

Subhalo abundance matching を用いた Subhalo-銀河関係の考察

山本 幹人 (名古屋大学大学院 理学研究科 M1)

Abstract

SubHalo Abundance Matching (SHAM) は、バリオンなしの N 体シミュレーション (DM シミュレーション) から銀河カタログを得る解析手法である。具体的には、DM シミュレーションの結果から DM の集合体である Halo と Halo 中の高密度領域 (Subhalo) を見つけ出し、Subhalo とその内部の銀河の個数密度に関係性を与えることで、Subhalo カタログから銀河カタログを得ている。SHAM はフィッティングパラメータの少ない、シンプルなモデルではあるが、観測とよく合致する結果を得られることが確認されている。本講演では主として “Modeling color-dependent galaxy clustering in cosmological simulations” (Masaki et al. 2013) をレビューする。この研究では、Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) (Komatsu et al. 2011) のデータを用いた DM シミュレーション結果の解析として、Subhalo の年齢 (Subhalo age) を取り入れた SHAM を行った結果、Slone Digital Sky Survey (SDSS) にて得られた観測結果 (Zehavi et al. 2011) とよく合致する色ごとの銀河カタログを得ることができた。また、フィッティングの結果、観測された銀河がおおよそどれほどの年齢であるかを推定できた。本講演の最後には、レビューの結果を踏まえ、SHAM の手法をどのように活用・発展させるのかを議論する。

1 Introduction

現在、観測から宇宙の全エネルギーは主に宇宙項 Λ で表される dark energy と物質 (cold dark matter (CDM) とバリオン) によって担われていることがわかっている。それぞれの割合である宇宙論パラメータ Ω は観測により、以下の値であるとされる $\Omega_\Lambda = 0.728, \Omega_m = 0.272, \Omega_b = 0.0441$ (Komatsu et al. 2011)。この Λ -CDM モデルの下では、宇宙の構造形成は dark matter (DM) によるものが大きい。バリオンなしの N 体シミュレーション (DM シミュレーション) はその過程を再現する非常に有効な手段である。また、DM シミュレーションから観測と一致するような銀河カタログを得ることのできる解析手法の構成は、次の二点で特に意味がある。

1. DM の重力効果のみを考慮したシミュレーションからの銀河 (バリオン) の情報:

実際の宇宙を完全に再現するようなシミュレーションは、バリオンの進化を追うする必要があり、コストがかかる。DM シミュレーションでは重力効果のみを考慮すれば良いため、比較的少ないコストで済む。

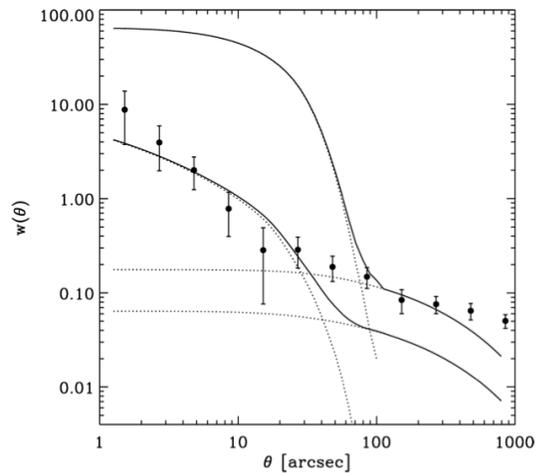


図 1: 角相関関数 w_θ の HOD モデルと観測 (点) との比較。点線は 1-Halo 項と 2-Halo 項からの w_θ 、実線が HOD モデルによる w_θ である。(Quadri et al. 2008)

2. 構造形成と銀河の関係性の研究:

DM の重力による構造形成が銀河の進化にどのように影響するのか調べるのが可能になる。

2 の観点から観測結果を説明する手法として、Halo Occupation Distribution (HOD) モデルがある。HOD モデルは DM の集合体である Halo 中での質量の割合、Mass functionなどをパラメータとして、Halo と銀河を関係づける手法である (Seljak, 2000)。しかし、多くのパラメータを必要とし、フィッティングが難しい例も存在することが確認されている (Quadri et al. 2008)。図 1 は観測と一致するような HOD モデルが、一組のパラメータ設定からは求められない例である。

本講演では、上記の 1, 2 をともに満たす研究として、SubHalo Abundance Matching (SHAM) について取り上げる。

2 Methods

2.1 SHAM

DM シミュレーションの解析結果と観測結果の比較により、銀河の光度と Halo の質量には何らかの関係があると示唆されてきた。(Kravtsov et al. 2004) SHAM は、そのモデル化のために、Subhalo の内部に形成される銀河と Subhalo の周回速度に関係性を与え、DM シミュレーションの解析を行う手法である。具体的には、Subhalo が捕われている重力系の中心からの粒子の距離 r を用いて与えられる、周回速度 V_{cir} 以上の速度を持つ Subhalo の個数密度 $n_{\text{subhalo}}(> V_{\text{cir}})$ と、任意の光度 L 以上の銀河の個数密度 $n_{\text{galaxy}}(> L)$ に以下のある関係があるとして、Subhalo と銀河を直接結びつける。

$$n_{\text{subhalo}}(> V_{\text{cir}}) = n_{\text{galaxy}}(> L) \quad (1)$$

このようにして、最終的には DM シミュレーションから直接銀河の光度カタログを得られる。ただし、周回速度は周回軌道の範囲内に存在する質量 $M(< r)$ を用いて、 $V_{\text{cir}} = \sqrt{GM(< r)/r}$ と定義する。

さらに、次のように Subhalo 内の粒子の V_{cir} のうち最高の速度 V_{max} を選択することで、観測と合致するようなシミュレーション解析の結果が得られる (Conroy et al. 2006)。

$$V_{\text{max}} = \begin{cases} V_{\text{max}}^{\text{now}} (\text{Distinct}) \\ V_{\text{max}}^{\text{acc}} (\text{Satellite}) \end{cases} \quad (2)$$

“Distinct” は Halo 中心にいる Subhalo を意味している。また、“Satellite” は Halo の重力系に捕われている “Distinct” 以外の Subhalo をそれぞれ意味している。 $V_{\text{max}}^{\text{acc}}$ は Subhalo が Halo に取り込まれた時代の V_{max} であり、 $V_{\text{max}}^{\text{now}}$ はシミュレーションで見ている時期の V_{max} である。

このように V_{cir} を設定した結果を図 2 に示した。任意のスケールでの天球面上における銀河の分布の度合いを示す二点相関関数 w_p を比較している。実線が上記の SHAM で得た、点線は HOD で得た Subhalo の二点相関関数である。SHAM による結果が各等級区間で観測とよりよい一致をしていることがわかる。

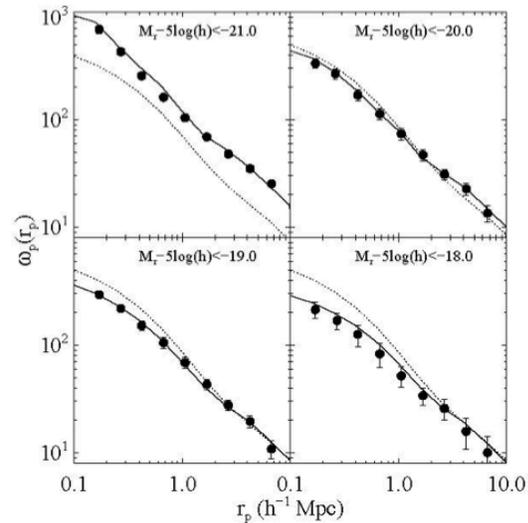


図 2: 各等級ごとに得られた二点相関関数と観測データ (SDSS) の比較 (Conroy et al. 2006)

2.2 Color dependence model

レビュー研究 (Masaki et al. 2013) は Subhalo の年齢 (Subhalo age) の効果を SHAM に加え、観測と合致する色ごとの銀河カタログを得ることを目的としている。ここではシミュレーションと解析の手法について述べる。

2.2.1 DM simulation

Tree-PM 形式の N 体シミュレーションコード *Gadget-2* (Springel et al. 2001b)(Springel. 2005) に、*WMAP* の観測により得られた宇宙論パラメータ値 (Komatsu et al. 2011) を与え、N 体シミュレーションデータを得る。次に、friends-of-friends(FOF) 法をシミュレーション結果に用いて、Halo カタログを得る。そして、*SubFind*(Springel et al. 2001a) を用いて、Halo カタログから Subhalo カタログを得ている。

2.2.2 Subhalo age

銀河の色は一般に銀河年齢を反映していると考えられていて、赤く見える銀河は高齢で(晩期型)、青く見える銀河は若い(早期型)とされる。そのため、重力進化の元である Subhalo の年齢と銀河の色には何らかの関係があることが考察される。Subhalo age の効果を SHAM に加え、色付きの銀河カタログを得るために、 V_{\max} について以下のように定義した。

$$V_{\max}(z = z_{\text{form}}) = f \times V_{\text{cir}}, (0 < f < 1) \quad (3)$$

$V_{\max}(z_{\text{form}})$ は Subhalo 形成時の V_{\max} である。これを線形外挿したものを $z = 0, 0.1$ での $V_{\max}^{\text{now}}, V_{\max}^{\text{acc}}$ とし採用している。式 3 より、Subhalo カタログから Subhalo age を加味した銀河カタログを得る。

2.2.3 Comparison and fitting

観測結果との比較のために、次のように定義した天球面上の二点相関関数 $w_p(R)$ を用いた。

$$w_p(R) = 2 \int_0^{\pi_{\max}} d\pi \xi(r = \pi^2 + R^2) \quad (4)$$

$\xi(r)$ は実空間での二点相関関数である。R は見かけ上の銀河間距離、 π は銀河間の奥行きを示す距離であり、等級の区分に対して観測より得られた値 π_{\max} (Zehavi et al. 2011) を用いている。また、各等級を次のように区分けした。

- $-22 < M_r - 5 \log_{10} h < -21$ (brighter)
- $-21 < M_r - 5 \log_{10} h < -20$ (intermediate)

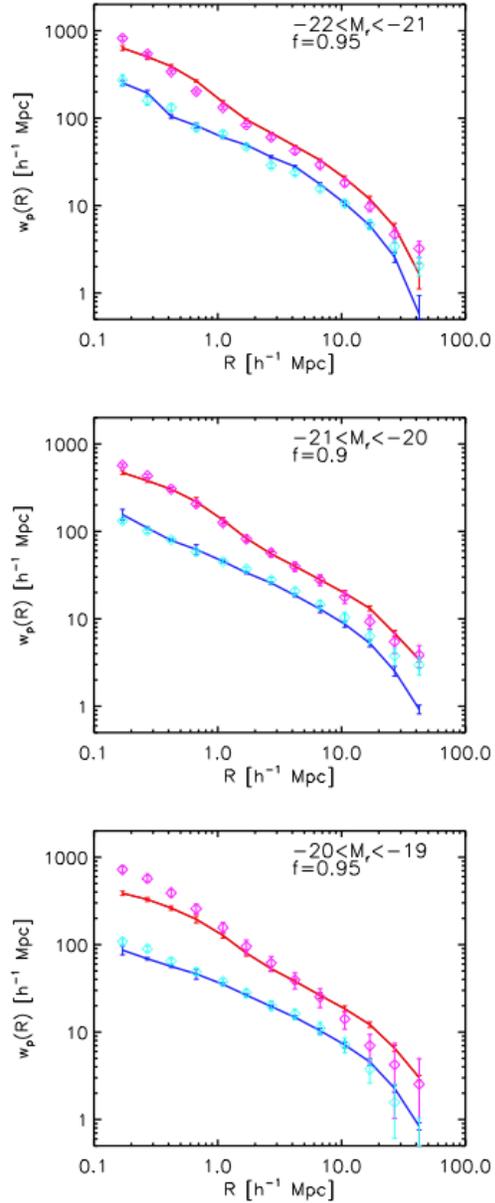


図 3: 等級、色ごとに得られた二点相関関数 w_p (実線) と観測データ (Zehavi et al. 2011)(点) の比較 (Masaki et al. 2013)

- $-20 < M_r - 5 \log_{10} h < -19$ (fainter)

ここで h は各銀河が持つハッブルパラメータであり、絶対等級は $h = 1$ で定義している。以後、簡単の為に絶対等級を M_r と略している。等級の区分が brighter なものには、早期型の銀河が多いであろう $z = 0.1$ の

シミュレーション結果に、その他の区分には中期・晩期型の銀河が多いであろう $z = 0$ のシミュレーション結果に対して解析を行った。フィッティングのために、次のような関係を用いて、等級から観測された銀河の色を識別している (Zehavi et al. 2011)。

$$(g - r) = 0.21 - 0.03M_r \quad (5)$$

g は G バンド、 r は R バンドでの銀河の等級をそれぞれ意味している。

V_{\max} の線形外挿の係数 f については、以下の値 0.6, 0.65, 0.7, 0.75, 0.8, 0.85, 0.9, 0.95 のうち、シミュレーション結果の補正係数 χ^2 が最小となるようなものを採用した。

$$\chi^2 = \chi_{\text{red}}^2 + \chi_{\text{blue}}^2 \quad (6)$$

なお、 χ_{red}^2 、 χ_{blue}^2 はそれぞれの色の銀河に対する w_p のフィッティング係数である。

3 Results

表 1: 等級と色ごとの z_{form} の平均値 (Masaki et al. 2013)

color	bright	intermediate	faint
red	1.23	2.44	2.09
blue	0.30	0.78	0.43

上記の設定を元にシミュレーション解析結果と観測結果を比較したところ、 w_p について、brighter, fainter では $f = 0.95$ 、intermediate では $f = 0.9$ がそれぞれ最適な結果となることがわかった。その結果を、図 3 に示している。一部、観測とのズレがあるが、色ごとの銀河カタログがそれぞれ観測と合致していることがわかる。

また、個々の Subhalo が形成された時代である z_{form} を色と等級ごとに平均化した値を表 1 に示した。赤いものは値が大きく、青いものは値が小さい。この結果は、先に述べた Subhalo age 効果を加味する際の考察と矛盾しないものである。

4 Conclusion

レビュー研究 (Masaki et al. 2013) では Subhalo age という、DM シミュレーションの結果から比較的簡単に得ることのできる、Subhalo の二次的情報を加味した SHAM 解析を行った。その結果、観測結果 (Zehavi et al. 2011) とよく合致する銀河の色カタログを得ることができた。また、観測から得られる w_p に最適フィッティングするような f に対する Subhalo の誕生時期 z_{form} を見積もることができた。この z_{form} は、Subhalo age 効果の元になった考察と矛盾しない。さらに、シミュレーション結果が観測結果によく一致しているため、SHAM は、観測対象となった実際の銀河が、平均的におおよそどれほどの年齢であるかの推定を行っていることになる。

5 Discussion

先述したように、SHAM は N 体シミュレーション結果から、少ないパラメータ設定により、実際の観測によく一致する結果を得ることができる非常に強力な解析手法である。上記の特性をふまえ、SHAM の活用として私は観測へのフィードバックを提言する。例えば、構造形成・銀河進化をより多角的に研究するために、SHAM から得られる、観測と合致する z_{form} のような情報をもとに観測対象を定めることが可能である。

Reference

- Masaki et al. 2013. arXiv:1301.1217v1 [astro-ph.CO]
 Komatsu et al. 2011. ApJS,192,18
 Seljak. 2000. MNRAS,318,203
 Quadri et al. 2008. ApJ,685,L1
 Kravtsov et al. 2004. ApJ,609,35
 Conroy et al. 2006. ApJ,647,201
 Springel et al. 2001. NewA,6,79
 Springel. 2005. MNRAS,364,1105
 Springel et al. 2001. MNRAS,328,726
 Zehavi et al. 2011. ApJ,736,59