

## Herschel Protocluster Survey at $z = 2 - 3$

加藤 裕太 (東京大学大学院理学系研究科 天文学専攻 M2)

### Abstract

銀河の衝突合体は爆発的星形成の引き金となるとともに、楕円銀河の形成に大きな役割を果たしてきたと考えられている。我々は楕円銀河の形成環境として初期宇宙の原始銀河団に注目し、ハーシェル宇宙望遠鏡を用いた観測を行った。その結果、赤方偏移  $z \sim 2 - 3$  の原始銀河団では明るい爆発的星形成銀河が顕著な密度超過を示すことを明らかにした。これは、将来銀河団になる領域において、ガスを大量に含んだ銀河の衝突合体により楕円銀河の祖先が一気に形成されている現場を捉えていると考えられる。

## 1 Introduction

近傍宇宙で見つかる様々な形態を示す銀河は過去、どのような過程を経て形成されてきたのだろうか。銀河の形成を理解する上での重要な観点に、銀河のより大きなスケールでの環境に注目するという方法がある。例えば近傍宇宙で見つかる楕円銀河は、銀河団などの銀河高密度領域に多くそのほとんどが既に星形成活動を終えている一方、円盤銀河や不規則銀河は銀河低密度領域に多くまだ星形成が盛んであることが知られている (形態-密度関係、星形成-密度関係、Dressler 1980)。赤方偏移  $z = 2$  以上の時代に多く見つかる爆発的星形成銀河は楕円銀河の祖先であり、その一生の中で最も激しい星形成期を迎えていると考えられている (図 1)。その起源は銀河の衝突合体であるとされており、従って赤方偏移 2 以上の銀河高密度領域である原始銀河団は爆発的星形成銀河とその後出現するであろう楕円銀河と銀河団の形成環境として有力視されている。実際に数値シミュレーションを用いた研究から原始銀河団では銀河の衝突合体が近傍宇宙の平均に比べて 100 倍以上多く起こることが示されている (Gottlöber et al. 2001)。一方で観測からは、原始銀河団が本当に銀河の衝突合体を要因とした楕円銀河の形成環境としてふさわしいかどうか明らかにされておらず、さらには爆発的星形成銀河が原始銀河団にどれくらい出現するものなのかもわかっていない。

これまでの初期宇宙および原始銀河団の観測は、静止系紫外・可視光で見つかる、爆発的星形成銀河よりも 10-100 倍星形成率の低い銀河に基づくものが

ほとんどであった。一方、爆発的星形成が起きると、 $\sim$  数  $\mu\text{m}$  のダストと呼ばれる固体微粒子が銀河全体に渡って大量にまき散らされるため、銀河中の星からの紫外・可視光は遮られてしまう。従ってこれまでの紫外・可視光に基づく原始銀河団の研究では、爆発的星形成銀河を捉え、原始銀河団との関係を議論することは難しかった (Bouché et al. 2005)。爆発的星形成銀河で生まれた大質量星の紫外光は一旦ダストに吸収された後、赤外線で再放射されるため、遠赤外線からサブミリ波での観測を行えば、宇宙初期の爆発的星形成銀河の”ダストに隠された星形成”を捉えることができる。

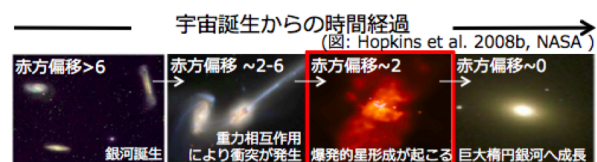


図 1: 衝突を要因とした爆発的星形成銀河の銀河進化

## 2 Observations

まずは原始銀河団において爆発的星形成銀河がどれくらい出現するのかを調べるため、SSA22, HS1700, 2QZ Cluster という 3 つの原始銀河団をハーシェル宇宙望遠鏡 (HSO; Pilbratt et al. 2010) を用いて観測した。ハーシェル宇宙望遠鏡には遠赤外線 3 バンド (250, 350, 500  $\mu\text{m}$ ) の同時測光観測が可能なカメラ (SPIRE; Griffin et al. 2010) が搭載されており、

一度の観測で赤方偏移  $z \sim 2-3$  の爆発的星形成銀河のダストの再放射のピークを捉えることができる。観測は Second Open Time *Herschel* programs (PI: Y. Matsuda; OT2\_ymatsuda.1) として 2011 年 5 月に行なわれた。合計積分時間と観測範囲はそれぞれ SSA22, HS1700+64, 2QZ Cluster に対して 3.7, 1.5, 1.8 時間、 $30' \times 30'$ ,  $15' \times 15'$ ,  $20' \times 20'$  である。この条件下ではノイズレベルはコンフュージョンリミットまで到達し、(250, 350, 500  $\mu\text{m}$ ) でおおよそ ( $\sigma_{\text{conf}}=7, 8, 10 \text{ mJy}$ ) である。以下に観測した原始銀河団について述べる。

SSA22;  $z = 3.09$  にあり、LBGs や LAEs の平均的な数密度から  $\sim 4-6$  倍の密度超過を示す原始銀河団であり、Steidel et al. 1998, 2000 によって報告されたものである。Ly $\alpha$  輝線の狭帯域サーベイによって 283 個の LAEs の大規模構造が少なくとも  $\sim 60 \text{ Mpc}$  は広がっていることが報告されている (Hayashino et al. 2004, Matsuda et al. 2005)。チャンドラによる X 線の観測からは平均的な数密度と比べて AGN の割合が 3 倍高いことが報告されている (Lehmer et al. 2009a,b)。すばる望遠鏡による MOIRCS 近赤外観測からは、quiescent な銀河と dusty starburst 銀河の両方が見つかっている Kubo et al. (2013)。サブミリ波の観測からは ASTE/AzTEC により見つかった SMGs のうち 10 個が、 $z = 3.09$  に付随している可能性の高いことが報告された (Umehata et al. 2014)。そのうち 7 個の SMGs については中心の  $12 \times 12 \text{ Mpc}$  の領域に位置しており、SMGs が LAEs の高密度環境下においてよく形成される可能性を示唆している。

HS1700+64 (hereafter: HS1700);  $z = 2.30$  にあり、静止系紫外光の色を用いて選択した星形成銀河 (BX/MD 銀河) の平均的な数密度から 7 倍の密度超過を示す原始銀河団であり、Steidel et al. 2005 によって報告されたものである。 $\sim 25 \text{ co-moving Mpc}$  の大規模構造を示す。チャンドラによる X 線の観測からは平均的な数密度と比べて AGN の割合が tentative に高いことを報告している (Digby-North et al. 2010)。また原始銀河団の赤方偏移  $z = 2.300 \pm 0.015$  に付随する銀河について星質量、星の年齢が  $z = 2.300 \pm 0.015$  ではない銀河と比べて約 2 倍高いことが示されている

(Steidel et al. 2005)。銀河進化の指標となる金属量についても、原始銀河団の赤方偏移  $z = 2.300 \pm 0.015$  に付随する銀河について、スタックした星質量の低い銀河について enhancement が報告されている (Kulas et al. 2013)。

2QZ Cluster 1004+00 (hereafter: 2QZ Cluster);  $z = 2.23$  にあり、5 つの QSOs と HAEs の密度超過で特徴づけられる原始銀河団である (Matsuda et al. 2011)。特に、4 つの QSOs は  $30 \times 30 \text{ co-moving Mpc}$  に強く集中しており、その周囲には 22 個の HAEs が分布している。チャンドラによる X 線の観測からは、平均的な数密度と比べて AGN の割合が  $\sim 3.5$  倍高いことが報告されている (Lehmer et al. 2013)。

### 3 Analysis

爆発的星形成銀河の遠赤外-サブミリ波までの SEDs は、修正黒体輻射で良く近似できることが知られている。図 2 に  $T_d=40\text{K}$ ,  $L_{\text{FIR}}=10^{12} L_{\text{sun}}$  の修正黒体輻射を持つ天体を様々な  $z$  に置いたときの Flux Density を示した。

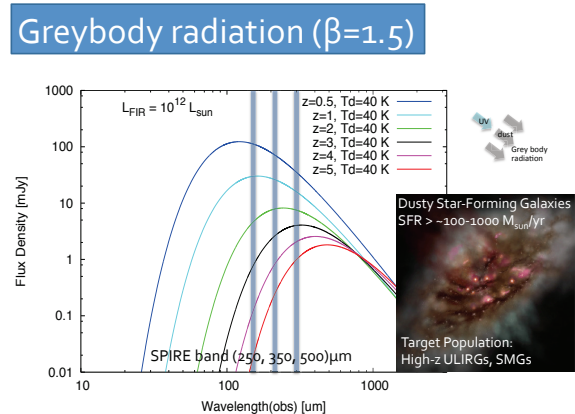


図 2:  $T_d=40\text{K}$ ,  $L_{\text{FIR}}=10^{12} L_{\text{sun}}$  の修正黒体輻射を持つ天体を様々な  $z$  に置いたときの Flux Density

観測データから原始銀河団の赤方偏移に付随する可能性のある爆発的星形成銀河の候補を選び出すために、我々は SPIRE の 3 色を使った天体選択を行なった。具体的な方法を以下に示す。まず SPIRE の

いずれかのバンドで 12 mJy 以上の天体をカタログする。次にカタログした天体に対してそれぞれの ( $S_{250}/S_{350}, S_{350}/S_{500}$ ) の色を調べ、原始銀河団の赤方偏移を仮定した上で、 $T_d=30-40\text{K}$  の範囲でその天体のもつ色に最も近いダストの温度を与える。この時 3 バンドの測光エラー  $\pm 30\%$  を許容して天体を選び出す。全赤外線光度  $L_{\text{FIR}}$  は、こうして決めた修正黒体輻射の SED と (250, 350, 500  $\mu\text{m}$ ) の 3 点をフィットさせることで求める。図 3 は ( $S_{250}/S_{350}, S_{350}/S_{500}$ ) 図であり、赤い点 ( $L_{\text{FIR}} > 5 \times 10^{12} L_{\text{sun}}$ ) と大きな灰色の点 ( $L_{\text{FIR}} < 5 \times 10^{12} L_{\text{sun}}$ ) で選択した天体を示した。

## 4 Results & Discussion

選択した原始銀河団に付随する可能性のある爆発的星形成銀河の候補について、個数、空間分布、赤外線光度を、一般的な探査領域である COSMOS フィールドと比較した。COSMOS フィールドでは  $60' \times 60'$  の範囲について、Section 3 で述べた方法と同一の手法 (それぞれの原始銀河団の赤方偏移と、天体の色に最も近いダストの温度を仮定) をとることで爆発的星形成銀河を選び出した。その結果、SSA22、HS1700、2QZ Cluster において静止系紫外・可視光で見ついている原始銀河団銀河の密度ピークの近傍で、明るい ( $L_{\text{FIR}} > 5 \times 10^{12} L_{\text{sun}}$ ) 爆発的星形成銀河の高密度領域を発見した。それぞれの高密度領域は図 4 の橙色で示した円 (半径  $\sim 4$  co-Mpc) で示した。これらの爆発的星形成銀河の高密度領域はいずれも高い有意性を示した (図 4)。

これらの結果は、これまで静止系紫外・可視光で見つかってきた原始銀河団およびその周辺で、ダストに隠された星形成 (あるいは AGN) 活動が一般天域と比べて活発な領域が見つかる、という示唆を与えている。たとえば原始銀河団においてガスを大量に含んだ銀河同士の衝突合体が多く行なわれた結果、ダストを多量に含んだ、赤外光度の明るい銀河が多く見つかったということが考えられる。過去に、赤外光度が高い銀河ほど銀河の衝突合体の痕跡があるという形態的な研究 (Kartaltepe et al. 2012) や、赤外光度  $5 \times 10^{12} L_{\text{sun}}$  以上の SMGs が衝突合体の痕跡を

示したという研究 (Engel et al. 2010) もある。しかし、爆発的星形成銀河の多くは赤方偏移の決定が難しく、我々の今回捉えた爆発的星形成銀河も SPIRE バンド (250/350/500  $\mu\text{m}$ ) の色が  $z \sim 2-3$  と合うように選択されたものであり、そのすべてが原始銀河団に付随しているかを精確に確かめるまで分からない。今後はこれらの爆発的星形成銀河の対応天体を多波長測光データに基づき探し出しながら測光赤方偏移を測りつつ、分光観測を提案していくことで赤方偏移を決定していく。

## Reference

- Bouché N., Lowenthal J. D., 2005, ApJ, 623, L75  
 Digby-North J. A., et al., 2010, MNRAS, 407, 846  
 Dressler A., 1980, ApJ, 236, 351  
 Engel H., et al., 2010, ApJ, 724, 233  
 Gottlöber S., Klypin A., Kravtsov A. V., 2001, ApJ, 546, 223  
 Griffin M. J., et al., 2010, A&A, 518, L3  
 Hayashino T., et al., 2004, AJ, 128, 2073  
 Kartaltepe J. S., et al., 2012, ApJ, 757, 23  
 Kubo M., et al., 2013, ApJ, 778, 170  
 Kulas K. R., et al., 2013, ApJ, 774, 130  
 Lehmer B. D., et al., 2009, ApJ, 691, 687  
 Lehmer B. D., et al., 2009, MNRAS, 400, 299  
 Lehmer B. D., et al., 2013, ApJ, 765, 87  
 Matsuda Y., et al., 2005, ApJ, 634, L125  
 Matsuda Y., et al., 2011, MNRAS, 416, 2041  
 Pilbratt G. L., et al., 2010, A&A, 518, L1  
 Steidel C. C., Adelberger K. L., Dickinson M., Giavalisco M., Pettini M., Kellogg M., 1998, ApJ, 492, 428  
 Steidel C. C., Adelberger K. L., Shapley A. E., Pettini M., Dickinson M., Giavalisco M., 2000, ApJ, 532, 170  
 Steidel C. C., Adelberger K. L., Shapley A. E., Erb D. K., Reddy N. A., Pettini M., 2005, ApJ, 626, 44  
 Umehata H., et al., 2014, arXiv, arXiv:1403.2725

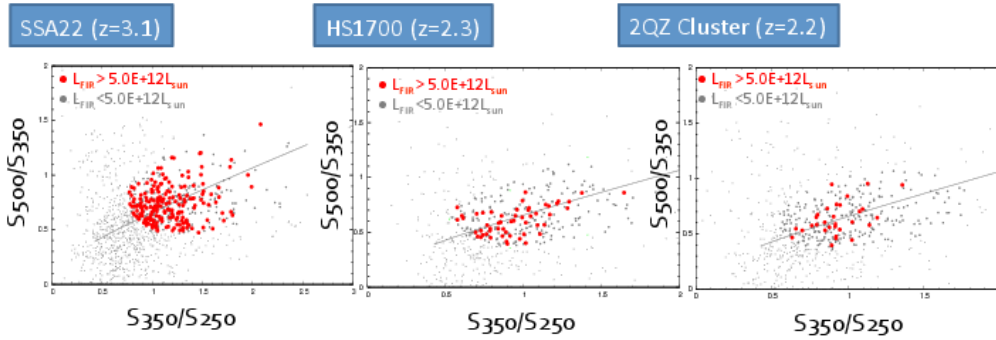


図 3:  $S_{250}/S_{350}$ ,  $S_{350}/S_{500}$  2 色図。赤い点 ( $L_{\text{FIR}} > 5 \times 10^{12} L_{\text{sun}}$ ) と大きな灰色の点 ( $L_{\text{FIR}} < 5 \times 10^{12} L_{\text{sun}}$ ) で選択した天体を示しており、灰色の線は修正黒体輻射を仮定した場合の経路。

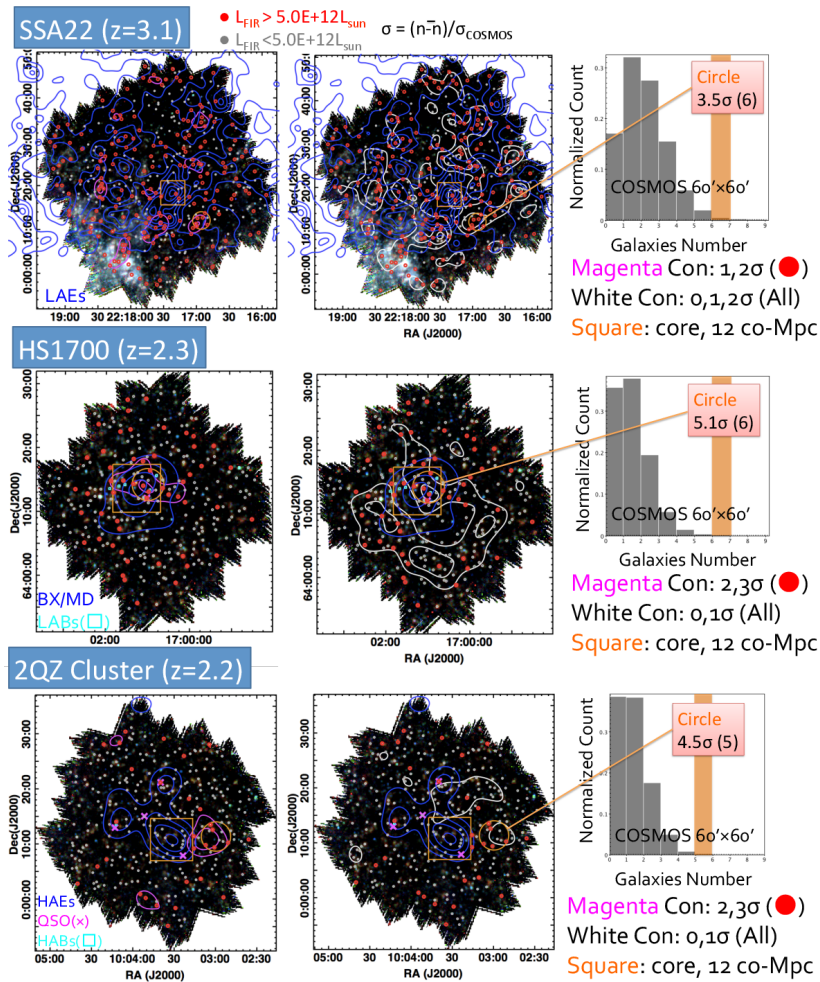


図 4: 背景: 青=250 $\mu\text{m}$ , 緑=350 $\mu\text{m}$ , 赤=500 $\mu\text{m}$  3 色合成図。赤い円は明るい爆発的星形成銀河の候補 ( $L_{\text{FIR}} > 5 \times 10^{12} L_{\text{sun}}$ )、灰色の円は暗い ( $L_{\text{FIR}} < 5 \times 10^{12} L_{\text{sun}}$ ) 爆発的星形成銀河の候補。橙色の円は明るい爆発的星形成銀河の候補天体の高密度領域を示しており、右列のヒストグラムは COSMOS (60'  $\times$  60') を使用) の個数分布と比較したものである。左列の桃色コントアは明るい候補天体について、中央の白色コントアは全候補天体について示している。ここで  $1\sigma$  は COSMOS から求めている。青色コントアはそれぞれの原始銀河団銀河の密度コントアを示しており、橙色の正方形でその中心領域 12  $\times$  12 Mpc を示している。