

論文の内容の要旨

Study of the cosmic star formation history based on a multi-wavelength analysis of ALMA continuum sources and an unbiased search of millimeter line emitters

(ALMA 連続波天体の多波長解析と無バイアスミリ波輝線銀河探査に基づく宇宙星形成活動史の研究)

氏名：山口 裕貴

銀河がどのように星を形成し宇宙を現在の形につくりあげてきたのかという問題は、現代天文学が解明すべき最重要課題の一つである。この問題の解決を目指す上で、宇宙初期から現在にわたる星形成活動の変遷とその原因を調べることは必要不可欠なステップである。本論文は、アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計 (Atacama Large Millimeter/sub-millimeter Array; ALMA) を用いて、赤方偏移およそ 0.3-6 に至る時代での銀河の星形成活動と星形成の原料である分子ガスの観測という二つの切り口から宇宙星形成活動史の解明に迫ることを目的としている。

近年の研究により、宇宙星形成密度の変遷が徐々に明らかになってきた。しかしながら、赤方偏移 3-4 を超えるような高赤方偏移の宇宙における、ダストに覆われた星形成活動が果たす役割はまだ明らかにされていない。ダストに覆われた星形成活動は、遠赤外線からミリ波・サブミリ波と呼ばれる波長帯の光によって観測されるが、従来の単一鏡望遠鏡による観測では空間分解能の悪さに起因するコンフュージョン限界のために、高赤方偏移の宇宙におけるダストに覆われた星形成活動を完全に分解することは難しかった。そこで本研究では ALMA を用いた波長 1.2 mm 帯における無バイアスな深撮像 (ALMA twenty-Six Arcmin² survey of GOODS-S At One-millimeter; ASAGAO) で得られた高感度・高空間分解能データ ($\sigma \sim 30-70 \mu\text{Jy}$, 角度分解能 ~ 0.5 秒) を基に ASAGAO で検出された天体 (以降 ASAGAO 天体) の性質および宇宙星形成率密度への寄与を調査した。

第 2 章では ASAGAO データの詳細および ASAGAO 天体の性質を調べるために用いた多波長データについて解説している。本研究で探査した GOODS-S は、全天の中でも最も高感度な多波長データが利用できる領域の一つであり、多波長データの解析を必要とする研究に非常に適した領域である。

第 3 章では近赤外線 K バンドで検出された銀河のカタログである ZFOURGE カタログに対応天体を持つ 66 個の ASAGAO 天体 ($S/N > 3.5$) に対して多波長データ解析を行った。このサンプルサイズは観測波

長 1.2mm における微弱な銀河 (フラックス密度 1.0 mJy 未満) の研究としては最大のものである。本研究では、可視光からミリ波帯における測光値に対し、銀河のエネルギー放射密度分布 (Spectral Energy Distribution; SED) モデルをフィットさせることで ASAGAO 天体の ~90%程度が星形成銀河の主系列と呼ばれる関係を満たす一般的な星形成銀河 (赤方偏移 ~0-5) であることを示した。ところが同様の星形成活動を示す銀河であっても、ALMA で検出されていない銀河も多く発見された。銀河の赤外線光度と紫外線光度の比 ($IRX \equiv L_{IR}/L_{UV}$) に着目すると、ALMA で検出された天体は検出されていない天体に比べ系統的に ~1-2 桁程度高い IRX 値を持っていることが明らかになった。角度分解能 0.2 秒のデータを用いて空間分解した ASAGAO 天体における IRX と静止系紫外線における連続光成分のスペクトル指数 (β) との関係を調べたところ (図 1), これらの系統的な差は銀河におけるダストと星の分布の違いによってその一部が説明される可能性があることが示された。空間分解した高赤方偏移銀河の IRX- β 関係はこれまで 1 例しか研究されていなかったが、本研究では 10 天体以上のサンプルサイズでこの関係を調べることができた点が新しい。

本研究では ALMA のデータを用いることにより、K バンド対応天体をもつ ASAGAO 天体の宇宙星形成率密度への寄与を赤方偏移 0-5 に渡って赤外線光度 ~ $10^{11} L_{\odot}$ まで分解することができた (図 2)。ASAGAO 天体の宇宙星形成率密度への寄与は、過去の研究によって得られた形と同様の形で進化することすなわち、赤方偏移 2-3 でピークを示し、赤方偏移 0 に向かって減少していくことが分かった。これら ASAGAO 天体は赤方偏移 2-3 で宇宙の星形成率密度の大半を担っている一方 (紫外線+赤外線で得られる星形成率密度の ~60%, 赤外線で得られる星形成率密度の ~80%), 赤方偏移 2 よりも近傍の宇宙では ASAGAO 天体よりも赤外線光度の暗い種族が星形成の主役になっていることが示された。赤方偏移 3 を超える高赤方偏移宇宙では、不定性が大きいものの、ASAGAO 天体は過去に単一鏡での掃天観測で検出された明るいサブミリ波銀河 (SMG) と同程度以上の寄与をしていることが示唆される。

ASAGAO では K バンド対応天体を持たない ALMA 連続波天体候補も複数検出された。第 4 章ではこれらのうち ALMA における S/N が 5 を超えている 5 天体 (以降は K-dropout ASAGAO 天体) についてその性質および宇宙星形成率密度への寄与を調べた。ASAGAO のような広領域かつ高感度の ALMA 観測を基に近赤外線で暗いミリ波天体 (フラックス密度 1 mJy 未満) を系統的に探索したことは本研究のユニークな点である。これら K-dropout ASAGAO 天体のうち 1 天体は *Spitzer*/IRAC 3.6 μm ・4.5 μm に対応天体が見つかっている。また、もう 1 天体は SCUBA2 および ALMA Band 7 の観測によって 850 μm と 870 μm で対応天体が検出されている。残りの 3 天体では ASAGAO 以外では対応天体が見つからなかった。K-dropout ASAGAO 天体の可視光から電波帯の SED や電波とミリ波におけるフラックス密度比は、これら K-dropout ASAGAO 天体が赤方偏移 3-5 付近に存在する可能性を示唆している。K-dropout ASAGAO 天体の星質量や星形成率はこれらの天体が大質量銀河の形成初期段階にある可能性を示している。K-dropout ASAGAO 天体の宇宙星形成率密度への寄与を推定すると、赤方偏移 3-5 の宇宙において明るい SMG と同程度以上の寄与をしている可能性が示された (図 2)。本研究により、近赤外線で暗い ALMA 天体は高赤方偏移宇宙の星形成率密度に対して無視できない寄与をしていることが判明した。これは ALMA による無バイアス観測が、従来の可視光・近赤外線深探索では分解しきれない星形成活動を検出できることを示していると考えられる。

宇宙星形成史の解明には、連続波の観測だけではなく、分光観測によるミリ波・サブミリ波輝線銀河探索も有力な手段である。例えば、一酸化炭素 (CO) 分子の回転遷移輝線は星形成の燃料である分子ガス

を捉えることができる。また炭素の一階電離イオンからの禁制線 ([CII] 158 μm 線) は赤方偏移 6 を超える宇宙でのダストに覆われた星形成活動の指標となる。ところが、従来行われているミリ波・サブミリ波輝線銀河探査の多くは可視光・近赤外線で見つけられる明るい銀河や SMG の追観測といったバイアスがかかったものに限られていた。宇宙星形成率密度の進化を調べるためには、無バイアスの輝線銀河探査が必要である。近年では ALMA を用いて複数の周波数設定での観測を行い、合計約 60 GHz (周波数チューニング数 8) をカバーする分光撮像データを用いた無バイアス輝線銀河探査も行われるようになってきたが、その観測領域はまだ大変狭い (約 1-4 arcmin²) 宇宙星形成率密度への寄与が大きいと考えられている一般的な星形成銀河からの輝線を調べるためには、従来よりも暗いミリ波・サブミリ波輝線銀河を検出する必要がある。

そこで第 5 章では、重力レンズ銀河団の ALMA データを用いた無バイアスミリ波輝線銀河探査の結果を報告する。解析に使用したのは 4 つの重力レンズ銀河団領域 (RXJ1347.5-1145, Abell S0592, MACS J0416.1-2403, Abell 2744) の ALMA データであり、観測領域の面積は合計 ~ 16 arcmin²、また観測周波数範囲は合計約 7.5GHz (周波数チューニング数は 1) である。これらのデータから周波数幅 60 MHz (およそ 66.7 km/s) と 100 MHz (およそ 111 km/s) の 3 次元 S/N データキューブを作成し、CLUMPFIND を用いてミリ波輝線銀河探査を行った。今回の探査では優位な (S/N > 5) 輝線天体は検出されなかったが、この探査により、CO(3-2), CO(4-3), CO(5-4), [CII] 158 μm の輝線光度関数 (それぞれ赤方偏移 $\sim 0.3, \sim 0.7, \sim 1.2, \sim 6$) に制限を与えた。本研究では重力レンズ銀河団による増光効果を用いることにより、これまでの観測よりも 1 桁程度以上暗い領域まで制限することに成功している [それぞれ $< 10^{-3}-10^{-1}$ /Mpc³ ($L'_{\text{CO}} = 10^8-10^{10}$ K km/s pc²), $< 10^{-3}-10^{-2}$ /Mpc³ ($L_{[\text{CII}]} = 10^8-10^{10} L_{\odot}$); 図 3・図 4]。本研究で与えられた制限は、過去の準解析的進化モデルによって予測されたミリ波輝線銀河光度関数の進化に矛盾しないことがわかった。本研究により、1 周波数チューニングの広範囲観測が輝線光度関数を制限する上で有用な手段であるということが示された。

本研究では、ALMA 連続波探査によって宇宙星形成史の中における微弱なミリ波天体の役割を赤方偏移 0-5 にわたって分解し、それに加えて輝線銀河探査により宇宙星形成率密度の進化が星の原料である分子ガスの枯渇であるというモデルに矛盾しない結果が得られた。また、高赤方偏移の宇宙においてこれまでの観測では見逃されてきた星形成活動の存在が示唆することができた。まもなく ALMA を使った重力レンズ銀河団 33 領域の大型観測プログラム (ALMA Lensing Cluster Survey) が開始される予定である。そのデータに基づく微弱な (サブ) ミリ波連続波銀河およびミリ波輝線銀河の探査により、宇宙星形成率密度の進化とその原因について、より厳しい制限が与えられるようになることが期待される。

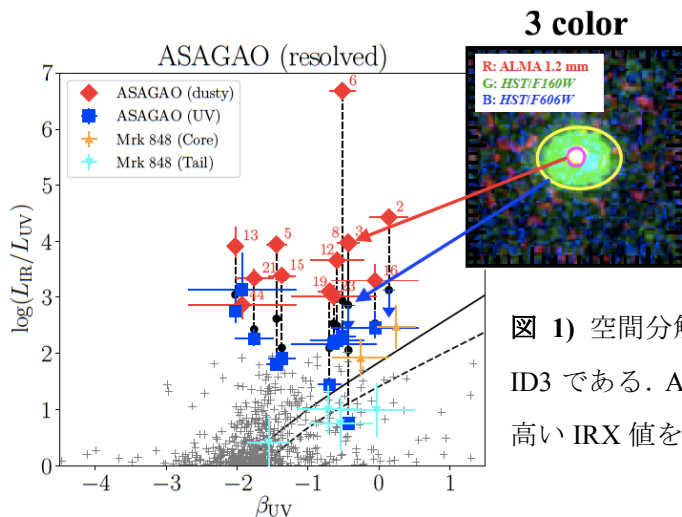


図 1) 空間分解した ASAGAO 天体の IRX- β 関係。右上の例は ID3 である。ALMA で検出された部分は銀河の中心部分にあり、高い IRX 値を持つ。

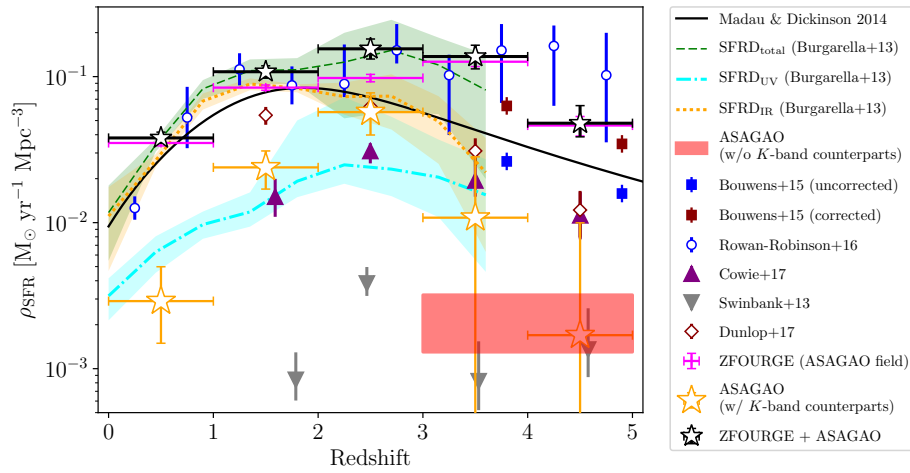


図 2) 宇宙星形成率密度の変遷を赤方偏移の関数としてプロットした図。オレンジの星印が K バンド対応天体をもつ ASAGAO 天体の宇宙星形成率密度への寄与、赤く囲われた領域は K -dropout ASAGAO 天体の宇宙星形成率密度への寄与を示している。 K バンドに対応天体をもつ ASAGAO 天体は赤方偏移 2-3 の宇宙で星形成率密度に大きく寄与していることが分かる。また、赤方偏移 3-5 の宇宙では K -dropout ASAGAO 天体の宇宙星形成率密度への寄与が明るい SMG による寄与 (Swinbank et al. 2014) と同程度以上であることが示されている。

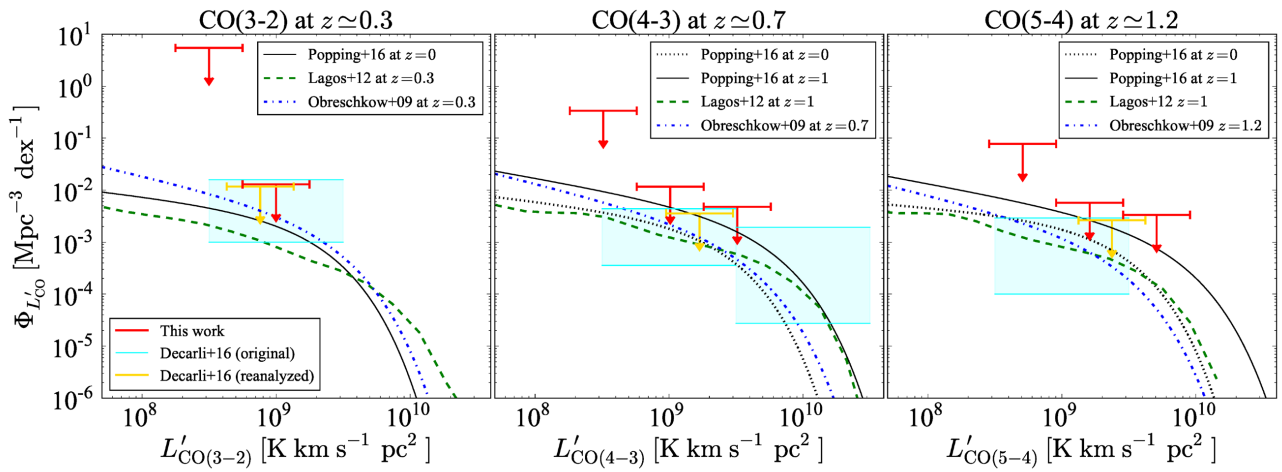


図 3) 本研究で得られた CO 輝線光度関数への制限。赤の上限值が本研究で得られた制限値である。重力レンズによる増光効果のため、先行研究よりも暗い領域まで観測的な制限を加えている。

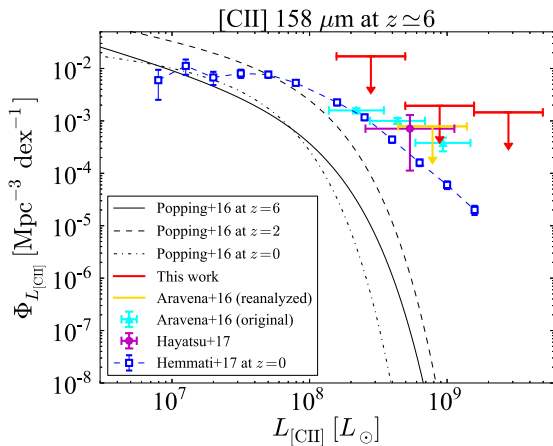


図 4) 本研究で得られた [CII] 輝線銀河光度関数への制限。赤の上限值が本研究で得られた上限値である。赤方偏移 6 においては、過去の観測によって得られた制限と矛盾しない結果が得られていることが分かる。