

論文内容の要旨

A Study of the Evolution of Massive Galaxies Based on Deep Wide-field Submillimeter Surveys

(サブミリ波広視野探査に基づく大質量星形成銀河の進化の研究)

氏 名 廿日出 文洋

この論文は、1.1 ミリ帯広視野深探査で検出された銀河サンプルの統計的性質を探り、宇宙における大質量星形成銀河の形成、進化過程について考察したものである。

ミリ波・サブミリ波で明るい銀河（サブミリ波銀河）は、ダストに厚く覆われ、大規模な星形成活動（星形成率 数十～数千 $M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ ）を行う大質量銀河である。過去に見つかったサブミリ波銀河の多くは赤方偏移 $z \sim 1.5-3$ に分布しているが、近年 $z > 3$ や $z > 4$ でも見つかってきている。近傍宇宙に存在する巨大楕円銀河の祖先ではないかと考えられているが、その出現時期や形成・進化過程についてはよくわかっていない。サブミリ波銀河は、宇宙における星形成史、銀河の形成・進化、赤外線背景放射の起源など重要な問題に密接に関係していると考えられており、これまでに複数のミリ波・サブミリ波サーベイが行われてきた。しかし、既存のサーベイ面積の合計は未だ1平方度程度にとどまっており、宇宙の大規模構造を捉えるのに十分な広さには至っていない。個々のサーベイ間でもナンバーカウントに違いが見られる。また、既存のサーベイは感度が低く、ナンバーカウントの低フラックス側は十分な制限が得られていない。さらに、サブミリ波銀河の検出数も各領域で数十個と少なく、統計的な議論には不十分であった。

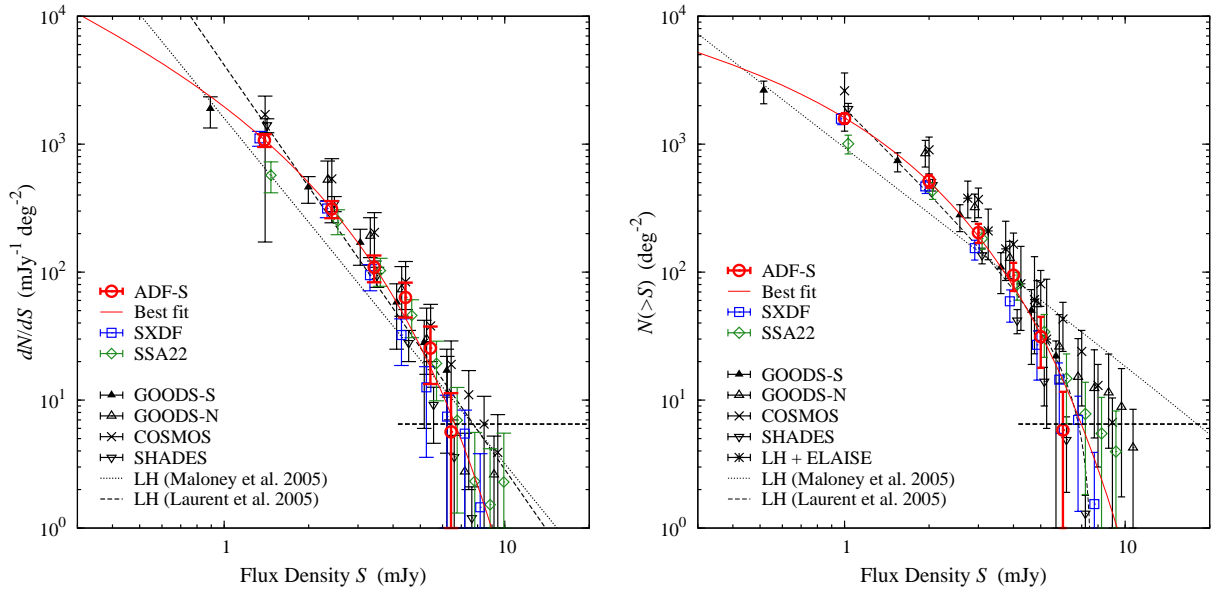


図 1: 1 ミリ帯サーベイで得られた微分ナンバーカウント (左)、および積分ナンバーカウント (右)。赤、青、緑が今回得られた ADF-S、SXDF、SSA22 領域における値。

我々は、ASTE 望遠鏡に搭載された AzTEC カメラを用い、1.1 ミリ帯における広視野深探査を行った。ASTE は、南米チリ共和国のアタカマ高地 4800 メートルに設置された口径 10 メートルのサブミリ波望遠鏡である。AzTEC は 144 素子のボロメータカメラであり、既存のミリ波帯カメラと比較してマッピングスピードの速さと高い感度を実現する。南黄極付近の領域 AKARI Deep Field South (ADF-S) の約 909 平方分を、非常に深い感度 ($1\sigma = 0.34\text{--}0.78$ mJy) で観測した。その結果、175 個 ($\geq 3.5\sigma$) のサブミリ波銀河を新たに検出した。これは、面積・感度・検出銀河数において既存のミリ波・サブミリ波帯サーベイを上回る。

赤外線衛星「あかり」およびスピッツァー宇宙望遠鏡の $24\ \mu\text{m}$, $70\ \mu\text{m}$, $90\ \mu\text{m}$ データと比較すると、AzTEC ソースの 90% 以上は $70\ \mu\text{m}$, $90\ \mu\text{m}$ では検出されていない。高光度赤外線銀河 Arp 220 および平均的なサブミリ波銀河の SED モデルを考えると、AzTEC ソースの大部分は $z \gtrsim 1.5$ の高赤方偏移にある可能性が高い。推定される赤外線光度は $\sim(3\text{--}14)\times 10^{12} L_{\odot}$ 、星形成率は $\sim 500\text{--}2400 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ であり、AzTEC ソースが大規模な星形成活動を行う高赤方偏移銀河であることを示す。

サブミリ波銀河の数密度のサーベイ領域ごとの違いや、光度進化の歴史、赤外線背景放射への寄与を探るため、ナンバーカウントを作成した。ADF-S 領域に加え、SXDF 領域、SSA22 領域にお

ける AzTEC/ASTE 広視野・高感度観測データを用い、過去の結果と比べて低フラックス側においても信頼性の高いナンバーカウントを導出した(図1)。既存の 1mm 帯サーベイとの比較では、AzTEC/ASTE サーベイ領域でのナンバーカウントは過去のサーベイ結果の範囲内であった。今回の結果を合せると、これまでに行われた 1 ミリ帯サーベイの面積は 1.5 平方度を超えている。これは、 $z \sim 2-3$ における宇宙の大規模構造を捉える広さであり、我々は宇宙の平均的なナンバーカウントに到達しつつあると考えられる。光度進化モデルと比較した結果、このナンバーカウントを説明するためには、遠赤外・サブミリ波で明るい銀河種族は $z \sim 1-3$ において 30 倍を超える光度進化が必要であることがわかった。また、このような銀河種族は $z \sim 4$ において出現し始めるという示唆を得た。

宇宙赤外線背景放射 (CIB) は、点源に分解できない系外からの赤外放射の総和であり、ミリ波帯における起源の大半は高赤方偏移銀河からの放射であると予想されている。我々は、ADF-S 領域で検出されたソースとナンバーカウントを用い、AzTEC ソースの CIB への寄与を求めた。検出されたソースのフラックスの総和から、今回のサーベイによって 1.1 ミリ帯での CIB の 7-10% が点源に分解されたことがわかった。また、微分ナンバーカウントを積分することにより、1 mJy 以上のソースの CIB への寄与は 12-16% であることがわかった。AzTEC ソースの寄与が 1.1 ミリ帯 CIB の 1 割程度にとどまっていることから、CIB の大部分は、まだ検出できていない暗いソース ($\lesssim 1$ mJy) に起因することが示唆される。

さらに、AzTEC ソースが宇宙の星形成活動にどの程度寄与しているかを推定した。高赤方偏移における宇宙の星形成史の研究は、これまで主に紫外線・可視光で行われてきた。しかし、紫外線・可視光はダストによる吸収を受けやすい。ダストに埋もれた星形成が見過ごされている可能性があり、真の星形成を探るにはミリ波・サブミリ波での観測が不可欠であった。我々は、ADF-S 領域で得たナンバーカウントと SED モデルから星形成率を見積もり、AzTEC ソースの赤方偏移分布を仮定することで、星形成率密度を求めた。ガウス関数型の赤方偏移分布 (中心 $z = 2.4$) を仮定し、その 1σ を 0.5 とした場合、 $z \sim 2-3$ における星形成活動に対する AzTEC ソースの寄与はおおよそ 40%-60% であった。 $1\sigma = 1.0$ の赤方偏移分布では、その寄与はおおよそ 20%-40% であった。

AzTEC ソースのような大質量星形成銀河が、宇宙の構造形成や他の銀河種族とどのような進化上のつながりがあるのかを推定するために、クラスタリング解析を行った。我々は、ADF-S 領域と SXDF 領域で検出された AzTEC ソースを用いて、角度二体相関関数を求めた。全ソースを用いた結果では有意な相関は得られなかったが、3 mJy 以上の明るいソースでは強いクラスタリングの兆候が得られた。この理由としては、明るいソースの赤方偏移分布がより狭い範囲に集中していることや、より重いダークハローに付随していることが考えられる。明るいソースで得られた振幅から

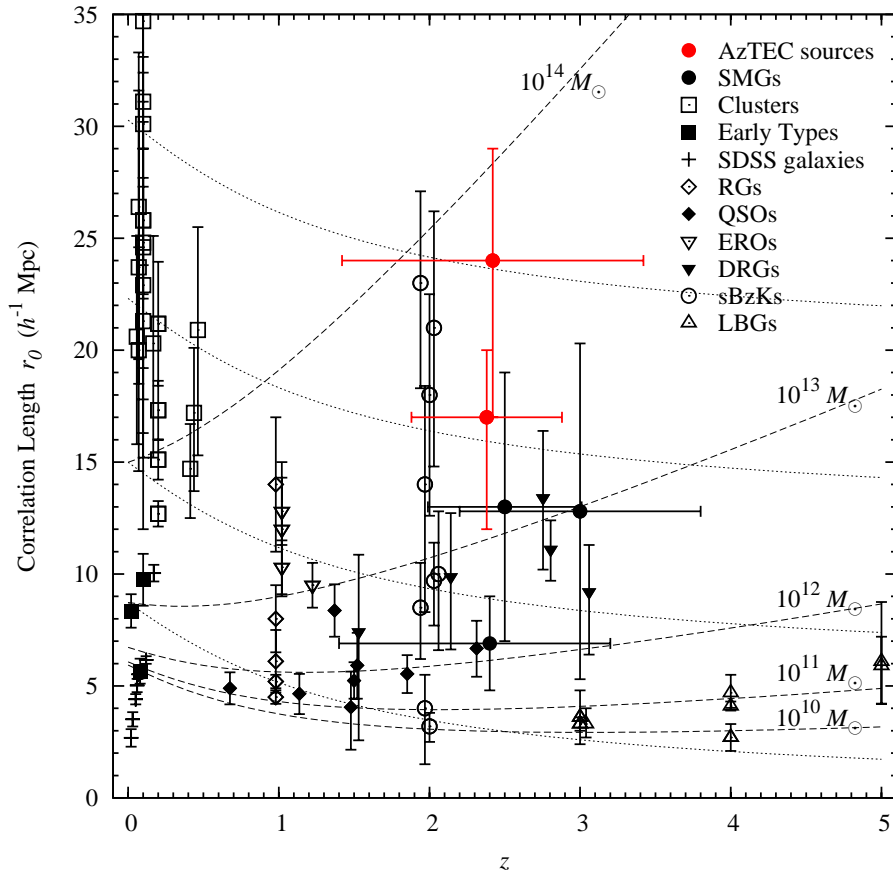


図 2: 様々な銀河種族および銀河団の相関長を赤方偏移ごとにプロットしたもの。赤印が今回の解析得られた AzTEC ソースの相関長。二通りの赤方偏移分布を仮定している。実線は赤方偏移ごとのダークハロー質量の理論曲線。点線は相関長の進化の理論曲線。

相関長を求め、ダークマター分布の理論予測とを比較したところ、AzTEC ソースは $\sim 10^{13-14} M_{\odot}$ の大質量のダークハローに付随するという結果を得た。図 2 は、AzTEC ソースの相関長を他の高赤方偏移の銀河種族、および近傍の銀河、銀河団と比較したものである。高赤方偏移の銀河種族との比較では、Distant Red Galaxy や sBzK 銀河、Extremely Red Object といった大質量銀河の値と重なっており、これらの銀河種族と進化上の関連があると推測される。また、近傍宇宙では銀河団スケールに相当する。このことは、サブミリ波銀河が、銀河団中心に付随するような巨大楕円銀河の祖先であることを示唆する。