

Simulating Anisotropic Clustering of LRGs with Subhalos

岡 アキラ (東京大学大学院 理学系研究科)

Abstract

銀河クラスタリングに観測されるバリオン音響振動 (BAO; 100[Mpc/h]) は、視線方向とそれに垂直な方向での距離測定が異なる宇宙論パラメータに依存するため、宇宙論の仮定の誤りにより非等方性が生まれる (AP 効果)。また、分光サーベイにより得られる銀河のパワースペクトルは、銀河自身の持つ特異速度場の影響で非等方性を帯びる (Redshift-Space Distortion; RSD)。その非等方性の強さは、大スケールでは密度ゆらぎの重力的な成長率と密接に関係しており、BAO の観測を組み合わせることで宇宙論的スケールでの重力理論の検証が可能となる。ただし、銀河サンプルから宇宙論的な情報を得るためには、理論で予言されるダークマター (DM) と観測される銀河の間の関係の理解が不可欠である。そこで、本研究では、DM 粒子の N 体シミュレーションから作られたハロー・サブハローカタログをもとに、Sloan Digital Sky Survey II DR7 Luminous Red Galaxy (LRG) の非等方パワースペクトルの多重極成分 (P0,P2,P4) を再現するカタログを得るための条件を調べた。

1 Introduction

近年の観測機器の目覚ましい発展に伴い、我々の宇宙が加速膨張している、という驚くべき事実が明らかとなった (2011 年ノーベル物理学賞)。この加速膨張の起源を解明することは、現代の宇宙論分野において、主たる課題の一つである。

加速膨張は、Einstein 重力の下で通常のエネルギー成分に加えてダークエネルギーを考慮するか、あるいは、Einstein-Hilbert 作用を適切に変更することで実現することができる。したがって、加速膨張起源の解明に向け、まずは重力理論を宇宙論スケール ($>Mpc$) で検証することが重要な課題である。以下に説明するように、重力理論の宇宙論的検証は、銀河クラスタリングの非等方性の解析を行くことによるのみ可能となる。

銀河分布には、二点統計量で特徴付けられるクラスタリングパターン (二点相関関数およびそのフーリエ変換であるパワースペクトル) に、最終散乱面 ($z \sim 1000$) 付近で刻まれた密度ゆらぎのバリオン音響振動 (BAO) の名残が観測されている。この BAO は $\sim 100[Mpc/h]$ の標準ものさしとして利用できる。分光サーベイにより得られた銀河分布は、その赤方偏移によって視線方向の位置を決定されるが、測定された BAO の見込み角、および、赤方偏移から共

同距離に変換する際に仮定した宇宙論パラメータと真の宇宙論パラメータが異なることによって、元来球対称であるべき BAO に見かけの非等方性が生じ (AP 効果; e.g., Alcock & Paczynski (1979))、したがって、銀河クラスタリングにも非等方性が生じる。

一方で、クラスタリングの非等方性は銀河の視線方向の特異速度によっても引き起こされる (RSD; e.g., Kaiser (1987))。銀河の特異速度は局所的な重力ポテンシャルに従って獲得されるため、RSD の非等方性の強さは重力の情報をもたらす。したがって、分光サーベイにより得られた銀河のクラスタリングパターンに刻まれた非等方性を精密に解析することで、BAO から宇宙膨張の、RSD から重力の情報を同時に引き出すこと、すなわち、重力理論の宇宙論的検証が可能となる。

しかし、バリオン物理が複雑になる銀河形成や銀河進化の精密なモデルは未だ存在しないため、銀河のクラスタリングパターンを精密に予言することは難しい。一方で、宇宙の物質成分の大部分を占めるダークマター (DM) の重力進化に関しては、信頼に足る解析計算および数値計算の手法が確立している。したがって、銀河クラスタリングを解析する際には、DM のパワースペクトル (あるいは二点相関関数) を計算し、DM のパワースペクトルと銀河のパワース

パワースペクトルの統計的な差異 (銀河バイアス) を経験的にモデル化することによって、データと理論を突き合わせられる。ここで、銀河バイアスのモデル化が、理論の不定性を支配している。すなわち、銀河バイアスの不定性をいかに取り除くか、が精密な検証に必須である。

本研究で提案された手法は一般の分光サーベイ銀河サンプルに適用可能だと考えられるが、その方法論ゆえ、非等方パワースペクトルが得られている銀河サンプルについてのみ議論を進める。ここで用いる銀河サンプルは、視野 10,000 平方度、赤方偏移 0.5 に渡る大規模測光・分光サーベイである Sloan Digital Sky Survey (SDSS) により提供されている Luminous Red Galaxy (LRG) である。LRG は、本研究で着目したい非等方パワースペクトル (ルジャンドル展開の係数 ($l = 4$ まで); P_0, P_2, P_4) が測定されている、論文執筆当時では唯一のサンプルである (Yamamoto et al. 2010)。さらに、その広大なサーベイ体積ゆえに大規模構造を探る上で非常に有用なサンプルであり、これまで多くの宇宙論解析に用いられ、したがって、LRG のバイアスについての議論も多く行われてきた。LRG サンプルは、サンプルのうち 95% もの LRG が周囲に LRG を伴わず単独で存在するため、ダークマターハローの中心と対応していると考えられていた。しかし、非等方性を解析する上では RSD を引き起こす特異速度が重要であり、ハロー中心の速度とハロー中心の周りをランダム運動している天体の速度では、速度構造が大きく異なると予想されるため、ハロー中心と LRG との対応関係を、非等方パワースペクトルの観点から見直すことは重要である。

本研究 (Nishimichi & Oka 2013) では、LRG の非等方パワースペクトル (P_0, P_2, P_4) を再現するようなハローおよびハロー中のより局所的な重力束縛系であるサブハローが満たすべき条件を明らかにすることで、LRG の速度構造を含むバイアスに関する知見を得ることを目的とする。ハロー・サブハローが銀河を保有するには、十分な重力ポテンシャルが必要であるという物理的推察から得られる仮定の下、大規模シミュレーション中のハロー・サブハローサンプルに対して、質量しきい値を設け、その質量しきい値以上のものを模擬 LRG とし、模擬 LRG の非等

方パワースペクトルを観測データ (Yamamoto et al. 2010) と比較する。結果として、 N 体シミュレーションを用いて LRG の非等方パワースペクトルを再現するには、ハローの中心に LRG を対応付けるだけでは不十分であることを明らかにし、さらに、サブハローと LRG を対応付けることで非等方パワースペクトルを再現できることを示した。

本集録では、ページ数の制約から、サブハローの重要性に重点をおいた議論を展開するが、本研究は根源的動機の一つである重力理論の宇宙論的検証への応用可能性についても議論を広げており、シミュレーションデータを理論テンプレートとして活用できる可能性を示した。その他の結果に関する詳細は論文 (Nishimichi & Oka 2013) を参照されたい。

2 Methods

ここでは、Yamamoto et al. (2010) によって得られた LRG の非等方パワースペクトル (P_0, P_2, P_4) を再現するような、ハロー・サブハローカタログの満たすべき条件を求める。宇宙論的 N 体シミュレーションによって、DM 粒子の非線形重力進化を解き、DM 粒子の分布からハローとサブハローのカタログを作成する。シミュレーションデータは、パブリックコードの GADGET-2 を用いて実行された、Nishimichi & Taruya (2011) のものを使用した。ハロー・サブハローの同定には、それぞれ FoF アルゴリズム、SUBFIND アルゴリズムを適用した。

こうして得られたハロー・サブハローカタログをもとに、以下のアルゴリズムで模擬 LRG カタログを作成する。

1. ハローの質量しきい値 ($M_{\text{halo,min}}$) を与え、しきい値を越えるハローのみ取り出す。
2. 過程 1 でしきい値を上回ったハロー中のサブハローに対して、最も質量が重たいものをセントラル、それ以外をサテライト、とラベル付けする。
3. サブハローの質量しきい値 ($M_{\text{sub,min}}$) を与え、しきい値を越えるサブハローのみ取り出す。
4. 残ったサンプルに対して非等方パワースペクトル (P_0, P_2, P_4) を測定する。

ここで、過程 2 は結果に影響を与えないが、後の議論のために必要となる。セントラルは位置・速度ともにハロー中心と非常に似ている。一方で、サテライトは、ハロー中心周りをランダム運動する種族であり、セントラルサブハローと性質が大きく異なる。これらの過程を実行する度に、観測データとの適合度合いをカイ二乗、

$$\chi^2 \equiv \sum_{\ell=0,2,4} \sum_{k < k_{\max}} \left[\frac{P_{\ell, \text{mock}}(k) - P_{\ell, \text{obs}}(k)}{\Delta P_{\ell, \text{obs}}(k)} \right]^2 \quad (1)$$

で評価する。ここで、 $P_{\ell, X}$ は、それぞれ模擬 LRG(mock)、観測データ (obs) の非等方パワースペクトルである。 $\Delta P_{\ell, \text{obs}}$ は観測データに付随する誤差である。これをマルコフ連鎖モンテカルロ (MCMC) 法で繰り返し行い、カイ二乗を最小にするカタログを探す。ここで、サブハローの重要性を調べるために、いくつかのモデルを定義する。

1. サブハローを一切用いない。ハローの質量しきい値 ($M_{\text{halo}, \text{min}}$) のみをパラメータとする。すなわち、過程 1 と過程 4 のみを繰り返す。
2. サブハローを用いる。ハローの質量しきい値 ($M_{\text{halo}, \text{min}}$) およびサブハローの質量しきい値 ($M_{\text{sub}, \text{min}}$) をパラメータとする。

さらに、模擬 LRG の位置および速度を、シミュレーションデータにどのように対応づけるか、という不定性が残っている。ここでは、我々の解析結果が恣意的なサンプリングによるものではないことを主張するために、二つの対応関係をそれぞれ調べる。

- a. ハロー・サブハローの重心および重心速度を模擬 LRG の位置および速度とする。
- b. ハロー・サブハロー中の DM 粒子のうち、最も強い重力ポテンシャルを感じているものの位置および速度を模擬 LRG の位置および速度とする。

したがって、我々が調べるモデルは計四種類である。それらを、Model 1b などと呼ぶ。

3 Results

前章の結果を表 1 および図 1 にまとめる。表からも図からも、サブハローなしでは、 P_0, P_2, P_4 を同時に精度よく再現することができないことがわかる。特に、 P_2 におけるモデル間の差異が大きく、これはハロー内部のサブハローの固有運動が非等方性を担っていることを示唆している。さらに、模擬 LRG とハロー・サブハローの対応関係 (a および b) によらずに、サテライトが 20-30% 必要であることを明らかにした。

4 Discussion and Conclusion

宇宙論パラメータを制限する目的で広く用いられてきた、SDSS LRG サンプルの生息環境を理解する目的で、宇宙論的 N 体シミュレーションによって作成されたハロー・サブハローカタログを調べた。LRG はこれまで、ハロー中心と一対一の対応関係があると信じられてきたが、クラスタリングの非等方性の観点からそれが誤りであることを指摘した。また、ハロー中心の周りをランダム運動するサテライトは、モデルによらず必要で、その割合は全体の 20-30% 程度であることも明らかにした。

また、紙面の都合上、説明は Nishimichi & Oka (2013) に譲るが、我々の手法のロバスト性を主張するために、ここで述べたモデル以外に、セントラルとサテライトで質量しきい値を変える場合、や、セントラルをランダムに捨てることによってサテライトの割合を実効的に変える場合についても調べた。その全てが、非等方クラスタリングを理解するためには、サブハローの存在が本質的に重要であることを示唆している。その上、我々は P_0, P_2, P_4 を説明することのみを要請してカタログを作成したにも関わらず、Multiplicity 関数まで同時に再現に成功したことは特筆に値する。Nishimichi & Oka (2013) では、さらに、HOD と P_0, P_2, P_4 を同時に再現するカタログの作成法や、宇宙論パラメータをシミュレーションデータから直接制限することができることを論じた。

これらの一連の手法は、銀河が重力ポテンシャルの局所ピーク付近に形成しやすい、という物理的な仮定にのみ基づいており、したがって、今後の分光

表 1: それぞれのモデルのベストフィットパラメータおよびカイ二乗。 n_g は LRG の数密度である。 f_{sat} は全模擬 LRG 中サブハローに保有されている模擬 LRG の割合を示す。 1σ は f_{sat} の 1σ の誤差である。また、カイ二乗は、それぞれの P_ℓ についてのカイ二乗と、合計したものをパラメータの数で割った χ_{red}^2 を記載する。

Model	$M_{\text{host,min}}$	$M_{\text{sub,min}}$	n_g	f_{sat}	$\pm(1\sigma)$	$\chi_{0,\text{min}}^2$	$\chi_{2,\text{min}}^2$	$\chi_{4,\text{min}}^2$	χ_{red}^2
1a	2.50	-	1.28	0	-	109.2	916.8	27.1	11.8
1b	2.70	-	1.16	0	-	119.0	656.5	34.6	9.10
2a	1.29	0.211	4.07	0.300	$^{+0.017}_{-0.012}$	48.0	28.4	27.8	1.18
2b	1.45	0.299	3.30	0.248	$^{+0.015}_{-0.010}$	31.2	28.7	30.7	1.03

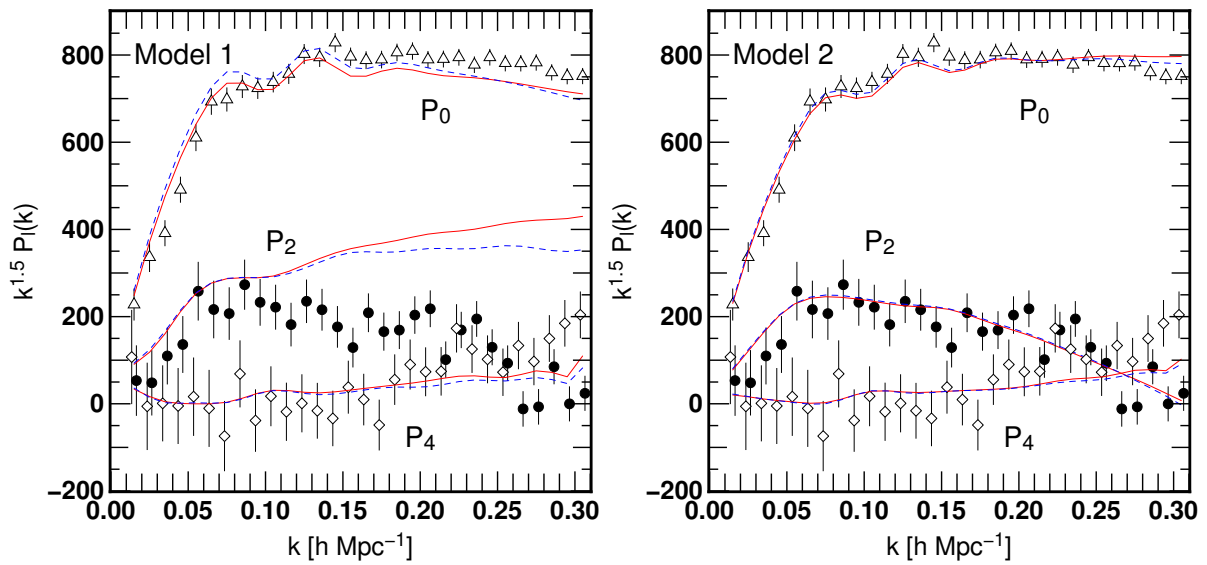


図 1: 上: Model 1(サブハローなし) のベストフィット。下: Model 2(サブハローあり) のベストフィット。両者を見比べると、特に、 P_2 の違いが顕著である。Model 1(サブハローなし) では再現できない LRG の非線形な速度構造を、Model 2(サブハローあり) を用いることで、ある程度再現できることを示している。(Nishimichi & Oka (2013) より引用)

サーベイ銀河サンプルにも適用可能であると期待できる。

Acknowledgement

夏の学校参加に際して、旅費および参加費用を補助して下さった須藤靖教授に深く感謝する。

Reference

- C.Alcock and B.Paczynski, 1979, Nature, 281, 358
- N.Kaiser, 1987, MNRAS, 227, 1
- K.Yamamoto et al., 2010, Phys. Rev. D 81, 103517
- T.Nishimichi and A.Oka, 2013, arXiv:1310.2672
- T.Nishimichi and A.Taruya, 2011, Phys. Rev. D 84, 043526