

論文の内容の要旨

論文題目

The Formation of Massive Starbursts and Super Massive Black Holes  
in a Proto-cluster at a Redshift of 3

(赤方偏移 3 の原始銀河団における大質量爆発的星形成銀河  
及び超大質量ブラックホールの形成)

氏名 梅畑 豪紀

ミリ波、サブミリ波で選択的に観測されるサブミリ波銀河は宇宙で最も激しい星形成活動を示す大質量爆発的星形成銀河であり、他方クエーサーは中心に大質量ブラックホールへの質量降着で明るく輝く活動銀河核の最も活発な種族だと考えられている。両種族の高い活動性に加え、銀河とブラックホールは進化上密接な関係にある（共進化）ことが指摘されている。従って、宇宙における銀河や大質量ブラックホールの形成、進化の歴史を理解する上で、両者は極めて高い重要性を持ち、とりわけこれらの天体が出現の最盛期を迎えるとされる赤方偏移 2-3 付近以遠のサブミリ波銀河と活動銀河核の観測は不可欠である。さらに、宇宙の歴史は構造形成の歴史でもあり、質量密度揺らぎの進化は銀河、ブラックホールの形成条件や進化を形作る上で重要な要素に挙げられる。しかしながら、サブミリ波銀河の発現条件と大規模構造の関係を直接的に明示する観測的研究は存在していなかった。

本研究ではサブミリ波銀河、及びサブミリ波銀河中の超大質量ブラックホールの形成に宇宙の大規模構造、大局的な密度環境の差がどのように影響を及ぼしているのかを明らかにすることを目的とする。そこで、赤方偏移 3.1 の原始銀河団 SSA22 を最適の探査領域として選定した。SSA22 は赤方偏移 2 以遠の既知の高密度領域の中で最も顕著な密度超過を示す領域であり、100Mpc スケールに渡って広がるフィラメント状のライマン $\alpha$ 輝線銀河(LAE)の表面密度勾配が発見されている。また 3.1 という赤方偏移はサブミリ波銀河、クエーサーの最盛期の夜明けに相当する時期であり、これらの最も活発な銀河種族の進化を特徴づける大切な時代である。

第一段階として、まずこの原始銀河団のフィラメント構造の交差点を含む高密度領域約 900 平方分を 10m サブミリ波望遠鏡 ASTE に搭載したボロメータカメラ AzTEC を用いて波長 1.1mm で掃天観測し、125 個のサブミリ波天体を発見した。このような単一鏡によるサーベイは広域を観測する上で利点がある。一方、達成される分解能は 30 秒角にもなる為他波長での対応天体の同定に多大なる困難を伴う。サブミリ波干渉計による高分解能観測以外に、この困難を打破する術は結局のところ存在しない。

そこで本研究では第二段階として、チリ・アタカマ砂漠に新設された大規模サブミリ波干渉計 ALMA を用いて波長 1.1mm における追観測を実施した。電波や近赤外線による対応天体の推定やそれらの測光赤方偏移から赤方偏移 3.1 の原始銀河団の原始銀河団に付随する可能性が高いと思われた 10 個を含む 45 個の AzTEC 天体を観測し、50 倍もの向上となる角分解能 0.6 秒角を全領域において達成した。感度面でも AzTEC( $1\sigma$  ノイズレベルで 0.7 mJy)に比べて最大で 5 倍以上(同 0.07 mJy)の向上が得られた。結果、64 個のサブミリ波銀河が ALMA によって同定された。本観測は ALMA によるサブミリ波銀河サーベイの中で 2 番目に大きく、原始銀河団環境を対象としたものでは最大である。

この良質かつ唯一性の高いサブミリ波銀河カタログを用いて、我々は次のようにサブミリ波銀河と原始銀河団環境の関係性の検証を行った。

まず、1.1mm のナンバーカウントを作成し、一般領域に対する超過の有無を調べた。我々の保持するサンプルと同等以上の観測領域、検出数を持つ ALMA によるサブミリ波銀河サーベイは ECDF-S 領域で行われた ALESS サーベイしか存在せず、以降の議論を通してこのサーベイを一般領域の基準として採用している（実際、ECDF-S 領域には顕著な高密度領域はみつかっていない）。どちらも単一鏡で選定された天体だけを見ていることなど、複数の不完全性には注意が必要だが、我々はこのナンバーカウントの比較で SSA22 領域に超過の傾向があることを発見した。このことは高密度領域で多数のサブミリ波銀河が形成されていることを想起させる。

次に、可視光から近赤外線での測光赤方偏移の推定を行った。すると、ALESS サーベイが 2.5 という中間値を示すのに対して、SSA22 では 3.0 となりまさに原始銀河団が存在する赤方偏移でサブミリ波銀河が多いことが示された。

我々はこの傾向をさらに詳細に調べるため、分光赤方偏移、或は測光赤方偏移が 2.7 から 3.5 の間の値をとるサブミリ波銀河を SSA22, ECDF-S の両領域で取り出し、それらの性質や位置する密度環境に対する依存性を探究した。この際にはライマン $\alpha$ 輝線銀河の表面数密度を、環境を記述する関数として採用している。本解析を通して次の 3 つの顕著な傾向が顕現した。

第一に、サブミリ波銀河は高密度環境にその多くが集中して分布していることがわかった。図 1 左図は SSA22 領域におけるライマン $\alpha$ 輝線銀河の数密度分布に対するサブミリ波銀河の分布を示す。図 1 右図は、一般領域である ECDF-S 領域を含めてサブミリ波銀河が単位面積あたりにみつかるときの数を、密度環境を関数として表したものである。高密度領域へ行くにつれて数が増大しているのがわかる。

第二に、サブミリ波銀河個々の性質、すなわち星形成率、星質量、単位星質量あたりの星形成率といった指標は、環境には依存性を示さないことがわかった。

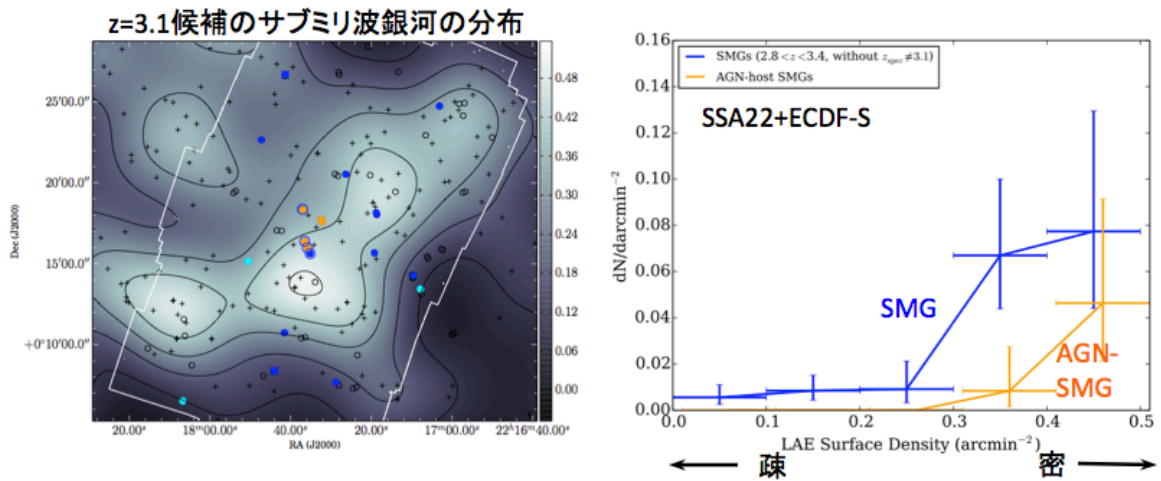
第三に、図 1 右図に示されているように、Chandra による X 線の観測から AGN を持つサブミリ波銀河は同様、或はそれ以上の敏感な環境依存性を示すことが明らかになった。今回の 2 領域では原始銀河団 SSA22 の最密部付近でしかこのようなサブミリ波銀河は見つからなかった。

さらに、多くの SSA22 領域のサブミリ波銀河で合体、衝突が起きていることが示唆されたことは注目に値する。一つ目の判断基準は 1.1mm での天体像の大きさによる。ALMA による観測で 0.6 秒角まで角度分解能が向上したが、多くのサブミリ波銀河が分解されておらず、点源でよくフィットできる天体も見つかっている。これらのことは、銀河衝突末期に見られる極めてコンパクトな領域での爆発的な星形成が起きていることを示唆する。二つ目の判断は、近赤外線域での高分解能観測による。ALMA によって 0.1 秒を切る精度で位置が求まっており、角度分解能が 0.2-0.4 秒角のこれらの星成分の観測と直接比較することが可能になった。図 2 に示すように複数の銀河が相互作用していると考えられる例が複数見つかっている。

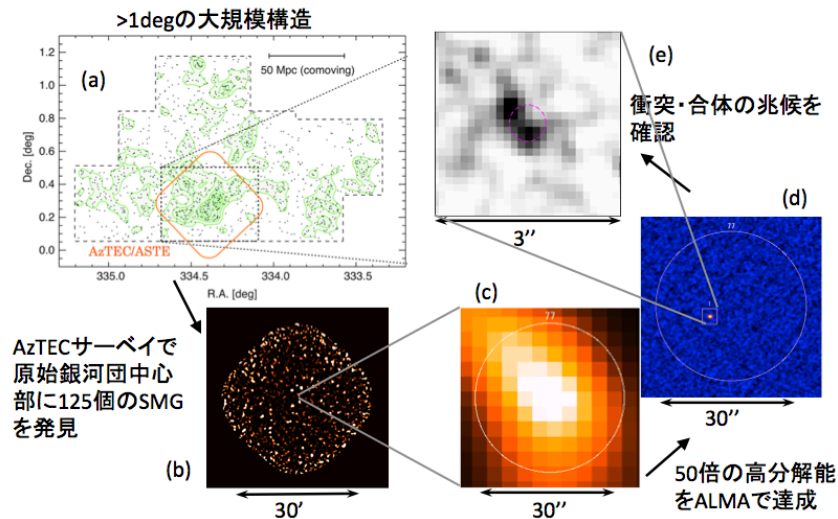
以上を考え合わせると、赤方偏移 3 でのサブミリ波銀河形成における環境依存性について一つの説を与えることができる。すなわち、サブミリ波銀河として観測される爆発的な星形成活動はその多くが銀河の相互作用によって引き起こされており、高密度領域では相互作用が起きる確率が高くなる結果として観測されるサブミリ波銀河の数が大きくなる。低密度環境でも相互作用が起きればサブミリ波銀河として観測されうるが、その頻度は相対的に小さくなる。一方で、一度サブミリ波銀河として観測される高い星形成率を持つ状態になった後は、大局的な環境には影響されず個々の星形成年齢やガスの割合といった局所的な星形成を記述するパラメータによって星形成率、星質量等は支配されると考えられる。

活動銀河核を持つサブミリ波銀河が最密部に偏在することも、基本的には同じ文脈で説明されうる。つまり、相互作用の確率や不安定化されたガスの量が大きくなり、結果、衝突・合体を通してガスが内側に次々と供給され、爆発的な星形成と共に超大質量ブラックホールの成長が急速に進む。この結果、Chandra による観測で検出可能な X 線光度を持つ超大質量ブラックホールが多く存在すると考えられる。

本研究によって、赤方偏移 3 の宇宙において、サブミリ波銀河の形成及びその内部での超大質量ブラックホールの成長には 50Mpc スケールの大規模な密度環境の勾配が大きく関係していることが明らかになった。さらに、この赤方偏移 3 の結果は、各時代の星形成、銀河形成の環境依存性を一つの文脈で記述することを可能にする。赤方偏移 4 や 5 の宇宙ではサブミリ波銀河が小規模な原始銀河団の中に属していることが報告されている (GN20, COSMOS AzTEC3)。一方、赤方偏移 1.6 の銀河団 Cl 0218.3-0510 ではサブミリ波銀河は高密度部分からは離れた、中密度と言うべき場所に存在することがわかっている。このような銀河団では中心部は星形成をすでに終えたと思われる大質量早期型銀河で占められており、SSA22 でも最密部でこのような銀河がみつかった。これらの観測的事実はサブミリ波銀河として観測される最も活発な星形成が起きる場所が、赤方偏移が小さくなるにつれて周辺部へ移行することを示唆しており、近傍の宇宙で見られる確立された形態-密度関係とよい一致を示す。



(図 1 左図) SSA22 領域におけるライマン  $\alpha$  輝線銀河の数密度分布及びサブミリ波銀河の分布。AGN を持つサブミリ波銀河は黄色で区別されている。(図 1 右図) 2 領域を合わせた単位面積あたりのサブミリ波銀河の個数。サブミリ波銀河、AGN を持つサブミリ波銀河が高密度領域で急激に増大しているのがわかる。



(図 2) 本研究の系統図。(a)は SSA22 領域で見つかったライマン  $\alpha$  輝線銀河の大規模構造を示し、橙線の範囲を AzTEC/ASTE で観測し(b)の 1.1mm 画像を得た。(c)はその一つの分光赤方偏移が 3.1 のサブミリ波銀河(ASA77.1)の拡大図である。(c)の範囲を ALMA で観測し(d)の高分解能画像を得た。その位置の MOIRCS Ks バンド画像が(e)で衝突・合体が示唆されている。