

# Hyper Suprime-Cam を用いた銀河団進化の解明

玉澤 裕子 (東京大学大学院 理学系研究科)

## Abstract

銀河団は宇宙で最も重い力学系であり、宇宙の構造形成の鍵となる。この銀河団がどのように形成・進化したかは観測的にあまり理解されていない。私は、すばる望遠鏡の次世代超広視野可視光カメラ Hyper Suprime-Cam (HSC) の探査データを用いて形成過程にある銀河団 (原始銀河団) を多数検出し、統計的に銀河団進化を明らかにする。HSC 探査により従来の 30 倍以上の天域を観測して、得られた多色のデータから遠方銀河の空間分布を調べ、密度超過から原始銀河団の候補を見つける。この手法により、1 年目の HSC 探査から原始銀河団の候補が赤方偏移  $z = 4 - 5$  で数百個得られると期待されている。この原始銀河団サンプルを用いて、次の 2 つの目標を達成する。1) 原始銀河団候補同士の自己相関関数と構造形成モデルを比較することで原始銀河団のダークハロー質量を世界に先駆けて見積もる。2) 原始銀河団と現在の銀河団を比較することで、銀河団の平均ダークハロー質量に対する星質量比の進化を調べる。これにより銀河団の形成過程においてダークハロー質量と星質量のどちらが先に集積したかを明らかにする。本研究の特徴は、HSC 探査の広領域・高感度データによって、初めて高赤方偏移銀河の分布から無バイアスで多数の原始銀河団候補を選び出すことができる点である。これにより得られる原始銀河団候補の数は従来の探査の約 100 倍におよび、上記のような自己相関関数の解析や銀河団質量比の進化を初めて調べることができる。

## 1 Introduction

銀河団は総質量が  $10^{14} - 10^{15} M_{\odot}$  の、宇宙で最も重い力学系である。中でも形成過程の銀河団である原始銀河団は、主に赤方偏移  $z \gtrsim 2$  以上の過去に存在し、やがて現在の銀河団になると考えられている。そのため原始銀河団は宇宙の構造形成の謎を紐解く鍵となる。しかし、この銀河団がどのように形成・進化したかは観測的にあまり理解されていない。そこで私は、すばる望遠鏡の次世代超広視野可視光カメラ Hyper Suprime-Cam (HSC) の探査データを用いて原始銀河団を多数検出し、統計的に銀河団進化を解明する。原始銀河団の候補は銀河の密度超過から探すのだが、この密度超過領域を調べれば、これまで求められなかったハローの質量も求めることが出来る。Cold Dark Matter (CDM) モデルは構造形成と銀河進化を遡るための基本的なモデルである。このモデルでは、初期の宇宙で CDM が重力不安定性から小規模な構造を形成し、質量密度の大きなダークハローを構成する。このダークハローの周囲にバリオンが集まり、合体することで、初期の小さい構造から銀河、銀河団と徐々に大規模な構造が構築さ

れていく (Ouchi 2003)。よって、質量の存在量と分布を宇宙初期と現在で比較することで密度の摂動の成長を測る。それが  $\Lambda$ CDM モデルに制限を与える (Toshikawa et al. 2012)。

## 2 Observations

観測には、すばる望遠鏡に搭載される次世代超広視野可視光カメラ Hyper Suprime-Cam (HSC) を用いる。HSC は 2012 年夏にファーストライトを迎え、最初の科学的な観測データは 2013 年春から取得できる予定である。HSC 探査により、観測する天域は従来のすばる望遠鏡の可視光カメラ Suprime-Cam の 30 倍以上に及び、原始銀河団の候補を見つけるには、次に述べるライマンブレイク法を用いる。銀河から放射された連続光の内、 $912 \text{ \AA}$  以下の波長では、光子が水素原子ガスの電離に消費される。さらに、 $912 - 1216 \text{ \AA}$  の波長の光は視線方向にある中性水素に吸収され、大幅な減光を受ける。よって、銀河からの連続光の内、 $1216 \text{ \AA}$  よりも短波長側のみでは銀河を検出できない (ドロップアウトする)。この原理を用い

た手法をライマンブレイク法という (塩谷泰広 / 谷口 義明 『銀河進化論』 2009)。

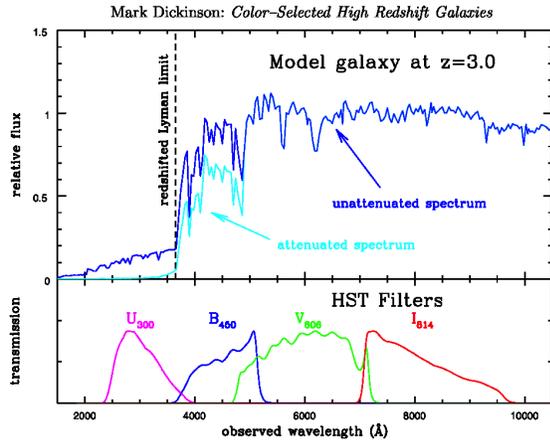


図 1: ライマンブレイク法の概念図 (Dickinson 1998)。横軸は観測される波長で、上図の縦軸はフラックスの相対値、下図の縦軸は透過率。図 1 は  $z = 3$  の星形成銀河のスペクトルのデータで、 $\sim 3700\text{\AA}$  よりも短波長側で大きく減光していることが分かる。下図も合わせて見ると、B、V、I バンドでは検出できるが、U バンドではドロップアウトして検出できないことが分かる。

実際に観測する際は連続光は赤方偏移しているので、今回は  $g$  バンド (中心波長  $4858\text{\AA}$ 、波長幅  $1297\text{\AA}$ ) と  $r$  バンド (中心波長  $6290\text{\AA}$ 、波長幅  $1358\text{\AA}$ ) (Fukugita et al. 1995) でのドロップアウト銀河を用いて広視野なサーベイを行う。具体的には、広帯域

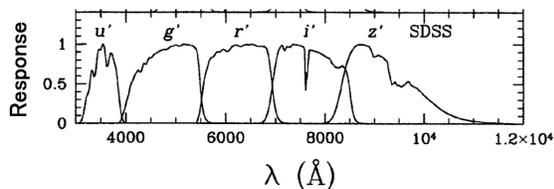


図 2:  $g$  バンド、 $r$  バンドを含む可視・赤外線ですら主に用いられる波長帯のバンドパス (Fukugita et al. 1995)。横軸は波長で、縦軸は感度。代表的なものには Johnson-Kron/Cousins の測光システムと、Sloan Digital Sky Survey (SDSS) の測光システムがある。図 2 と本文中の値は SDSS のもの。

フィルターを合計 5 つ使い、200 - 300 平方度を観

測する。これより得られた多色のバンドのデータから遠方銀河の空間分布を調べ、密度超過から原始銀河団の候補を見つける。以上の手法により、HSC 探査を開始してから 1 年目には、原始銀河団の候補が赤方偏移 4 - 5 で数百個見つかるかと期待されている。

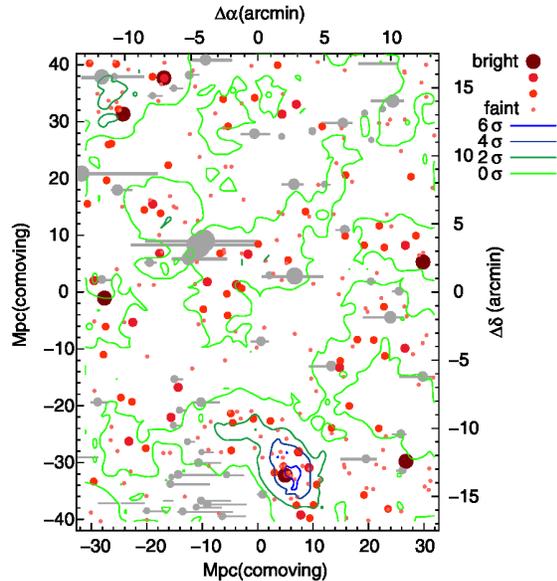


図 3: 銀河の候補の分布と密度超過領域の図 (Toshikawa et al. 2012)。図 3 は  $z \sim 6$  の銀河候補 256 個のデータである。候補天体は図中の丸い記号で表されていて、記号の大きさは  $z'$  バンドに比例している。等級は  $25.0 \leq z' \leq 27.1$ 。曲線は表面数密度の密度超過を  $0\sigma \sim 6\sigma$  まで、 $2\sigma$  ごとに表した等高線である。ここで、北は図中の上で東は左になり、密度超過領域は、南側で明確に見られる。原始銀河団候補を探すためには、このような領域を調べる。図中の灰色の部分にはマスクされた領域。

### 3 My Scientific Goal

HSC の来年のデータから得られた原始銀河団のサンプルを用いて、次の 2 つの目標を達成する。

1) 原始銀河団候補同士の自己相関関数と構造形成モデルを比較することで原始銀河団中心部にあるダークハロー質量を見積もる。これは世界に先駆け

た解析になる。具体的には、観測により得られた自己相関関数を構造形成の解析的モデルの結果図 4 と比較することでダークハロー質量は推定できる。図

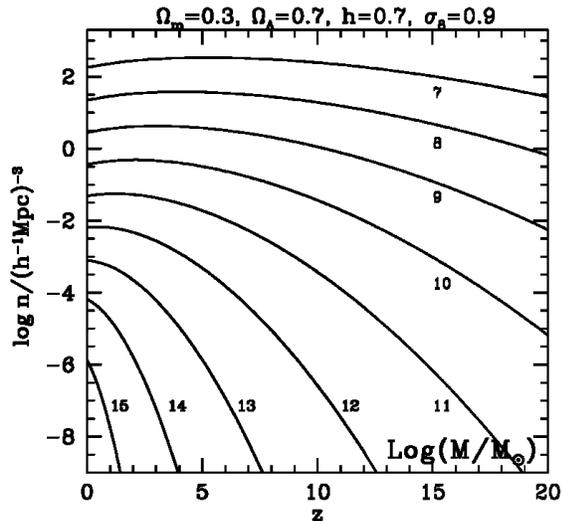


図 4: 様々なダークハロー質量に関して、赤方偏移の関数としてある質量でのダークハローの存在量を表した図 (Mo and White 2002)。横軸は  $0 < z < 20$  の赤方偏移。縦軸は、 $\Lambda$ CDM モデルで、ある質量  $M$  以上のダークハローの共形数密度。図中の曲線に示してある数字は、 $\log(M/M_{\odot})$  の値である。

4 で用いているパラメータは、物質の密度パラメータ  $\Omega_m = 0.3$ 、宇宙定数の密度パラメータ  $\Omega_{\Lambda} = 0.7$ 、 $h = 0.7$ 、パワースペクトルの振幅  $\sigma_8 = 0.9$  である。

原始銀河団のダークハロー質量はクラスターの形成を理解するための基本的な性質の一つである。しかし、これまでは原始銀河団の数密度が小さく、観測的に研究されてこなかった。

2) 原始銀河団と現在の銀河団を比較することで、銀河団の平均ダークハロー質量  $M_{\text{dh}}$  に対する星質量  $M_*$  の比  $M_*/M_{\text{dh}}$  の進化を調べる。具体的に、まず星質量は、紫外線の絶対光度と星質量の関係から求めることができる。ダークハロー質量は、1) で求めたものを用いる。そこから  $z \sim 4-5$  の原始銀河団の  $M_*$  の比  $M_*/M_{\text{dh}}$  を求める。次に、これまでの観測結果を元に、現在の銀河団の  $M_*/M_{\text{dh}}$  も求める。以上より、原始銀河団と現在の銀河団の  $M_*/M_{\text{dh}}$  が異なるかどうか比較する。もし違いが見られたら、過

去と現在どちらの時代が  $M_*/M_{\text{dh}}$  が大きいのかを検討することで、どちらが早く集積し始めたかを解明する。

## 4 Original Points about My Research

本研究の特徴は、HSC 探査の広領域・高感度データによって、初めて高赤方偏移銀河の分布から原始銀河団候補を多数選び出すことができる点である。原始銀河団は特に遠方で数密度が小さく、統計数が不十分であったが、HSC の広視野は、この問題を克服する。実際、HSC から得られる原始銀河団候補の数は従来の探査の約 100 倍におよび、上記のような自己相関関数の解析や銀河団質量比の進化を初めて調べることができる。

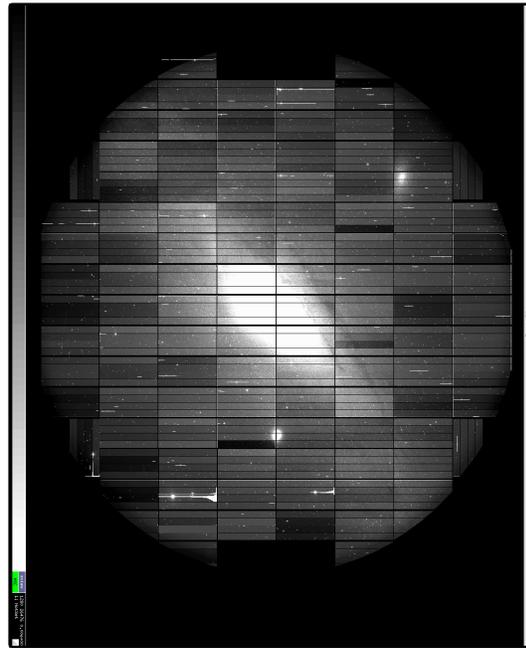


図 5: Hyper Suprime-Cam がとらえた M31(画像の提供: 国立天文台)。これは試験観測の生画像であるが、HSC は M31 のような大型の天体が視野にほぼ収まるほどの広視野である。

ライマンブレイク銀河 (Lyman Break Galaxies; LBGs) を扱う点も、従来の多くの原始銀河団研究とは異なっている。従来の原始銀河団の研究では、銀河

団の候補を見つける手がかりとなる銀河の密度超過領域を探るために、電波銀河やクエーサーが用いられてきた。これらの天体は、近傍の銀河の形成を抑制するバイアスをかけてしまう。本研究では LBG を用いるが、LBG のような星形成銀河は、高赤方偏移での大規模構造の進化を解明するためのほぼ唯一の道具である。LBG を用いれば、高赤方偏移領域でも電波銀河などのバイアスの影響を受けずに、原始銀河団の候補を探ることが出来る。このような無バイアスの原始銀河団を HSC のような広範囲のデータで大規模に検出出来れば、世界初の成果となる。

Toshikawa, J. et al. 2012, ApJ, 750, 137

Trujillo-Gomez, S. et al. 2011, ApJ, 742, 16

国立天文台 HP

<http://anela.mtk.nao.ac.jp/hscblog/builder/>

## 5 Study Plan

1 年目の HSC 探査によるデータからは、 $z \sim 4-5$  の数百個の銀河団候補を見つけ、上述の研究を行う。HSC 探査はその後 5 年間続くため、毎年データが増えていく。この間には、広視野で観測するだけでなく、深く観測も行う。ディープ/ウルトラディープサーベイでは、 $z \sim 2-6$  の各赤方偏移中で、近赤外線、u-band の領域から少なくとも 1 つの原始銀河団候補を見つけられるであろう。そこから、1 年目では出来なかったより高赤方偏移 ( $z \sim 6$ ) の銀河団やより低赤方偏移 ( $z \sim 2-3$ ) の銀河団サンプルを構築する。それらの銀河団サンプルを元に、 $z \sim 6$  から現在までの銀河団進化を連続的に理解する。

## Reference

家正則他編 『シリーズ現代の天文学 15 宇宙の観測 I』日本評論社 2007 年

岡村定矩他編 『シリーズ現代の天文学 別巻 天文学辞典』日本評論社 2012 年

塩谷泰広/谷口義明 『銀河進化論』プレアデス出版 2009 年

Mo, H. J. and White, S. D. M. 2002. MNRAS, 336, 112

Behroozi, Peter S. et al. 2013, ApJ, 770, 57

Dickinson, M. 1998, arXiv:astro-ph/9802064

Fukugita, M. et al. 1995, PASP, 107, 945

Ouchi, M. 2003. PhDT, 3