

論文内容の要旨

論文題目：

**Study of Dust-Obscured Massive Galaxies beyond Redshift 5
based on Submillimeter Photometric and Spectroscopic Surveys**
(サブミリ波測光・分光サーベイに基づく
赤方偏移 5 を超えるダストに隠された大質量銀河の研究)

氏名 五十嵐創

現在の宇宙において、銀河団の中心にみられるような、銀河が持つ星の総質量（以降、銀河の星質量）が約 $10^{11}M_{\odot}$ あるいはそれ以上になるような銀河は、いつ、どのようにして形成されたのであろうか。 Λ CDM に基づく銀河形成理論によれば、大質量の銀河団は、赤方偏移が 5 を超える時代に既に形成を始めていることが期待される。さらに、銀河団の中心に存在するような大質量銀河は、形成当初に $1000 M_{\odot}/\text{yr}$ あるいはそれ以上という凄まじい爆発的星形成を伴うことも予想されており、こうした大質量銀河の前駆体は、ミリ波・サブミリ波帯で明るく輝く、サブミリ波銀河 (SMG) として観測されることが期待される。実際、ここ 10 年以上にわたって爆発的に発展してきたミリ波サブミリ波帯での掃天観測により、多くのサブミリ波銀河が初期宇宙に検出され、観測的宇宙論に新たな革命をもたらしてきた。SMGs は、初期宇宙において、既に最も質量の大きい銀河種族の一つであることが示唆されつつあり、従って、そうした大質量銀河種族である SMGs が、赤方偏移 5 を超えるような時代の初期宇宙に、どれほど存在するか、また、どのような環境下に存在するか、を明らかにすることは、現在の銀河形成理論に対して、強い制限を与える可能性がある。しかしながら、赤方偏移 5 を超えるような SMGs の発見・同定は、なお観測的・技術的に多くの困難を伴っており、まだ数えるほどしか検出されていないのが現状である。

こうした現状を踏まえ、本研究では、サブミリ波望遠鏡 ASTE とミリ波カメラ AzTEC を駆使し、波長 $1100\mu\text{m}$ 帯で、すばる/XMM-Newton 深宇宙探査領域 (SXDF) およびすばる深宇宙探査領域 (SDF) の、かつてない深く広い測光サーベイ観測を実施した。この波長帯が示すユニークな特徴、すなわち、強い負の K 補正の恩恵により、本サーベイでは、赤方偏移が 1 から 10 に至る幅広い赤方偏移範囲において、赤外線光度が $10^{12}L_{\odot}$ を超える銀河の検出が可能である。すばる望遠鏡や Spitzer 衛星・Herschel 衛星・電波干渉計 JVLA などのデータを駆使し、ダストに深く覆われた爆発的星形成銀河種族が、どのような赤方偏移分布を示すのかを調べると共に、赤方偏移が 5 を超えるような SMGs の候補を探索した。さらに、そのような候補のうち最も有力な SMG について、サブミリ波干渉計 SMA を使った [CII] $158\mu\text{m}$ 輝線の無バイアス分光撮像

サーベイを実施し、赤方偏移 5.7 の爆発的星形成銀河を複数個発見することに成功した。こうしたデータをもとに、赤方偏移が 5 を超える大質量星形成銀河の性質、特に、星質量と星形成率の関係や、サブミリ波放射源としての「多重度」に着目した研究を行った。以上のような研究の背景、および、本論文の目的を、第 1 章にまとめた。

第 2 章では、ASTE/AzTEC による SXDF および SDF での広く深い測光サーベイ観測と、その結果得られた 1100 μm 選択の銀河カタログ（以降 AzTEC 銀河）について詳述している。本観測ではコンフュージョン限界に達する雑音レベルを実現した。SXDF では、1201 平方分に及ぶ画像が得られ、281 個の銀河が検出された。SDF では、213 平方分の画像から 35 個が検出された。

第 3 章では、AzTEC 銀河の、他の波長での対応天体を同定するため、JVLA 21cm 帯・Herschel/PACS の 100 μm と 160 μm 帯・Spitzer/MIPS の 24 μm 帯および IRAC の 3.6–8 μm 帯のデータを使った解析とその結果を報告している。約 59% の AzTEC 銀河が、少なくとも 1 個以上の、統計的に確からしい対応天体を持ち、さらに約 15% の AzTEC 銀河は、複数の、統計的に確からしい対応天体を持つことが分かった。

第 4 章では、AzTEC 銀河の赤方偏移分布について論じている。まず、多天体ファイバー分光器 FMOS を使った対応天体候補の分光観測と、それに基づく、測光赤方偏移の精度検定を行った。SXDF 領域では、194 天体で可視光～近・中間赤外線に至る波長域のデータを使った測光赤方偏移が得られており、うち 24 天体が分光赤方偏移も測定されている。この結果、分光赤方偏移と測光赤方偏移は概ねよく整合することを確認した。その上で、AzTEC 銀河の赤方偏移分布を調べたところ、赤方偏移 2～3 付近にピークが存在すること、また、赤方偏移が 4 を超えるような SMGs の存在が見られた。これら先行研究から示唆されていた SMGs の赤方偏移分布の特徴を、より多数のサンプルで示すことができた。

次に、AzTEC 銀河が持つ星質量を赤方偏移の関数として調べたところ、赤方偏移が 4 や 5 に至る SMGs でも、 10^{11}M_{\odot} を超える銀河が存在しており、赤方偏移 2 や 3 の時代における (SMGs がその存在のピークを迎える) 時期と同程度の星質量を既に持ち得ることが分かった。

また、SMGs の多重度について調査した。ASTE 望遠鏡でのサーベイのように、比較的 low 空間分解能でのサーベイ観測では単一の明るい銀河として検出されるものの、干渉計を使った高空間分解能観測では複数の SMGs として分解されるケースが、近年の ALMA 等を使った研究で示唆されている。サーベイ観測で検出された明るい SMGs が、単一の銀河なのか、あるいは、複数の、1 個 1 個はより暗い SMGs の集合なのか（その「度合い」を、SMG の多重度と呼ぶ）、を明らかにすること、そして、複数の SMGs が群れ集まっていた場合、それらが、近い赤方偏移にいる、物理的に近接したシステムなのか、あるいは、全く異なる赤方偏移にあるものがたまたま視線上で近接して見えているだけなのか、を調べることは、SMGs の理解を進める上で非常に重要である。本研究では、AzTEC 銀河のある割合が、複数の多波長対応天体を持つことに着目し、それらの赤方偏移分布が、ランダムに分布しているのか、それとも、ある近接したペア

を為しているものが含まれるのかを調べた。その結果、統計的な有意性は強くはないものの、SMGs の周辺で、複数の銀河が群れ集まっていることを示唆する結果を得た。これは、赤方偏移が 2~3 の時代における SMGs の形成メカニズムとして、メジャー・マージャーだけでなく、より質量の小さい、複数の銀河を伴いながら合体成長するというプロセスが存在することを示唆している。

第 5 章では、第 4 章までで確立した、高赤方偏移の SMGs を探し出す手法により、赤方偏移が 5 を超える候補として最も有力な AzTEC 銀河の一つ、SDF1100.1 について徹底的に調査した。ここで取り上げた SDF1100.1 は、IRAC バンドで赤方偏移が 5 を超える対応天体候補が 2 つ見出されており、赤方偏移が 5 を超える SMGs の候補として興味深いばかりでなく、赤方偏移が 5 を超える SMGs での多重度を調べる上でも重要なターゲットである。まず、すばる望遠鏡で IRCS カメラと補償光学による K' バンド撮像を行い、これら 2 つの IRAC 対応天体候補が、いずれも、2 μ m 帯では極めて暗いこと、すなわち、いずれも赤方偏移が 5 を超える天体であることを裏付ける結果を得た。次に、サブミリ波干渉計 SMA による 1300 μ m 連続波観測から、この 2 つの IRAC 対応天体候補がいずれも SMG の対応天体であること、すなわち、SDF1100.1 は、少なくとも 2 個の、より暗い、近接するサブミリ波銀河の集まりであることを明らかにした。さらに、この領域に対して、再び SMA を用い、[CII]輝線を使った分光撮像サーベイを実施した。3 つの周波数設定で合計 20.8GHz にわたる周波数範囲での分光撮像観測を行った。これは、[CII]輝線の赤方偏移として $z=5.57\sim 6.08$ の範囲を一挙にカバーするものである。干渉計を使った、ある赤方偏移範囲を無バイアスに分光かつ撮像して[CII]輝線を探索するという観測は、これが初めてである。この結果、2 つの IRAC 対応天体候補のうち一方で、2 つの速度成分からなる強い[CII]輝線放射を検出することに成功した他、視野内に、少なくともあと 2 つ、[CII]輝線を放射する銀河を検出することに成功した。これらの結果は、赤方偏移 5.7 という時代に、強い[CII]輝線を放射し得るような大質量（星質量 $\sim 2\times 10^{11}M_{\odot}$ ）かつダストに覆われた爆発的星形成銀河（星形成率 $\sim 4000 M_{\odot}/\text{yr}$ ）が、メジャー・マージャーにより形成途上にあること、さらに、投影距離で数 10kpc という範囲に近接して分布する、より質量の小さい（星質量 $< 5\times 10^{10}M_{\odot}$ ）星形成銀河をも巻き込みながら、大質量銀河の成長・進化が進むという過程が既に存在していることを観測的に初めて示した。これは、SMGs の存在のピークである赤方偏移 2~3 の時代で見られている SMGs の形成過程が、少なくとも赤方偏移 6 に近い時代から既に始まっていることを意味している。

以上のように、本研究は、ミリ波サブミリ波での測光サーベイで検出された銀河の中から、赤方偏移が 5 を超えるようなサブミリ波で明るい銀河の探索法を確立し、さらに、干渉計を使った初めての[CII]輝線の分光撮像無バイアス探索により、少なくとも 3 個の[CII]輝線で明るい $z\sim 5.7$ の爆発的星形成銀河を一挙に発見することに成功し、赤方偏移が 6 に迫る時代での、大質量銀河の形成メカニズムに新たな観測的制限を与えたものである。本研究で見出した、高赤方偏移に

あると期待される AzTEC 銀河の多くは、現在 ALMA による追求観測が進んでおり、今後赤方偏移が 5 を超える時代での大質量銀河の形成過程について、更に大きく発展すると期待される。

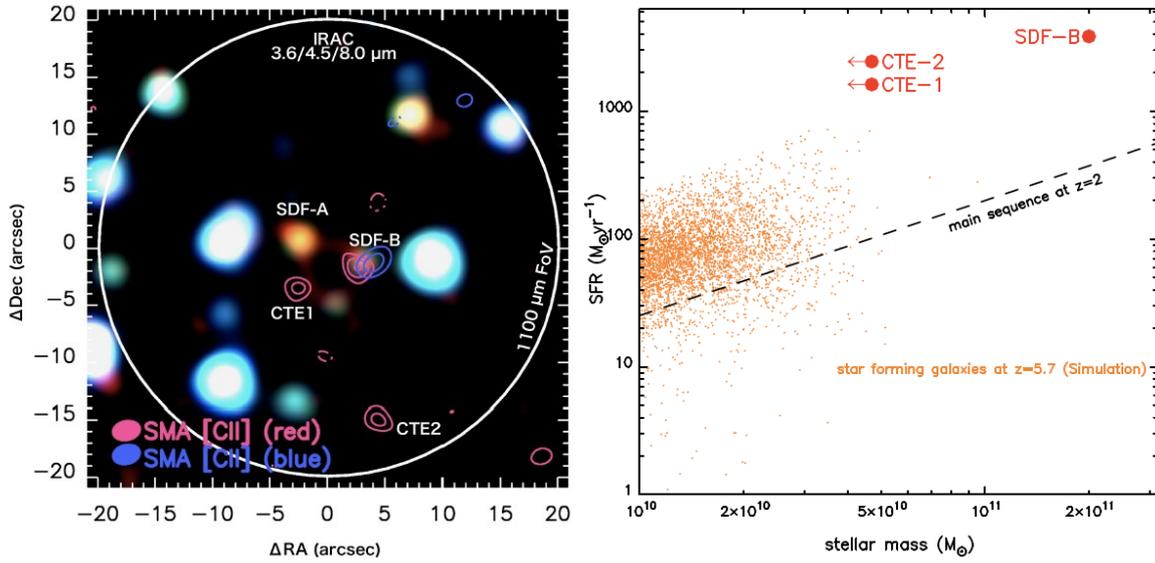


図 1 : (左) サブミリ波干渉計 SMA により検出された、赤方偏移 5.7 の[CII]輝線銀河の空間分布と、IRAC による中間赤外線画像との比較。

図 2 : (右) 赤方偏移 5.7 の時代における、星質量と星形成率の関係。本研究で発見された 3 個の爆発的星形成銀河 (SDF-B, CTE-1, 2) に加え、一般的な星形成銀河 (準解析的銀河形成モデルによる予測。De Lucia and Blaizot, 2007.) もあわせて示している。