

CFHTLenS/VIPERS を用いた $0.5 < z < 1.0$ の銀河の星質量-DM ハロー質量比

坂東 卓弥 (愛媛大学大学院 理工学研究科)

Abstract

CFHTLS と VIPERS の非常に広視野の多波長データを用いて、 $0.5 < z < 1.0$ の銀河の stellar-to-halo mass ratio (SHMR) を銀河団スケールを含む 幅広いダークマターハロー質量に渡って調べた論文 [1] を紹介する。宇宙の構造形成の枠組みの中での銀河の形成・進化を理解するためには、ダークマターハローの中での銀河形成がそのダークハローの性質とどのように関係しているかを知ることが非常に重要である。それを調べるための最も基本的な指標に、ダークマターハロー質量に対する 銀河の星質量の比、SHMR がある。今回紹介する論文では、大規模銀河サンプルを用いて銀河のクラスタリング、galaxy-galaxy lensing、星質量関数を求めて、星質量とダークマターハロー質量 の関係を調べた。 $10^{12} \sim 10^{15} M_{\odot}$ のダークマターハロー質量にわたって SHMR を見ると、 $M_{h,peak} = 1.9^{+0.2}_{-0.1} \times 10^{12} M_{\odot}$ でピーク $M_{*}/M_h = 0.025$ を持つことがわかった。central と satellite 銀河に分けてみると、ピーク付近では central 銀河が 星質量を支配しているのに対して、銀河団スケールでは satellite 銀河からの 寄与が星質量を支配していることが分かった。さらにこの SHMR の結果を semi-analytic simulation と比べると、central 銀河の SHMR を過大評価する一方で、satellite 銀河からの寄与を過小評価することがわかった。

1 Introduction

近年、数多くの大規模多波長サーベイのデータが使えるようになったことで、観測された銀河の性質とダークマターハローとを結びつける統計的手法が注目を集めている。この手法は、ダークマターの空間分布は予想可能で、その空間分布の統計的性質は銀河の空間分布の統計的性質と結びつけることができるという仮定に基づいている。Cooray と Sheth(2002) のハローモデルはダークマター分布の定量的な表現であるが、これは 3 つの要素で特徴付けられる。1、単位質量あたりのハローの数密度、2、ハローのバイアス、3、ハロー密度プロファイルである。銀河の形成と進化は個々のダークマターハローの中で、バリオンガスが収縮し、冷えて、星が生まれることで行われる。我々はこれを定性的に理解しているが、まだ多くの鍵は未発見のままである。

2 DATA

この研究では $0.5 < z < 1.0$ において $M_{*} = 10^{10} M_{\odot}$ より質量の大きな銀河の体積に制限をつけたサンプルを構築するために複数のデータセットを組み合わせた。我々の銀河の選択は $K_s < 22$ の NIR observation にもとづいている。そしてこれは CFHTLS-Wide imaging survey を掛けあわせている VIPERS の W1 と W4 の 2 つのフィールドを用いて選んだ。そしてこれは 23.1deg^2 の全ての unmasked area をカバーしている。

CFHTLS は 5 つの可視光バンド (u^*, g, r, i, z) を用いたカナダ・フランス・ハワイ望遠鏡の Mega-Cam を用いて行われた photometric survey である。この解析では測光データを用い、CFHTLenS チームによって作られたカタログを用いた。

我々は約 120 時間もの total allocation time による CFHT の WIRCam を用いて VIPERS field の K_s バンドを処理した。測光データは SExtractor を用い

て実行された。UKIDSS Ultra Deep Survey(UDS)で測定された等級と WIRCam の K_s バンド等級の間での分散から得た a factor 1.5 による誤差を掛けた。また CFHTLS-D1 WIRDS data(Bielby et al. 2012) も用いた。

我々は GALEX 衛星による UV imaging photometry(Martin et al.2005; Morrissey et al. 2005) を用いた。UV photometry を抜き出すために、我々は EM-photo を用いた。

我々の photometric redshift の測定と確認のために、我々は WIRCam の領域で使うことができる全ての spectroscopic redshift を用いた。

photometric redshift を計算するために、template fitting のコード LePhare を用いた。

我々は photometric と spectroscopic redshift を用いて、Bruzual & Charlot(2003) による SPS code に基づく SED library の χ^2 の最小化を行った。星形成史は不変であり指数関数的に減衰する関数を用いて説明されるかのどちらか一方である。そしてこれは $0.01 \leq \tau(\text{Gyr}) \leq 15$ の e-folding time を用いた。また 2 つの金属量 ($Z_\odot, 0.2Z_\odot$) を用いて、the Chabrier(2003) IMF を採用した。

3 Model and Fitting Procedure

3.1 stellar-to-halo mass relationship

central 銀河の $M_\star - M_h$ の関係を説明するために、我々は Behroozi et al.(2010) が提案した parametrize された関数 f_{SM-HM} を採用する。そしてその定義は以下である。

$$\begin{aligned} \log_{10}(f_{SM-HM}^{-1}) &= \log_{10}(M_h(M_\star)) \quad (1) \\ &= \log_{10}(M_1) + \beta \log_{10}\left(\frac{M_\star}{M_{\star,0}}\right) \\ &\quad + \frac{\left(\frac{M_\star}{M_{\star,0}}\right)^\delta}{1 + \left(\frac{M_\star}{M_{\star,0}}\right)^{-\gamma}} - \frac{1}{2} \end{aligned}$$

ここで M_1 はハロー質量の座標に沿ってその関係のスケールリングをコントロールする。また $M_{\star,0}$ は星質

量のスケールリングをコントロールする。 β, δ, γ はそれぞれ $M_h - M_\star$ 関係の低質量側、高質量側、曲がり具合 (形) をコントロールするという意味である。

3.2 The central occupation function

サンプル ($M_\star > M_\star^t$) に含まれる central 銀河に対する HOD は 0 から 1 まで増加する単調関数として定義され $M_\star^t$ に対応するハロー質量を中心になめらかに遷移する。

$$\begin{aligned} < N_{cen}(M_h|M_\star^t) > \quad (2) \\ &= \frac{1}{2} \left[1 - \text{erf} \left(\frac{\log_{10}(M_\star^t) - \log_{10}(f_{SM-HM}(M_h))}{\sqrt{2}\sigma_{\log M_\star}(M_\star^t)} \right) \right] \end{aligned}$$

パラメーター $\sigma_{\log M_\star}$ はあるハロー質量での星質量の分散を表したもので、次のようにパラメータ化される。

$$\sigma_{\log M_\star}(M_\star^t) = \sigma_{\log M_\star,0} \left(\frac{M_\star^t}{10^{10} M_\odot} \right)^{-\lambda} \quad (3)$$

3.3 The satellite occupation function

$M_\star > M_\star^t$ のサンプルの中の satellite 銀河に対する HOD は、ハロー質量のシンプルなべき関数で記述される。

$$< N_{sat}(M_h|M_\star^t) > = \left(\frac{M_h - M_{cut}}{M_{sat}} \right)^\alpha \quad (4)$$

以下 (5) 式のように cut-off した質量スケールの M_{cut} を固定した。

$$M_{cut} = f_{SM-HM}^{-1}(M_\star^t)^{-0.5} \quad (5)$$

この仮定は Coupon et al.(2012) によって報告された値に基づいている。

satellite HOD の規格化定数である M_{sat} は central 銀河の $M_\star - M_h$ 関係からのハロー質量 scaling に従い、次のように表される。

$$\frac{M_{sat}}{10^{12} M_\odot} = B_{sat} \left(\frac{f_{SM-HM}^{-1}(M_\star^t)}{10^{12} M_\odot} \right)^{\beta_{sat}} \quad (6)$$

3.4 Total occupation functions and observables

トータルの HOD は以下 (7) 式で表される。我々の測定は各星質量 bin のサンプルに対して行われるので、我々は (8) 式による binned 関数内で固有の HOD 関数に変形させる。等しい関係 HOD を binned した central 銀河と satellite 銀河によって保たれている。

$$\langle N_{tot}(M_h|M_\star^t) \rangle \quad (7)$$

$$= \langle N_{cen}(M_h|M_\star^t) \rangle + \langle N_{sat}(M_h|M_\star^t) \rangle$$

$$\langle N_{tot}(M_h|M_\star^{t_1}, M_\star^{t_2}) \rangle \quad (8)$$

$$= \langle N_{tot}(M_h|M_\star^{t_1}) \rangle - \langle N_{tot}(M_h|M_\star^{t_2}) \rangle$$

いろいろなパラメータの HOD とハローモデルから星質量関数、projected 2 点相関関数、実空間相関関数、銀河-銀河重力レンズ signal を計算し、実際に観測されたものと最もよく合う HOD パラメータを求めた。

4 Results

パラメータの best-fit の値と 68 % の信頼区間は表 1 の上のパネルで与えられる。

4.1 Central $M_\star - M_h$ relationship and the SHMR

図 1 の左側は、最もよく fit している central 銀河 $M_\star - M_h$ relationship である。これは (1) の方程式によって parametrize されている。図 1 の右側は SHMR である。

central 銀河の SHMR のピークの位置は $M_{h,peak} = 1.92^{+0.17}_{-0.14} \times 10^{12} M_\odot$ であり、黒の矢印で指している。この SHMR のピークの値は $SHMR_{peak} = 2.2^{+0.2}_{-0.2} \times 10^{-2}$ である。satellite 銀河を入れても、このピークの位置と値は central 銀河だけに対して求めた時と変わらない。しかし、この図 1 において興味のある注目すべき結果はハロー質量の増加とともに、satellite

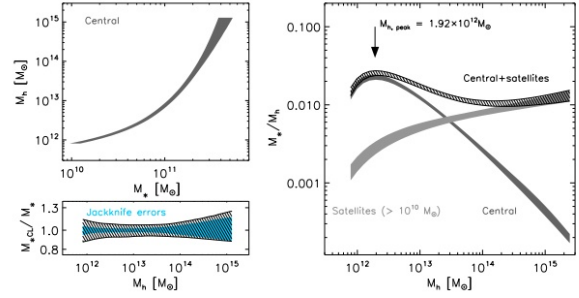


図 1: Best-fit $M_\star - M_h$ relationship (left) and stellar-to-halo-mass (SHMR, right): central 銀河からの寄与は濃いグレーで表され、satellite 銀河からの寄与は明るいグレーで表されている。それらを合わせた total SHMR は黒で表されている。左下のパネルにおける影の付いた領域は 68 % の信頼限を表しており、水色で示されているのは統計誤差で、全ての誤差は黒の領域として表されている。

表 1: Total errors, total error covariance matrices

Parameter	mean	upperCL	lower CL
$\log_{10} M_1$	12.67	0.124	-0.083
$\log_{10} M_{\star,0}$	10.90	0.082	-0.067
β	0.36	0.077	-0.051
δ	0.75	0.193	-0.151
γ	0.81	0.477	-0.386
$\sigma_{\log M_{\star,0}}$	0.394	0.100	-0.074
λ	0.25	0.082	-0.083
B_{sat}	9.96	0.938	-0.845
β_{sat}	00.87	0.078	-0.065
α	1.14	0.040	-0.038

銀河からの星質量の寄与が増加していくという点である。銀河団程度のハロー質量では、この寄与は 90 % にも至る。しかし地上観測では測定することが難しい ICL については考慮していないことには注意が必要である。

5 Discussion&Conclusion

optical/NIR の深く広いユニークな組み合わせを用いて銀河のクラスタリング、重力レンズ、星質量

関数を組み合わせることで、 $0.5 < z < 1.0$ の銀河の HOD に制限を付け、銀河の性質とダークマターハロー質量とを結びつけることができた。この研究での主な結果は赤方偏移が約 0.8 のときの銀河団クラスまでの質量範囲における $M_{\star} - M_h$ 関係の正確な測定である。またこの研究では central 銀河と satellite 銀河で SHMR を分けて測定した。

(i) HOD モデルは星質量で 2 桁、ハロー質量で 3 桁にわたる全ての質量 bin において統計誤差の範囲内で 4 つの観測量を正確に再現した。

(ii) 我々の $M_{\star} - M_h$ 関係は $z \sim 0.8$ の過去の研究と一致した。またモデリングにおける相違点を適切に考慮に入れると、独立な方法で求めた多くの結果を公平に比較することが可能であることを示した。

(iii) ハローモデルと今回の HOD モデルの仮定から生じる系統誤差は satellite 銀河数の規格化定数にして 20 %、ハロー質量に対して 50 % にもなる可能性がある。

(iv) central 銀河の SHMR は $M_{h,peak} = 1.9 \times 10^{12} M_{\odot}$ にピークをもつ。

(v) 最も質量の大きいハローでは、total SHMR は satellite 銀河の寄与に支配されている。

Reference

- J.Coupon et al.(2015), Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 449, Issue 2, p.1352-1379
Cooray & Sheth(2002)
Bielby et al.(2012)
Martin et al.(2005)
Morrissey et al.(2005)
Bruzual & Charlot(2003)
Chabrier(2003)
Behroozi et al.(2010)
Coupon et al.(2012)

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。