

クラスタリング解析で探る初期銀河形成

播金 優一 (東京大学大学院 理学系研究科、東京大学宇宙線研究所)

Abstract

銀河のダークハロー質量は銀河形成・進化を理解する上で重要であり、クラスタリング解析により求めることができる。銀河の星質量とダークハロー質量の比は stellar-to-halo mass ratio (SHMR) と呼ばれ、SHMR が最大となるダークハロー質量はピボット質量と呼ばれる。赤方偏移 $z < 1.5$ の銀河のピボット質量は求められているが、 $z > 1.5$ の銀河についてはサンプル数不足のため求められていない。我々はすばる望遠鏡の Hyper-Prime-Cam とハッブル宇宙望遠鏡のデータを使い、 $z = 5 - 6$ の銀河のクラスタリング解析を行い宇宙初期の銀河形成を調べる。

1 銀河形成と SHMR

現代の天文学の大きな目標の一つは、銀河の形成とその進化を理解することである。銀河はダークマターが集合してできたダークハローの中で形成されると考えられている。ダークマターの構造形成は重力相互作用のみを考慮すれば良いので理論的に計算できるが、銀河の形成にはガスの冷却による星形成や超新星爆発と活動銀河核 (active galactic nuclei; AGN) による星形成を抑制するフィードバックの効果など未解明な物理現象が関わっている。これらの物理現象は、赤方偏移やその銀河が属するダークハロー質量などに依存すると考えられている。そのため、様々な時代で銀河のダークハロー質量とその銀河の物理的な性質を観測的に明らかにすることは、銀河の形成・進化を調べる上で重要である。ダークハロー質量に関連する重要な物理量として、stellar-to-halo mass ratio (SHMR) がある。これは銀河の星質量とダークハロー質量の比であり、銀河の中で過去にどれだけ効率良く星形成活動が行われたかどうを示す。図 1 は赤方偏移 $z = 0.37$ の銀河の SHMR を示しており、ダークハロー質量が $10^{12} M_{\odot}$ のところで SHMR が最大となることが分かる。この SHMR が最大となるダークハロー質量をピボット質量といい、ピボット質量を持つダークハローの中では星形成が効率よく行われたことを示している。また、ピボット質量よりもダークハロー質量の軽い側、重い側で SHMR が小さくなるのは、それぞれ超新星爆発と AGN による星形成を抑制するフィードバック

が効きやすくなるからだと考えられる。直接観測することの出来ないダークハロー質量を測定する方法としては、銀河同士の重力レンズ効果を用いる方法 (Mandelbaum et al. 2006) や、衛星銀河の速度場を用いる方法 (More et al. 2011)、X 線光度からピリアル温度を求める方法 (Lin et al. 2003) がある。ただ、いずれの方法も利用できる天体が多くなく、それらが典型的な銀河であるかも分からない。

2 クラスタリング解析

多くの銀河に適用できる方法として、クラスタリング解析がある。これは観測で得られる銀河のクラスタリング強度を、モデル計算によるクラスタリング強度と比較して、ダークハロー質量を求める方法である。ダークハローのクラスタリング強度は宇宙論パラメータが決まれば、重力相互作用のみでモデル計算することが出来る。さらにダークハローの質量と中の銀河の星質量や個数の関係を仮定すれば、銀河のクラスタリング強度を計算することが出来る。これを観測されるクラスタリング強度と比較すれば、ダークハローの質量を求めることが出来る。実際には、銀河の角度相関関数や銀河バイアスを用いて解析を行う。

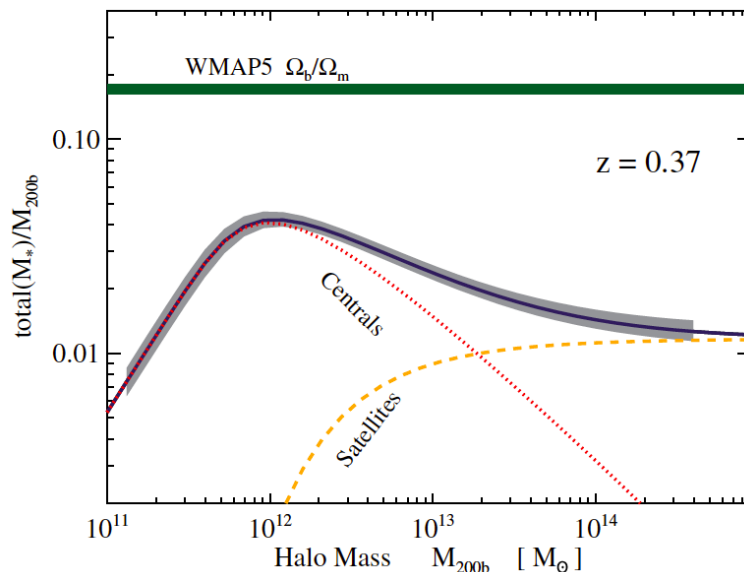


図 1: $z = 0.37$ 銀河の SHMR。横軸はダークハロー質量、縦軸は SHMR である。赤色の点線とオレンジ色の破線はそれぞれ中心銀河と衛星銀河の SHMR に対応している。緑線は WMAP5 によるバリオンダークマター比である (Dunkley et al. 2009)。Leauthaud et al. (2012) より転載。

3 ピボット質量の赤方偏移進化

Martinez-Manso et al. (2012) では *Spitzer* South Pole Telescope Deep-Field Survey により取られた 93.8 deg^2 の撮像データを用いて、 $z \sim 1.5$ の銀河のクラスタリング解析を行った。図 2 の赤いダイヤは、Martinez-Manso et al. (2012) により求められた $z \sim 1.5$ の銀河の SHMR である。図 1 と比較すると分かるように、ピボット質量は $10^{12} M_{\odot}$ よりも大きくなっている。これはピボット質量が赤方偏移進化していることを示しており、時代とともに星形成に関わる物理過程が変化していったためだと考えられる。図 3 は今までの研究で求められたピボット質量を表しており、赤方偏移が大きくなるに連れてピボット質量も大きくなる傾向があることがわかる。

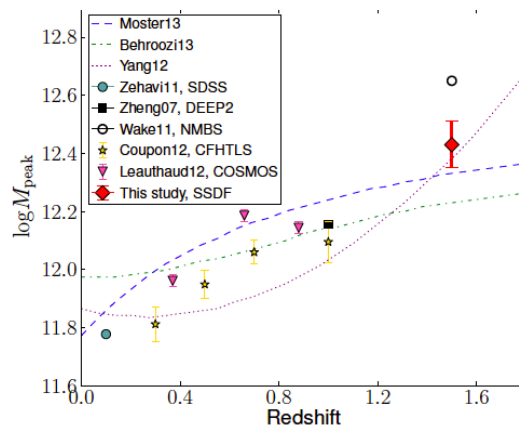


図 3: ピボット質量の赤方偏移進化。横軸は赤方偏移、縦軸はピボット質量である。赤方偏移が大きくなるにつれ、ピボット質量が大きくなることが分かる。Martinez-Manso et al. (2012) より転載。

4 $z = 5 - 6$ の SHMR

Naito (2014) はすばる望遠鏡の広視野撮像データとハッブル宇宙望遠鏡の深撮像データを用いて $z = 5 - 6$ の銀河の SHMR を求めた。求められた SHMR は図 4 に示した。図 4 から分かるように、銀河のサ

ンプル数が足りないために SHMR が精度良く求められていない。また、ピボット質量を至るにも至っていない。このように、 $z = 5 - 6$ のピボット質量は初期宇宙の銀河形成を調べるのに重要であるにも関わらず、まだよく調べられていない。また、図 3 で見

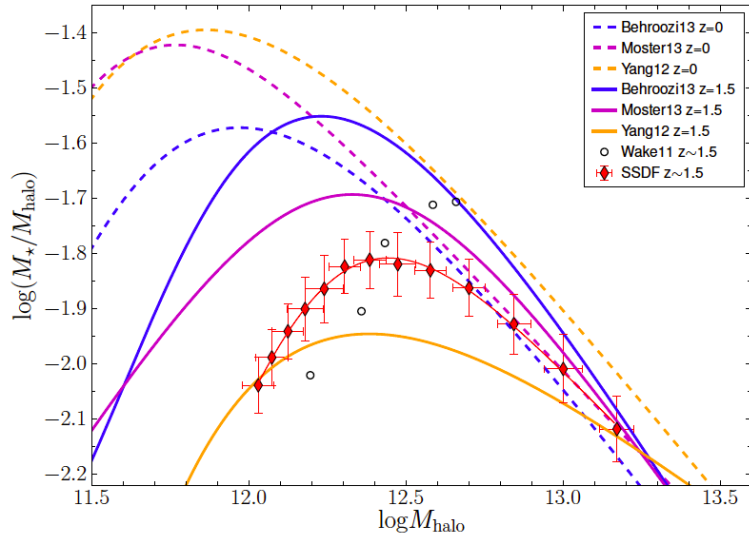


図 2: $z \sim 1.5$ の SHMR。横軸はダークハロー質量、縦軸は SHMR である。エラーバー付きの赤いダイヤが $z \sim 1.5$ の SHMR で、ピボット質量は $\log M_{\text{halo}} = 12.44 \pm 0.08$ である。Martinez-Manso et al. (2012) より転載。

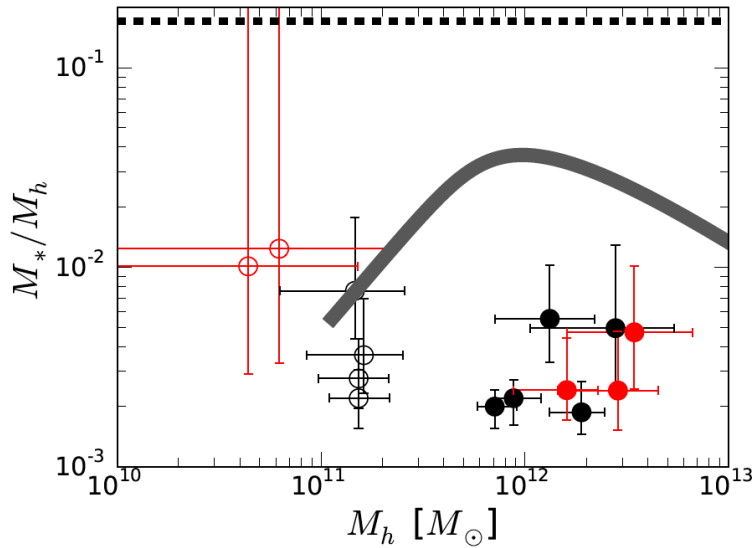


図 4: $z = 5 - 6$ 銀河の SHMR。横軸はダークハロー質量、縦軸は SHMR である。黒丸が $z \sim 5$ 銀河に、赤丸が $z \sim 6$ 銀河に対応している。灰色の曲線は Leauthaud et al. (2012) による $z \sim 0$ 銀河の SHMR で、黒の破線は WMAP5 によるバリオンダークマター比である。Naito (2014) より転載。

られた赤方偏移が大きくなるに連れてピボット質量が大きくなる傾向が、 $z = 5 - 6$ でも続いているのかわかからない。

5 研究計画

我々はすばる望遠鏡の Hyper-Prime-Cam とハッブル宇宙望遠鏡の Advanced Camera for Surveys (ACS) 及び Wide Field Camera 3 (WFC3) による

データを用いて、 $z = 5 - 6$ の銀河のクラスタリング解析を行っている。Hyper-Sprime-Cam による探査は今年の 3 月から始まっており、 1400 deg^2 という超広視野データをもたらす。この超広視野データを用いることで個数密度の小さい大質量銀河を多数検出でき、大質量側の SHMR を精度良く求めることが出来る。一方ハッブル宇宙望遠鏡の ACS と WFC3 による探査は現在も続けられており、限界等級 29 等級に及ぶ深撮像データをもたらす。この深撮像データを用いることで、個数密度が多いが暗く検出が難しい小質量銀河を多数観測できる。この二つのデータを組み合わせることで、ピボット質量を大質量、小質量の両側から制限することが出来る。予想されるサンプル数も従来の研究の 15-100 倍であり、SHMR を 4-10 倍の精度で求めることができる。この SHMR の精度により、 $z = 5 - 6$ でピボット質量の見積もりが初めて可能となると考えている。

Reference

- Dunkley, J., Komatsu, E., Nolta, M. R., et al. 2009, ApJS, 180, 306
- Leauthaud, A., Tinker, J., Bundy, K., et al. 2012, ApJ, 744, 159
- Lin, Y.-T., Mohr, J. J., & Stanford, S. A. 2003, ApJ, 591, 749
- Mandelbaum, R., Kauffmann, G., Hirata, C. M., et al. 2006, MNRAS, 368, 715
- Martinez-Manso, J., Gonzalez, A. H., Ashby, M. L. N., et al. 2014, ArXiv e-prints, arXiv:1404.2930
- More, S., van den Bosch, F. C., Cacciato, M., et al. 2011, MNRAS, 410, 210
- Naito, Y. 2014, Master thesis, The University of Tokyo