

論文内容の要旨

論文題目

Distant Massive Starbursts and Their Relation to Cosmic Large-scale Structure at High Redshift

(高赤方偏移における大質量爆発的星形成銀河及び宇宙大規模構造との関係)

氏名 田村陽一

宇宙の大規模構造はどのように形成し成長したのか。またその大規模構造のなかで大質量銀河 ($\sim 10^{11}$ 太陽質量) はどのように形成・進化したのか。これは現代の宇宙物理学の中心課題のひとつである。これを知る手がかりとなる宇宙を占める質量のほとんどは暗黒物質に支配されており、これの直接検出は現在不可能である。しかし、見える物質の集中、例えば大質量銀河を暗黒物質のトレーサに用いることならば可能だ。すなわち、初期宇宙における構造形成と進化を理解するためには、見える質量の集中箇所 (小質量の若い原始銀河と考えられるライマンアルファ ($\text{Ly}\alpha$) 輝線銀河 (LAE) でトレースされる原始銀河団や形成中の大質量銀河) を高赤方偏移で特定することが重要な代替案である。

現在の構造形成論では銀河団は暗黒物質の空間分布のピークに相当する。なかでも高密度のピークでは爆発的星形成を伴った大銀河の形成が生じている可能性が高く、銀河内で頻発する超新星爆発により生成された星間ダストが銀河全体を覆い尽くすと考えられる。このダストは星形成領域からの紫外線をほぼすべて吸収し、遠赤外線からミリ波・サブミリ波の領域で莫大なエネルギーを放射する。このような形成途上にある大質量銀河は「サブミリ波銀河」と呼ばれる。サブミリ波銀河は、そのダスト放射スペクトルの形状から高赤方偏移でも放射強度が保持するため、高赤方偏移へのプローブとして提案され (Blain & Longair 1993)、1990 年代の後半に (サブ) ミリ波観測技術の向上になって初めて数多く発見された (Smail et al. 1997; Hughes et al. 1998; Barger et al. 1998)。

このような特徴を持っているため、サブミリ波銀河は以下のような重要な問題に深く関連していると考えられている：

- ・ 高赤方偏移における宇宙星形成密度 (volume-averaged cosmic star formation density) への大きな寄与
- ・ 現在の巨大楕円銀河の祖先の高赤方偏移における対応天体種族
- ・ 成長中の大規模構造と最も質量の大きい銀河との関連

その一方で、(1) 200 平方分を超える広域深探査の困難、(2) 対応天体を知るには不十分な空間分解能、(3) 赤方偏移推定の困難、といった技術的な課題が、上記の問題の解決を大きく妨げていた。

そこで本研究では、「サブミリ波銀河は成長中の宇宙大規模構造が作る重力ポテンシャルの底部に形成する」という作業仮説を検証することを目的とし、高赤方偏移の原始銀河団が存在する SSA22 領域に対するサブミリ波銀河の広域探査を波長 1.1mm で実行した。またサブミリ波干渉計(SMA)を用いて発見されたサブミリ波銀河のひとつを高分解能観測した。さらに、可視観測に大きく頼らない独自の赤方偏移推定法を開発し、検出されたサブミリ波銀河の赤方偏移を推定した。

対象とした SSA22 原始銀河団は、すばる望遠鏡による LAE の探査によって赤方偏移 3.1 (宇宙年齢が現在の 15%程度の時代) に発見された最も顕著かつ大規模な(数 10 Mpc)原始銀河団であり、遠方宇宙の高密度環境におけるサブミリ波銀河の形成を検証するうえで最適である。我々は観測条件の極めてよいアタカマ高地に立地する ASTE 10 m サブミリ波望遠鏡に搭載された新型ミリ波カメラ AzTEC を使い、既存のサブミリ波サーベイ面積の 20 倍に及ぶ 390 平方度を 0.7 mJy¹の深さ(をもつサブミリ波銀河に対応)でサーベイした。この結果、 4×10^{12} 太陽光度の赤外線光度を超える 30 天体を検出した(図 1a)。これらのエネルギー源が星形成活動に起因すると仮定すると、その星形成率は $\sim 10^3$ 太陽質量/年におよぶ。

我々の発見のうちもっとも顕著なものは、信頼性の高い 2.7 mJy よりも明るいサブミリ波銀河が、LAE の密度超過領域に集中している、すなわちサブミリ波銀河と LAE の分布が相関している点である(図 1b)。しかしながら、我々のスタッキング解析からは LAE にはサブミリ波銀河よりも 1-2 桁(以上)下回る程度のダスト質量しかなく、両種族がまったく異なる特徴を持っていることがわかった。これらの観測事実は、性質のまったく異なる 2 つの種族の銀河が同一の大規模構造で同時に形成されていることを示唆する。事実、発見されたサブミリ波銀河の多波長データから赤方偏移を推定したところ、ある割合のサブミリ波銀河が赤方偏移 3.1 の大規模構造と同じ赤方偏移に存在している可能性が高いことがわかった。これはサブミリ波銀河と LAE 原始銀河団との空間的な相関をサポートすると言える。

検出された天体の性質を知る目的で、最も明るいサブミリ波銀河 AzTEC1 (8.4 \pm 0.9 mJy) に対し SMA を用いた波長 860 μ m でのアストロメトリーを行った。この結果、SMA の分解能で点源と見なせるコンパクト(<1.1")な AzTEC1 対応天体を決定した。この位置に電波源 (20 cm)、及び中間赤外(Spitzer)が見出され、赤方偏移 3.1 のスペクトルエネルギー分布と一致する一方、深い近赤外(Ks バンド)でドロップアウト(Ks > 24.9, < 450 nJy)していることがわかった。これは、ダストに埋もれた巨大ブラックホールの存在、非常に大きい減光($A_v \sim 100$)、若い星成分の存在、ないし、5 を超える高赤方偏移を示唆する。このような描像がサブミリ波銀河に一般的かは判断できないが、こういった非常に赤い特徴はサブミリ波銀河対応天体を決定する上できわめて有用である。

我々は 2 点角度相互相関関数を導入し、サブミリ波銀河と LAE 原始銀河団との相関を定量的に評価した。この結果、サブミリ波銀河と LAE の間に正の角度相互相関があることを確かめた(図 2)。また 2 次元 Kolmogorov-Smirnov 検定を用い、両者の分布が異なる確率は 2.7% と低い(有意水準 97.3%)ことを示した。これはまったく異なるふたつの銀河種族が同じ大規模構造内で進化していることを示唆する。さらに我々の観測結果は、多体数値計算による暗黒物質ハローの進化と個々のハロー内部での赤外線光度進化モデルから予想される角度

¹ 1 Jy = 10^{-26} W m⁻² Hz⁻¹ に相当する。

相互相関関数と矛盾しない。現在の階層的構造形成の描像と大筋で合致すると言える。

サブミリ波銀河種族の理解自体が依然として途上段階にある。その一方で、本研究が示した観測事実は、サブミリ波銀河が原始銀河団のような高密度環境の中心付近で選択的に形成されやすいことを示唆した重要かつ最初の例となった(図3)。遠方宇宙へのプローブであるサブミリ波銀河の特長を考慮すれば、サブミリ波銀河はユニークな可能性を秘めている：他の手法ではトレースするのが難しい遠方宇宙の成長中の大規模構造の目印として、その進化を追跡できるかもしれない。次世代の大型サブミリ波連続波撮像装置やアタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計(ALMA)がこの可能性をテストできるであろう。

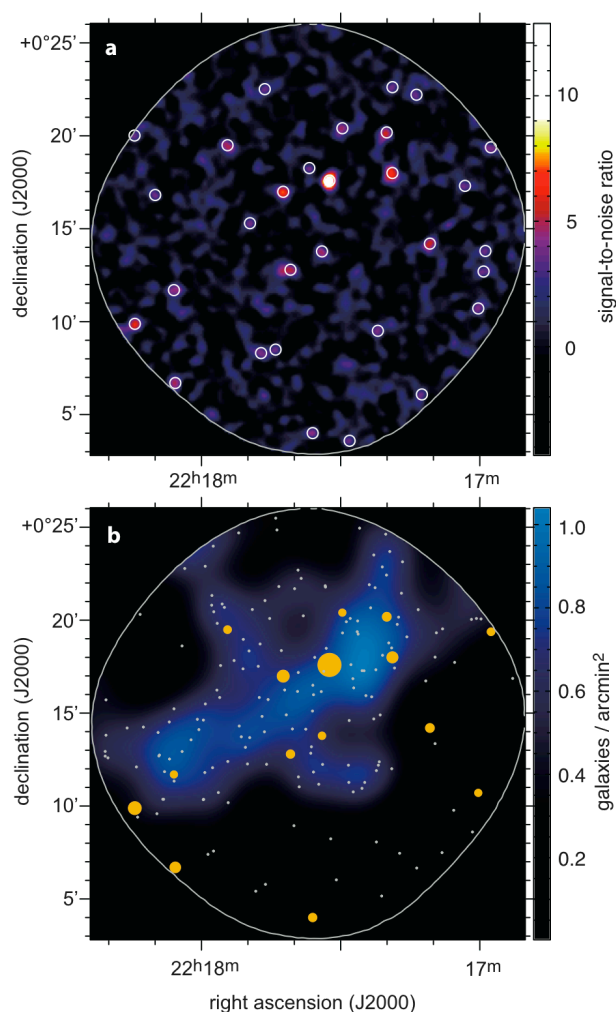


図1：(上図 a) 原始銀河団領域 SSA 22 に対する AzTEC/ASTE による 1.1 mm 連続波画像。差し渡しが 30 Mpc 程度の空間スケールに対応する。(下図 b) 明るいサブミリ波銀河(橙色の丸印で直径が 1.1 mm 放射強度に対応)、および Ly α 輝線銀河(白点)とその数密度分布(背景カラー)。Ly α 輝線銀河の集中領域にやはりサブミリ波銀河も集中している。

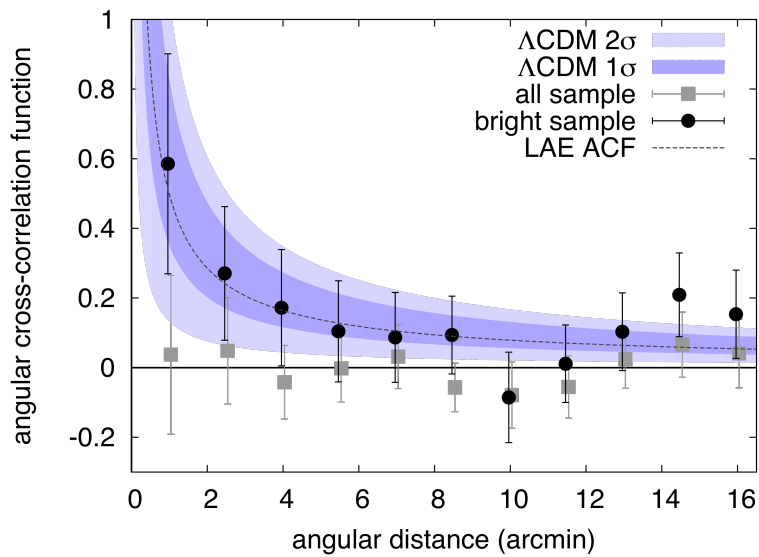


図2：明るいサブミリ波銀河と $\text{Ly}\alpha$ 輝線銀河の間の2点角度相互相関関数(丸印)に正の相関が見られる。また、暗黒物質ハローとその内部の赤外線光度の理論的モデルは、観測された相関関数と定性的に矛盾しない。 $\text{Ly}\alpha$ 輝線銀河の自己相関関数(破線, Hayashino et al. 2004)、および30天体すべてのサブミリ波銀河と $\text{Ly}\alpha$ 輝線銀河の相互相関関数も示した(四角印)。

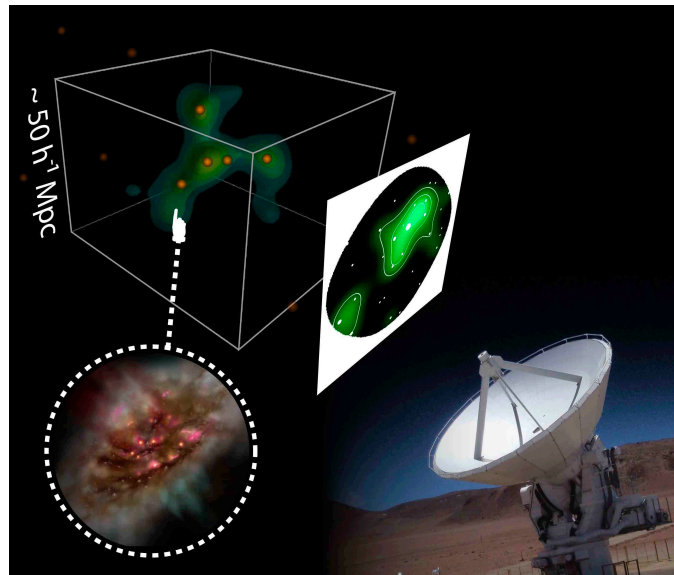


図3：本研究の概要図。我々はサブミリ波望遠鏡 ASTE (図中右下)と AzTEC カメラを用いて $\text{Ly}\alpha$ 輝線銀河でトレースされる大規模構造(左上)方向を波長 1.1 mm で観測した。この結果、大規模構造に付随すると推定されるサブミリ波銀河(左下, 想像図)を発見した。サブミリ波銀河はこういった高密度環境の目印になるというユニークな可能性を持つのかもしれない。