

# 高赤方偏移原始銀河団候補のダークハロー質量

玉澤 裕子 (東京大学大学院 理学系研究科)

## Abstract

形成中の銀河団である原始銀河団は、主に赤方偏移  $z > 2$  に存在し、やがて現在の銀河団に進化すると考えられている。そのため、原始銀河団は、銀河団の形成過程を解明するのに重要な天体である。銀河団の形成過程に関して、高赤方偏移の原始銀河団がどの程度のダークハロー質量を持ち、将来どの程度の質量を持つ銀河団に進化するか未解明であるという問題が存在する。高赤方偏移での銀河団の質量集積史を観測的に解明することを目指し、SXDS で  $z \sim 4-6$  の原始銀河団候補を同定した所、 $z \sim 5$  で原始銀河団候補が 1 つ見つかった。Millennium Simulation(Springel et al. 2005) と、この同定した原始銀河団候補を比較することで、そのダークハロー質量を推定した。

## 1 イントロダクション

宇宙の構造の形成過程を記述するモデルで、現在最も信頼されているものは、階層的構造形成モデルである。このモデルによると、初期の宇宙で Cold Dark Matter (CDM) は小規模な構造を経て、CDM と電離ガスからなるダークハローという、質量密度の大きな力学的平衡に達した系を構成する。このダークハロー同士が合体することで、初期の小さな構造から銀河、銀河団と徐々に大規模な構造を形成する(White, Rees, 1978)。しかし、階層的構造形成中にガスがどのように星に変換し、銀河団が形成、進化したか観測的な理解は進んでいないという問題点がある。よって、銀河団の形成過程を探るには形成中の銀河団の研究が鍵となる。形成過程にある銀河団は原始銀河団と言い、主に  $z \sim 2$  以上の過去に存在し、やがて現在の銀河団に進化すると考えられている。

原始銀河団中の質量の集積シナリオを探れば、この問題点の観測的な理解が深まる。このシナリオを解明するには、銀河団のダークハロー質量の進化が分かればよい。この進化に関しては、理論的には研究されている (Chiang et al. (2013) : 図 3) が、観測的には未解明である。

ダークハロー質量の推定には、原始銀河団候補数が十分多いデータが必要になる。そこで、世界最高レベルの広視野を誇る、すばる望遠鏡の広視野可視光カメラ Suprime-Cam (SC) による広視野データを

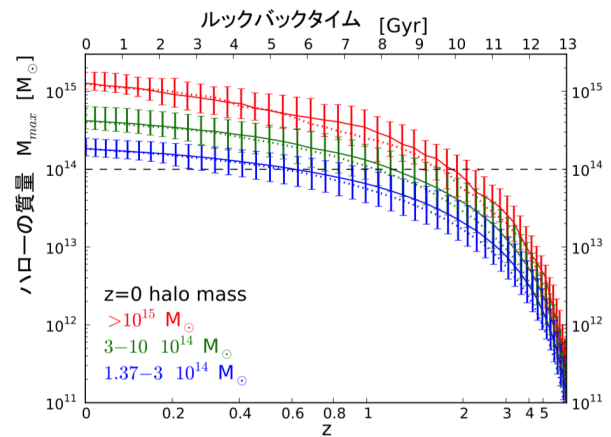


図 1: 銀河団のダークハロー質量進化のシミュレーション (Chiang et al. (2013) より一部改変)。この図から、銀河団の質量の進化が理論的に分かる。

用いる。本研究の目的は、SC の広視野データから原始銀河団のダークハロー質量を推定し、そこから銀河団の質量集積史を解明することである。

## 2 観測と研究方法

本研究は、SXDS という 1 平方度の天域のデータを用いた。観測はすばる SC を用いて行われた。

これらのデータを用いてダークハロー質量を推定するが、その前に、原始銀河団候補を発見する必要がある。原始銀河団の候補には、初期宇宙で銀河が密度

超過している領域が考えられる。本研究は SC のデータから、 $z \sim 4-6$  のライマンブレイク銀河 (Lyman Break Galaxies, LBGs) で構成される原始銀河団を探す。LBG は高赤方偏移では普遍的に存在する一般的な銀河である。LBG の空間分布を調べ、ある領域 (例えば半径 8 Mpc の円) 内に分布する LBG が、平均密度からどの程度密度超過しているか求める。密度超過  $\delta$  は、

$$\delta = \frac{n - \langle n \rangle}{\langle n \rangle} \quad (1)$$

で表される。ここで、 $n$  は銀河の数密度、 $\langle n \rangle$  は銀河の数密度の平均値である。本研究の原始銀河団候補内の銀河の  $z$  には不定性が大きいため、 $n$  と  $\langle n \rangle$  には各々銀河の表面数密度とその平均値を用いた。本研究では、密度超過  $\delta$  の値が  $\sim 4\sigma$  の領域を原始銀河団候補とした。

原始銀河団候補を見つけたら、次に観測結果と構造形成モデルを比較することで、ダークハロー質量を推定する。この方法には、原始銀河団候補の数が少ない場合でも質量を推定できる利点がある。本研究では Millennium Simulation (MS)(Springel et al. 2005) の light cone モデル (Henriques et al. 2012) と準解析的モデル (Guo et al. 2011) を使用する。モデル中のサンプル銀河から、観測データで同定した物と同様な密度超過領域を同定し、そのダークハロー質量をモデルの値を用いて推定する。

### 3 結果と議論

$z \sim 4-6$  の原始銀河団候補となる、銀河の密度超過領域を SXDS 領域で探査した所、 $z \sim 5$  で銀河が半径 8 Mpc の円内に 25 個集まり、密度超過  $\delta$  が  $\delta \sim 1.8$  の領域を 1 箇所見つけた (図 2)。このダークハロー質量を求めるために、MS に基づく準解析的モデルと観測結果を比較した。銀河の密度超過に基づき観測とモデルを比較した結果、この原始銀河団候補のダークハロー質量は  $\sim 2.4 \times 10^{12} M_{\odot}/h$  と推定された。

今回見つかった原始銀河団候補の数は 1 個と極端に少ないので、角度相関関数を用いて統計的にダークハロー質量を求めることは不可能である。だが構造形成モデルと比較するこの手法では、今回のよう

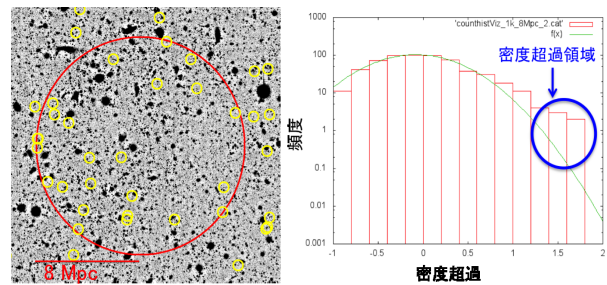


図 2: 銀河の密度超過領域 (左) と密度超過  $\delta$  の頻度分布 (右)(Tamazawa et al. in prep.). 左:赤円の領域内に入る銀河 (黄色の点) の数密度が、平均より超過している。右:フィッティング値を上回る  $\delta \geq 1.5$  の分布が原始銀河団候補である。

なサンプル数が少ない場合でもダークハロー質量を推定できるという利点がある。ところが、準解析的モデルに基いて同定した密度超過領域は、観測から同定したものと比べ、number counts が約 1.5 倍大きく、観測と矛盾するという問題点が見つかった。

装置の性能の限界上、本研究も含め、今までの原始銀河団研究で観測的に発見された原始銀河団候補の数は、数個程度と少ない。そのため、現状としてはこのモデルに頼らざるをえないという問題点がある。さらに、構造形成モデルが、ある準解析的モデルに依存しているので、今回用いた手法では系統エラーも残る。

### 4 今後の展望

上記の問題を解決するには、銀河団の角度相関関数を求め、統計的にダークハロー質量を推定すればよい。そのためには少なくとも現在の百倍程度の原始銀河団候補が必要になるが、それを得るにはより広視野で深いデータが必要になる。すばる望遠鏡では 2014 年から、Suprime-Cam の視野を 7 倍上回る次世代超広視野可視光カメラ Hyper Suprime-Cam(HSC) の本格運用も開始された。HSC で原始銀河団候補が数百個同定できれば、銀河団同士の角度相関関数を求めることができ、その値と構造形成の解析的モデルの結果 (Mo and White. 2002) を比較することで統計的にダークハロー質量を推定できる。

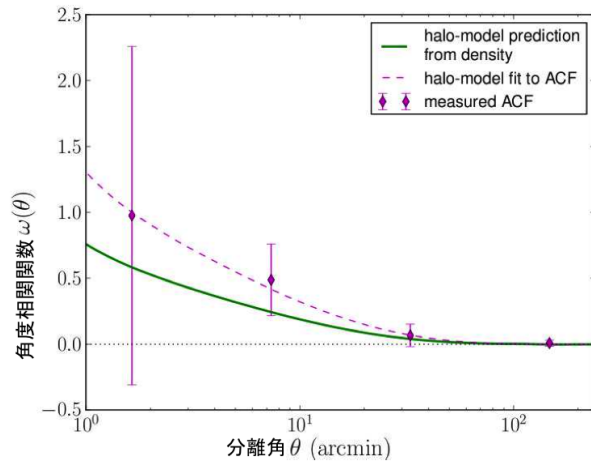


図 3: 観測的に得られた 2 つの角度相関関数 (Rettura et al. (2014) より一部改変)。この結果ではまだエラーバーが大きく、さらに  $1.3 < z < 2$  までしか求められていない。

## 5 まとめ

階層的構造形成中における銀河団の形成、進化のシナリオを観測的に解明するには、形成過程にある銀河団 (原始銀河団) の研究が重要な鍵を握る。本研究では、高赤方偏移銀河団の質量集積史を観測的に解明することを目標に、 $z \sim 4-6$  の SXDS 領域で原始銀河団候補を探し、そのダークハロー質量を推定した。質量を推定する際には観測結果と Millennium Simulation に基づく準解析的モデルを比較した。その結果、今回見つかった  $z \sim 5$  の原始銀河団候補のダークハロー質量は、 $\sim 2.4 \times 10^{12} M_{\odot}/h$  と推定された。しかし、観測とモデルの number counts を比べると、モデルの方が約 1.5 倍大きく、観測と矛盾することが分かった。今後は、すばる望遠鏡に新たに搭載された次世代超広視野可視光カメラ Hyper Suprime-Cam も用いて原始銀河団候補を数百個同定し、統計的であり正確な方法でダークハロー質量を推定し、そこから銀河団の質量集積史に迫る。

## Reference

- Springel V. et al. 2005. Nature, 435, 629  
 Chiang Y-K. et al. 2013. ApJ, 779, 127

- White S. D. M, Rees M. J. 1978. MNRAS, 183, 341  
 Henriques B. M. B. et al. 2012. MNRAS, 421, 2904  
 Guo Q. et al. 2011. MNRAS, 413, 101  
 Mo, H. J. and White, S. D. M. 2002. MNRAS, 336, 112  
 Rettura A. et al. 2014. arXiv:1404.0023