93
- [18] Hashimoto, T., et al., 2019, *PASJ*, 71, 71
- [19] Sugahara, Y., et al., 2021, *ApJ*, 923, 5
- [20] Tamura, Y., et al., 2019, *ApJ*, 874, 27
- [21] Bakx, T. J. L. C., et al., 2020, *MNRAS*, 493, 4294
- [22] Bouwens, R. J., et al., 2022, *ApJ*, 931, 160
- [23] Inami, H., et al., 2022, *MNRAS*, 515, 3126
- [24] Fudamoto, Y., et al., 2021, *Nature*, 597, 489
- [25] Le Fèvre, O., et al., 2020, *Astron. Astrophys.*, 643, A1

(ADS Bibcode: 2020A&A...643A...1 L)

- [26] Khusanova, Y., et al., 2021, *Astron. Astrophys.*, 649, A152
- [27] Gruppioni, C., et al., 2020, *A&A*, 643, A8
- [28] Algera, H. S. B., et al., 2023, *MNRAS*, 518, 6142
- [29] Barrufet, L., et al., 2023, *MNRAS*, 522, 3926
- [30] Scoville, N., et al., 2023, *ApJ*, 943, 82
- [31] Hodge, J. A., et al., 2019, *ApJ*, 876, 130
- [32] Ivison, R. J., et al., 2020, *MNRAS*, 495, L1
- [33] Herrera-Camus, R., et al., 2021, *A&A*, 649, A31
- [34] Mitsuhashi, I., et al., 2023, The ALMA-CRISTAL survey: Widespread dust-obscured star formation in typical star-forming galaxies at $z=4-6$, (arXiv:2311.17671 [astro-ph])
- [35] Béthermin, M., et al., 2023, *A&A.*, 680, L8
- [36] Vallini, L., et al., 2024, *MNRAS*, 527, 10
- [37] Algera, H. S. B., et al., 2024, *MNRAS*, 527, 6867
- [38] Boogaard, L. A., et al., 2021, *ApJ*, 916, 12

Gas and Dust in Distant Galaxies Seen by ALMA

Hanae INAMI

Hiroshima University, Hiroshima Astrophysical Science Center, 1-3-1 Kagamiyama, Higashihiroshima, Hiroshima 739-8526, Japan

Abstract: Ten years ago, there was a general consensus on how star formation evolved from the early Universe to the present. However, observations of molecular gas, the raw material for star formation, were limited to the nearby Universe. The effect of interstellar dust on star formation in the early Universe also remained unknown. The advent of the ALMA telescope provided a long-awaited opportunity to tackle these mysteries. Over the past decade, ALMA has realized observations of gas and dust in the early Universe, revealing new facets of the cosmos. With the overall picture of the gas and dust evolution now in hand, ALMA is paving the way to explore the underlying physics and chemistry of distant galaxies in the coming decade.