

すばる/HSC とハッブル望遠鏡で探る $z = 4 - 7$ の 銀河・ダークハロー関係

播金 優一 (東京大学大学院 理学研究科)

Abstract

銀河を取り囲むダークハローは、ガス冷却による星形成や超新星爆発・AGN によるフィードバックなどを通して銀河形成と密接に結びついている。我々はすばる/Hyper-Suprime-Cam(HSC) による最新の超広領域撮像データとハッブル望遠鏡の深撮像データから $z \sim 4 - 7$ の銀河を約 7000 個選択し、この銀河・ダークハロー関係を調べている。これらのサンプルに halo occupation distribution (HOD) model を用いたクラスタリング解析を適用し、ダークハロー質量と星形成 duty cycle (DC) を求めた。得られたダークハロー質量から求められた stellar-to-halo mass ratio (SHMR) は近傍宇宙からの進化を示している一方、DC はハロー質量が小さくなるほど小さくなるという傾向が見られた。また、ガスから星への変換率を表す baryon accretion rate (BCE) を見積もったところ、ハロー質量が小さくなるにつれて小さくなるという傾向が見られた。

1 Introduction

銀河を取り囲むダークハローは銀河形成において鍵を握っていると考えられている。例えば、ガスの冷却は温度と密度に依存するので、 $10^{10} - 10^{13} M_{\odot}$ のダークハローで効率的である。また、小質量のハローでは超新星爆発が、大質量のハローでは活動銀河核 (active galactic nuclei; AGN) が、星形成を抑制していると考えられている。このように銀河とダークハローには密接な関わりがあり、この銀河・ダークハロー関係を様々な赤方偏移で観測的に調べることは銀河形成の全体像の理解へ繋がる。

この銀河・ダークハロー関係を表す重要な物理量として、stellar-to-halo mass ratio (SHMR) がある。SHMR は銀河の星質量とダークハロー質量の比であり、過去の銀河の星形成効率を表している。この SHMR は $z \sim 1$ までの近傍では求められているが (e.g., Leauthaud et al. 2012)、遠方宇宙ではダークハロー質量の見積もりの不定性のために詳しく調べられていない。

ダークハローの質量を観測的に見積もる方法としては、弱い重力レンズ効果や satellite galaxy の速度、X 線光度を用いる方法がある。しかしこれらの方法は、 $z \sim 1$ を超える遠方の宇宙には適用できない。遠

方宇宙でも適用できる方法としてはクラスタリング解析があるが大統計が必要であり、これまでの研究では十分には求められてこなかった (cf. Lee et al. 2006; Barone-Nugent et al. 2014)。

そこで本研究では、ハッブル宇宙望遠鏡とすばる望遠鏡のデータを用いて幅広い明るさ範囲の Lyman break galaxy (LBG) を $z = 4 - 7$ で選択し、クラスタリング解析を用いてダークハロー質量を求めた。求めたダークハロー質量から SHMR などを計算し、遠方宇宙における銀河形成を議論する。

2 Data

2.1 Hubble Data

ハッブル望遠鏡の ACS, WFC3 で取られたアーカイブデータのうち、使用可能な領域を全て使用した。具体的には UDF12, GOODS-North-Deep, GOODS-North-Wide, GOODS-South-Deep, GOODS-South-Wide, CANDELS-AEGIS, CANDELS-COSMOS, CANDELS-UDS, HFF-Abell2744 (Parallel), HFF-MACS0416 (Parallel) の計 10 領域であり、約 600 平方度、限界等級 27.5-30.0 等のデータである。Bouwens et al. (2015) の color selection criteria をも

とに、 $z \sim 4, 5, 6, 7$ の LBG をそれぞれ約 4000, 2000, 600, 3000 個選択した。

2.2 Subaru Data

すばる望遠鏡の Hyper-Suprime-Cam (HSC) 探査で取られた画像のうち、Wide-XMM 領域の約 5 平方度、限界等級 25 等のデータを使用した。Hildebrandt et al. (2009) の color selection criteria をもとに、 $z \sim 5$ の LBG を約 300 個選択した。

3 Clustering Analysis

クラスタリング強度を定量的に評価するために、LBG を各赤方偏移、等級のサブサンプルに分け、角度相関関数を計算した。角度相関関数 $\omega(\theta)$ は、Landy & Szalay (1993) によれば以下の式で計算できる、

$$\omega(\theta) = \frac{DD(\theta) - 2DR(\theta) + RR(\theta)}{RR(\theta)}. \quad (1)$$

ここで、 $DD(\theta)$, $DR(\theta)$, $RR(\theta)$ はそれぞれ銀河-銀河、銀河-ランダム点、ランダム点-ランダム点のペアの数である。計算した角度相関関数を、ダークハロー中の銀河の個数分布をモデル化した halo occupation distribution (HOD) model の予言とフィッティングを行うことで、ダークハロー質量と duty cycle (DC) を求めた。我々の構築した HOD モデルでは、質量 M のダークハローの中の銀河の平均個数は、以下のように表される、

$$N(M) = DC(N_c(M) + N_s(M)), \quad (2)$$

$$N_c(M) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\log M - \log M_{\min}}{\sigma_{\log M}} \right) \right], \quad (3)$$

$$N_s(M) = N_c(M) \left(\frac{M - M_0}{M'_1} \right)^\alpha. \quad (4)$$

ここで、 $N_c(M)$, $N_s(M)$ は central galaxy, satellite galaxy の平均個数を表す。

4 Results

4.1 Stellar-to-Halo Mass Ratio

各 LBG サブサンプルの SHMR を求めた。星質量は、Shibuya et al. (2015) の UV 等級と星質量の関係を使って見積もった。図 1 には、我々の求めた各 LBG サブサンプルの SHMR をプロットした。横軸はダークハローの質量、縦軸は SHMR であり、青、緑、オレンジ、赤の丸印が $z \sim 4, 5, 6, 7$ の SHMR である。黒の実線は Behroozi et al. (2013) の $z \sim 0$ の結果を示している。我々の結果は、SHMR が $z \sim 0$ から $z \sim 4$ で、また $z \sim 4$ から $z \sim 7$ で赤方偏移進化することを示している。

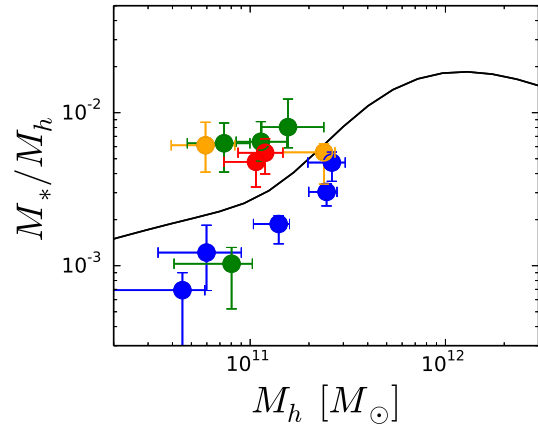


図 1: 各赤方偏移の SHMR。横軸はダークハロー質量、縦軸は SHMR。青、緑、オレンジ、赤の丸印はそれぞれ $z \sim 4, 5, 6, 7$ の SHMR である。黒の実線は Behroozi et al. (2013) の $z \sim 0$ の結果を示している。

4.2 Duty Cycle

図 2 には、DC をダークハロー質量の関数としてプロットした。青、緑、オレンジ、赤の丸印が $z \sim 4, 5, 6, 7$ の DC に対応している。エラーバーが大きいですが、Spearman Rank 検定を行うと 2σ で正の相関があることが分かった。

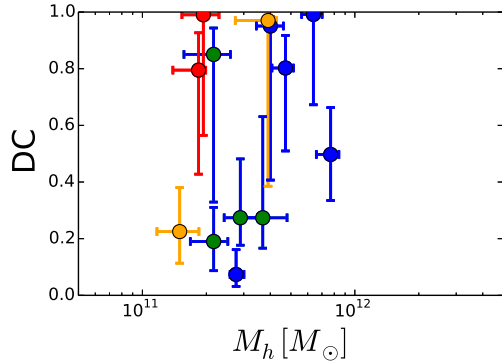


図 2: 各赤方偏移の DC。横軸はダークハロー質量、縦軸は DC。青、緑、オレンジ、赤の丸印はそれぞれ $z \sim 4, 5, 6, 7$ の DC である。

4.3 Baryon Conversion Efficiency

我々はガスから星への変換効率である、baryon conversion efficiency (BCE) を求めた。BCE は星形成率とバリオン降着率の比であり、以下の式で表せる

$$BCE = \frac{SFR}{\dot{M}_b}. \quad (5)$$

バリオン降着率は、Behroozi+13 の式と cosmic baryon fraction $f_b = \Omega_b/\Omega_m = 0.15$ を用いて計算した。図 3 には、 $z \sim 4$ の LBG サブサンプルの BCE を載せた。求めた BCE は Behroozi et al. (2013) の結果と同等であり、ダークハロー質量が大きくなるほど、BCE が大きくなるという傾向が見られる。

5 Discussion

DC も BCE も、ダークハロー質量が大きくなると大きくなるという傾向が見られた。これは質量が小さいダークハローの内部では、LBG として選択されるほど星形成が活発でなく、ガス・星変換効率が高くないことを示している。これには 2 つの理由が考えられる。一つ目は、フィードバックの影響である。小質量ハローでは重力ポテンシャルが浅く、超新星爆発などによるアウトフローでガスが吹き飛ばれやすく、星形成が抑制されやすいことが考えられる。二つ目は、ガス冷却の効果である。ハロー質量が小さ

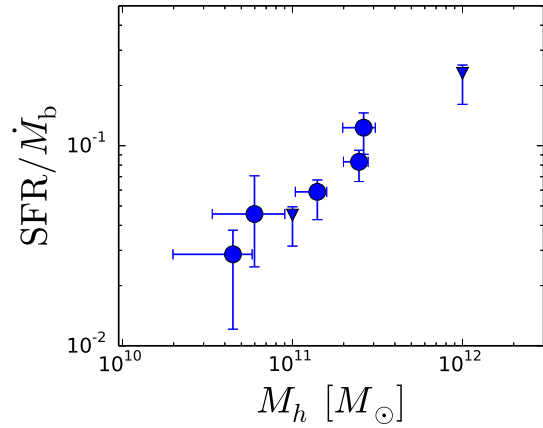


図 3: $z \sim 4$ の BCE。横軸はダークハロー質量、縦軸は BCE。丸印は我々の求めた BCE、三角印は Behroozi et al. (2013) の BCE。

すぎるとガス冷却が効率的ではなくなり、星形成が起きにくくなる。

6 Conclusion

- $z \sim 0$ から $z \sim 4$ で、また $z \sim 4$ から $z \sim 7$ で stellar-to-halo mass ratio の赤方偏移進化が見られた
- Duty cycle は、ハロー質量が大きくなるにつれ大きくなるという相関が見られた
- $z \sim 4$ の baryon conversion efficiency は、ハロー質量が大きくなるにつれ大きくなった。
- Duty cycle と baryon conversion efficiency のハロー質量依存性は、小質量のダークハローでは星形成が起きにくいことを示唆している。

Acknowledgement

基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台からのご支援に感謝いたします。

Reference

- Barone-Nugent, R. L., Trenti, M., Wyithe, J. S. B., et al. 2014, *ApJ*, 793, 17
- Behroozi, P. S., Wechsler, R. H., & Conroy, C. 2013, *ApJ*, 770, 57
- Bouwens, R. J., Illingworth, G. D., Oesch, P. A., et al. 2015, *ApJ*, 803, 34
- Hildebrandt H., Pielorz J., Erben T., et al. 2009, *A&A*, 498, 725
- Landy, S. D., & Szalay, A. S. 1993, *ApJ*, 412, 64
- Leauthaud, A., Tinker, J., Bundy, K., et al. 2012, *ApJ*, 744, 159
- Lee, K.-S., Giavalisco, M., Gnedin, O. Y., et al. 2006, *ApJ*, 642, 63
- Shibuya, T., Ouchi, M., & Harikane, Y. 2015, *ArXiv e-prints*, arXiv:1503.07481