

国立天文台 天文学データ解析計算センター  
成果報告書 (平成 16 年度)

応募カテゴリ B

システム VPP

プロジェクト ID: rik06b

研究代表者 (現在のユーザ ID : kayois )

氏名	加用 一者
所属機関名	名古屋大学理学部
連絡先住所	〒 464-8602 名古屋市千種区不老町名古屋大学理学部物理学科 At 研
電話番号	052-788-6193
E-mail	kayo@a.phys.nagoya-u.ac.jp
職または学年	研究員 (COE)
研究代表者が学生の場合には指導教官の氏名	

研究課題名

(和文)	SDSS 銀河・クエーサーの空間バイアスモデル構築のための光円錐 N-body simulation catalogue
(英文)	Light-cone N-body catalogues for constructing bias models of SDSS galaxies and quasars

研究分担者

氏名	所属機関名	E-mail	ユーザ ID
須藤 靖	東京大学理学部物理学教室	suto@phys.s.u-tokyo.ac.jp	sutoys
吉田 直紀	名古屋大学理学部物理教室	nyoshida@a.phys.nagoya-u.ac.jp	yoshdank
日影 千秋	名古屋大学理学部物理教室	hikage@a.phys.nagoya-u.ac.jp	hikageca
矢幡 和浩	東京大学大学院理学系研究科	yahata@utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp	yahatakz
Yipeng Jing	上海天文台	ypjing@center.shao.ac.cn	jingyn

## 成果の概要

### 光円錐効果を取り込んだ N 体シミュレーションカタログの完成

日米独共同のスローンデジタルスカイサーベイ (SDSS) は、さらに韓国、イギリスを共同研究に加え観測を進行中であり、データ公開も Date Release 4 まで着実に重ねている。この状況下で我々は、観測において必然的に入り込む、観測領域の形状、銀河の特異速度による赤方偏移空間歪み、銀河光度分布による選択効果、サーベイ領域内でのゆらぎの進化 (光円錐効果) を、系統誤差、あるいは情報として正確に見積もることを目的として、N 体シミュレーションデータセットの作成を行った。平成 15 年度と平成 16 年度のプロジェクにより、以下の特徴を持つデータセットを完成させた。

- Cold Dark Matter (BBKS initial power spectrum) in  $\Omega_m = 0.3, \Omega_\Lambda = 0.7$  cosmology
- 粒子数 :  $512^3$
- ボックスサイズ : 300, 600, および 1000 Mpc/h
- 質量分解能 :  $10^{10-12} M_\odot$
- スナップショット出力に加え光円錐出力も生成
- 各々 3 realizations

さらに極最近、バリオン振動による効果を銀河サーベイで検出するという議論が活発になされている。SDSS や、FMOS などでの検出可能性について実証的検討を行うため、バリオン振動を含む初期パワースペクトルによる、 $512^3$  の粒子数、ボックスサイズ 1000Mpc/h のデータを 1 realization 生成した。

### SDSS 銀河 3 点相関解析

WMAP の CMB 観測により、宇宙の初期密度揺らぎはガウス分布と無矛盾であることが示された。しかし、現在の銀河分布は明らかに非ガウス性を有している。つまり、構造形成においてもっとも重要だと思われる重力進化こそが、銀河分布に非ガウス性を生んでいるということである。ところが、構造解析に広く用いられている 2 点相関関数やパワースペクトルは、非ガウス性の検出には全く無力である。よって 3 点以上の統計量が必然的に重要になる。また、大規模構造に見られる、フィラメント構造などの非等方的な構造を特徴付けるのにも 3 点相関関数は有効であると考えられている。さらに、銀河バイアスを実測する、という観点からも 3 点相関関数は大変有効な統計量である。

我々は、SDSS 銀河サンプルを用い、3 点相関関数を測定した。特に、銀河バイアスに注目して、種々の銀河の性質 (形態、色、絶対光度) ごとに 3 点相関関数を求めることに初めて成功した。歴史的には、3 点相関関数を 2 点相関関数の自乗で割った量  $Q$  用いることが多いので我々もその流儀にしたがったが、我々は  $Q$  が三角形の大きさ、形にあまりよらずにほぼ 0.5 ~ 1.5 程度の定数で表されることを見出し、さらに、 $Q$  の大きさは銀河の種々の性質によらないことも発見した。銀河バイアスは線形であると仮定されることが大変に

多いが、仮に線形であるとする、 $Q$  も銀河の種々の性質に依存するはずである。即ち、我々の結果は銀河バイアスが線形では矛盾することを示しており、今後の銀河バイアスの議論への大きな示唆を与えることとなった。

また、本解析では、対象とする三角形を全てもれなく数え上げることが可能となるよう、並列化や最適化が施された解析コードを開発した。このことにより、重要な統計量と考えられていられながら、計算コストのために研究が進んで来なかった多点相関解析への研究が、大きく進展すると期待される。

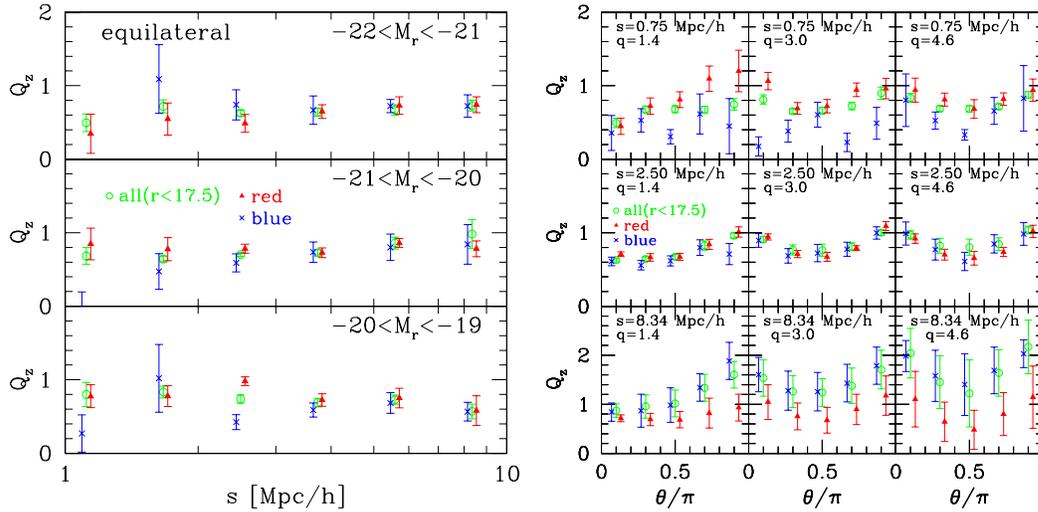


図 1: (左) 正三角形の場合の  $Q$ 。絶対光度、銀河の色依存性が大変弱いことが示されている。(右) 三角形の形への依存性

- (セミナー) Issha Kayo, “3PCF of the SDSS galaxies”, University of Pittsburgh, Mar. 2004
- (論文) Issha Kayo, Yasushi Suto, Robert C. Nichol, Jun Pan, Istvan Szapudi, Andrew J. Connolly, Jeff Gardner, Bhuvnesh Jain, Gauri Kulkarni, Takahiko Matsumbara, Ravi Sheth, Alexander S. Szalay, and Jon Brinkmann  
“Three-point Correlation Functions of SDSS Galaxies in Redshift Space: Morphology, Color and Luminosity Dependence”  
PASJ, 56, 415, 2004
- (学会) 加用 一者 「SDSS 銀河 2 点相関関数-形態 / 光度依存性とバイアスの進化」日本天文学会 2004 年春季年会
- (学会) 加用 一者 「SDSS 銀河のクラスタリング」日本天文学会 2004 年秋季大会

### 3 点相関関数への赤方偏移歪みの効果

しかしながら、銀河サーベイの観測データは赤方偏移を距離指標としているため、銀河の固有運動が距離の見積りに影響を及ぼす (赤方偏移歪み)。上記の SDSS 銀河の解析も

例外ではない。この赤方偏移歪みの効果は、2点相関関数に関しては、理論的に線形領域についてはほぼ解明されており、非線形領域についても、精度の良いモデルが提案されている。測定した2点相関関数から赤方偏移歪みの効果を取り除く方法論も、ほぼ確立している。しかし、3点相関関数に関しては、線形領域における理論しか存在しておらず、実際の測定から赤方偏移歪みを取り除く方法も知られていない。Matsubara & Suto (1994) は、N体シミュレーションを用いて、赤方偏移歪みが3点相関関数に大きく影響を及ぼすことを明らかにした。特に、 $Q$  がほぼ定数になるのは、赤方偏移歪みの影響によるものであることを示した。しかしながら、彼らのシミュレーションは分解能が不十分であり、3点相関関数がシミュレーションボックスのサイズに大きく影響を受けたり、特に興味のある  $1 \sim 10 \text{Mpc}/h$  あたりの振るまいが不鮮明であった。そこで、本プロジェクトで生成した高分解能N体シミュレーションデータを、高速な3点相関解析コードで再解析した。

図2左は、3点が正三角形の場合の $Q$ を、三角形の大きさに対してプロットしたものである。実空間では強いスケール依存性を示す $Q$ が、赤方偏移空間ではほぼ定数に、しかも1という値を取ることが明確に示されている。また、本プロジェクトでは複数のシミュレーションボックスサイズのデータを生成していたことを利用して、ボックスサイズによる影響が存在せず、測定がrobustであることを確認した。

さらに、赤方偏移歪みの非線形バイアスに対する影響も調べた。SDSS銀河の解析では、バイアスの非線形性が重要であると結論したが、この結論も赤方偏移歪みの影響を受けている可能性があるからである。そのため、高分解能N体シミュレーションデータから、重力的に束縛されたダークマターの塊(ダークハロー)を同定し、これらの3点相関関数を計算して、バイアスの非線形成分を取り出した。この非線形成分の、実空間と赤方偏移空間での差を示したのが図2中と右である。これにより、赤方偏移歪みは確かにバイアスに影響を及ぼすが、非線形成分の大きさを大きく変えることはないことがわかった。さらに理論モデルの構築などの発展が期待される。

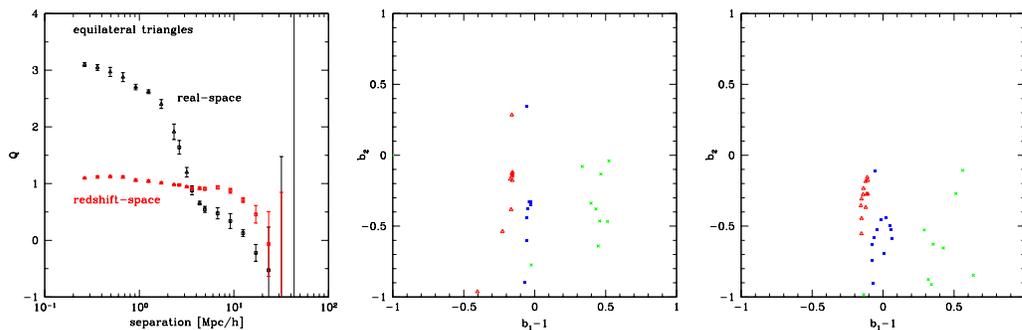


図 2: (左) 正三角形の場合の  $Q$ 。(中) 実空間におけるダークハローのバイアス。 $b_1$  は線形成分、 $b_2$  は非線形成分を表す。赤は  $M > 2 \times 10^{11} M_{\odot}$ 、青は  $M > 2 \times 10^{12} M_{\odot}$ 、緑は  $M > 2 \times 10^{13} M_{\odot}$  のダークハロー (右) 赤方偏移空間におけるダークハローのバイアス。

- (研究会) 加用 一者, “Redshift distortion effect on 3-point correlation function”, 理論懇シンポジウム、東京大学、2004 年 12 月
- (研究会) Issha Kayo, “Redshift distortion effect on 3-point correlation function”,

### SDSS クェーサー 2点相関解析

SDSS クェーサーサンプルは、数密度は大変に小さいが、巨大な体積を有するので  $100\text{Mpc}/h$  のオーダーでの相関解析が可能である。このスケールには、バリオン振動に起因する特徴的な相関関数の盛り上がり (baryon bump) が予言されており、baryon fraction、 $\Omega_\Lambda$ 、ダークエネルギーの状態方程式  $w$ 、に関する情報が得られると期待される。我々はSDSS クェーサーに関して初めての相関解析を行い、赤方偏移空間で  $10h^{-1}\text{Mpc} < s < 1h^{-1}\text{Gpc}$  の2点相関関数を得た (図3左)。用いたデータは Data Release 3 のクェーサーサンプル 20303 個 (redshift レンジ  $0.16 \leq z \leq 2.24$ ,  $15.0 \leq m_i \leq 19.1$ ) である。

数密度が小さいために、baryon bump は観測されなかったが、大スケールでの相関関数のゼロ点の交差を観測することが出来た。このゼロ点の交差するスケールはやはり、 $\Omega_b$  に依存するので、この特徴を用いて  $\Omega_m$  と  $\Omega_\Lambda$  に制限を与えた (flat を仮定)。その結果、 $2\sigma$  の幅で  $0.63 - 3.4\Omega_b < \Omega_\Lambda < 0.97 - 1.8\Omega_b$  という結果を得ることが出来た (図3右)。

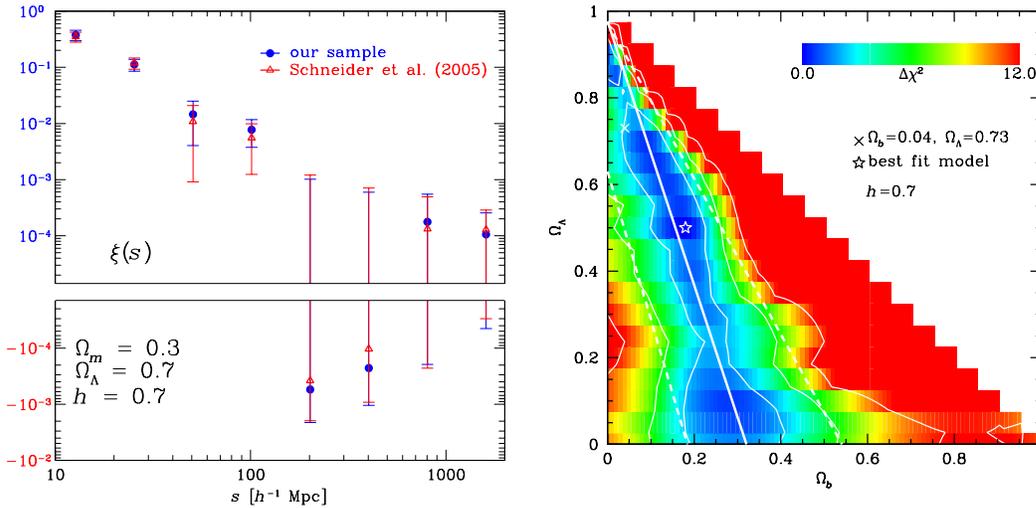


図 3: (左) 測定した 2 点相関関数 (右)  $\Omega_b, \Omega_\Lambda$  に対する制限

- (セミナー) Kazuhiro Yahata, “2PCF of the SDSS quasars”, University of Pittsburgh, Mar. 2004
- (学会) 矢幡 和浩 「SDSS クェーサー 2 点相関関数の赤方偏移・光度依存性」日本天文学会 2004 年春季大会
- (研究会) Kazuhiro Yahata, “QSO clustering”, SDSS collaboration meeting, Pittsburgh, Sep. 2004
- (学会) 矢幡 和浩 「SDSS クェーサーで探る宇宙の大規模構造」日本天文学会 2004 年秋季大会

- (論文) Kazuhiro Yahata, Yasushi Suto, Issha Kayo, Takahiro Matsubara, Andrew Connolly, Daniel Vanden Berk, Ravi Sheth, Istvan Szapudi, Scott F. Anderson, Neta Bahcall, Jon Brinkmann, Istvan Csabai, Xiaohui Fan, Jon Loveday, Alexander S. Szalay, and Donald York  
“Large Scale Clustering of Sloan Digital Sky Survey Quasars: Impact of the Baryon Density and the Cosmological Constant”  
投稿中
- (修士論文) 矢幡 和浩 “The large-scale Structure of SDSS quasars and its cosmological implication” (東京大学理学系研究科)

### 宇宙大構造のミンコフスキー汎関数解析

1980年代の銀河の赤方偏移サーベイ CfA 以来、宇宙の銀河分布は、泡状の構造をなしており、また、100Mpc に及んで銀河が連なるグレートウォールと呼ばれる大スケールの構造があることもわかってきた。このような銀河分布の構造は、宇宙初期の密度ゆらぎの情報を反映しており、またその後の重力進化によって大きく変わるので、宇宙モデルを制限するのに有効な情報と考えられる。しかし、こうした分布の構造の性質は、伝統的な統計手法である2点相関関数では、十分な情報を引き出せない。そこで、構造の形状を定量的に特徴づける指標であるミンコフスキー汎関数を使い、宇宙大構造の定量的解析を行った。3次元構造を特徴づけるミンコフスキー汎関数は、体積 ( $V_0$ )、表面積 ( $V_1$ )、平均曲率 ( $V_2$ )、そして、トポロジーを特徴づけるオイラー数 ( $V_3$ ) の4つがある。これら全てを銀河分布の等密度面に対して測り、密度の関数として計算した。いくつかの異なる宇宙モデルに基づくN体シミュレーションから作った擬似サンプルと比較した結果、標準的な宇宙モデルである、宇宙項入りの冷たい暗黒物質モデル (LCDM) の予測と矛盾しないことがわかった (図4 参照)。

- Chiaki Hikage, Jens Schmalzing, Thomas Buchert, Yasushi Suto, Issha Kayo, Atsushi Taruya, Michael S. Vogeley, Fiona Hoyle, J. Richard Gott III, and Jon Brinkmann  
“Minkowski Functionals of SDSS galaxies I: Analysis of Excursion Sets”  
PASJ, 55, 911, 2003

### SDSS 銀河分布のフーリエ位相解析

宇宙背景放射の温度ゆらぎや銀河の個数密度ゆらぎを含む密度ゆらぎは、様々なスケールの波の重ね合わせで一般に書き表すことができる。波は、振幅と位相の2つの情報を持つが、そのうち振幅については、振幅値の2乗期待値で定義されるパワースペクトルと呼ばれる統計量によって、これまで様々な場に応用され、よく研究されてきた。一方、位相については、位相値そのものを扱わず、振幅と位相の両方に依存する高次の統計量から間接的に調べられてきた。というのは、位相値は、0 から  $2\pi$  の循環性や、場の原点の位置に依存する性質を持っているため、位相値を扱うのは困難であったからである。

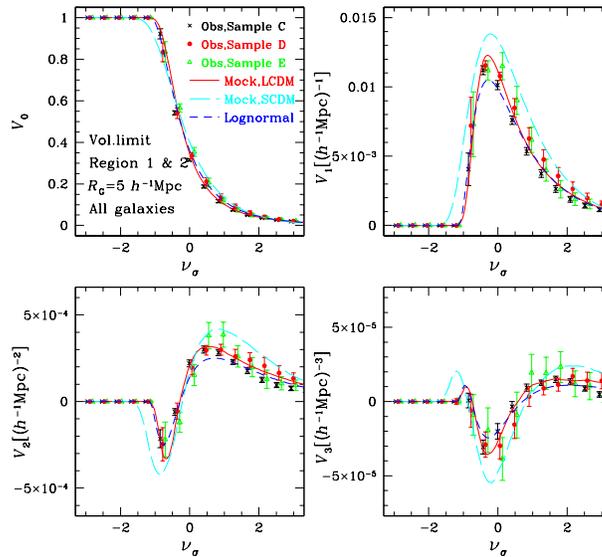


図 4: SDSS 銀河サンプルのミンコフスキー汎関数と異なる宇宙モデルに基づく N 体シミュレーションから作った擬似サンプルや経験的な解析モデルの予測との比較

最近になり、異なるスケールの波の位相値の和の確率分布関数から、位相同士の相関を調べる新しい統計手法が開発された (松原 2003, ApJL, 591, 79)。振幅にはよらない、純粹に位相だけの統計手法であるため、パワースペクトルとは、統計的に独立な観点からゆらぎの性質を調べることができる。N 体シミュレーションを用い、非線型な重力進化によって生じる位相相関のふるまいを、位相和の分布関数を通して調べた (図 5 参照)。また、実際の SDSS 銀河サンプルに対して初めて応用した結果、位相情報という観点からも、標準的な宇宙モデルである LCDM モデルの理論予言と矛盾しないことがわかった。

- (研究会) Chiaki Hikage, “Fourier-phase methods”, SDSS collaboration meeting, Pittsburgh, Sep. 2004
- (論文) Chiaki Hikage, Jens Schmalzing, Thomas Buchert, Yasushi Suto, Issha Kayo, Atsushi Taruya, Michael S. Vogeley, Fiona Hoyle, J. Richard Gott III, and Jon Brinkmann  
“Minkowski Functionals of SDSS galaxies I: Analysis of Excursion Sets”  
PASJ, 55, 911, 2003

### Luminosity-unbiased statistical method for flux-limited samples

銀河の赤方偏移サーベイから得られるデータサンプルは、見かけの等級に制限がかかっており、銀河の光度に応じて観測できる赤方偏移の範囲が異なる。クラスタリングの解析は、光度分布が均質なサンプルに対して行うべきものなので、通常は、ある光度幅の銀河に対して均質な分布をもつように赤方偏移の範囲を制限した volume-limited sample を作る。しかし、サンプルの均質性を保つ代償として、制限した赤方偏移の範囲から外れた銀

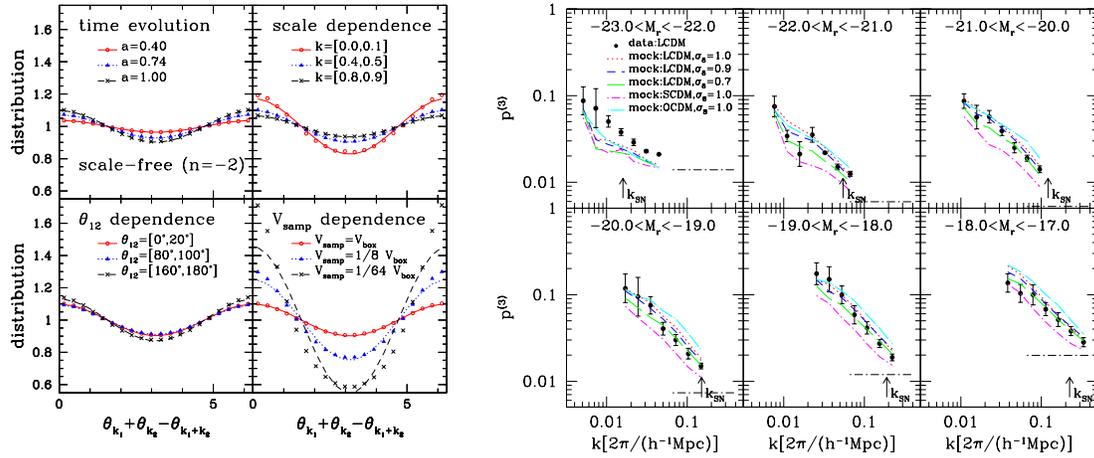


図 5: 左図: 質量分布 (指数  $-2$  の冪則スペクトルを初期条件にもつ) に対する位相和の分布関数の時間進化、スケール依存性、波数ベクトルのなすトライアングルの形状依存性、ボックス体積の依存性。右図: SDSS 銀河分布の位相相関と異なる宇宙モデルに基づく擬似サンプルの位相相関との比較

河が数多く出てくる。例えば、等級幅 1 の volume-limited sample を作る場合には、2 割から 5 割もの銀河がサンプルの対象から外れてしまい、統計精度を落してしまう。そこで今回、2 点相関関数によるクラスタリング解析において、銀河光度による観測範囲の違いを考慮した適切な重みをかけることで、サンプルの均質性を保ちつつデータを全て活用し、観測データを無駄無く利用する方法を開発した。

2 点相関関数は、距離  $r$  離れた銀河ペアの数が、一様ランダムな分布のペア数に比べて、どれだけの割合で多いか少ないかを  $r$  の関数として表したものである。これまで、一様分布のペア数は、銀河ペアの光度によらず同じものとして計算していた。しかし、flux-limited sample においては、銀河の光度に応じて観測範囲が変わるので、各銀河ペアごとに一様分布を仮定した場合のペアの数も変えて計算する必要がある。ただ、一様分布のペア数を計算するのに、従来のように、数多くランダムに振った粒子ペアの数を計算する方法をとると、計算時間のオーダーは、(銀河数) $^2 \times$ (ランダム粒子数) $^2$  となり、現実的な計算量ではない。そこで、従来の粒子法を用いず、ペアが掃く体積をペアの光度の関数として前もって解析的に計算しておくことで、計算時間を(銀河数) $^2$  のオーダーに抑える方法を開発した。N 体シミュレーションを用いて上記の方法をテストした結果、従来の粒子法の結果と矛盾せず、かつ、volume-limited sample を使った場合よりも統計精度の高い結果が得られることがわかった。

### Alcock-Paczynski テスト

宇宙の幾何的構造を測る方法で、概念的にもっとも簡単なものの一つは、遠方に存在する丸いオブジェクトがどう歪んで見えるかを調べることであろう(いわゆるアルコック・パチンスキーテスト)。これまでに大規模構造のボイドなどを用いて挑戦されたりしたが、こ

のような通常の天体構造であると、構造が本当に丸いのが不明であり、さらに天体そのものの運動の不定性のために精度良く測ることは出来なかった。しかし、最近 Matsubara (2004) は、バリオン振動の存在により宇宙大規模構造に特徴的な丸い構造が現れることを示し、しかもその形は天体の特異速度の影響を受けないことを指摘した。つまり、バリオン振動による構造はアルコック・パチンスキーテストの理想的な構造なのである。実際極最近、バリオン振動の存在を SDSS 銀河 (Luminous Red Galaxy と呼ばれる種類の、比較的高赤方偏移  $z \sim 0.3$  に分布する銀河) の相関関数から検出した ( $3.4\sigma$ ) という報告がなされている (Eisenstein et al. 2005; astro-ph/0501171)。

我々は彼らの解析をさらに推し進め、Matsubara (2004) で予言される 2 次元構造の検出を目指している。SDSS の Luminous Red Galaxy を用い解析を進展中である (図 6 左)。また、次期の赤外分光器 FMOS を用いた高赤方偏移サーベイについても、ダークエネルギー状態方程式の制限の可能性などについて議論中である。本プロジェクトで生成したバリオン振動入りの高分解 N 体シミュレーションを用い、実証的な検証を行っている (図 6 右)。平成 17 年度申請中のプロジェクトは、主にこの baryon ridge に着目したプロジェクトとする予定である。

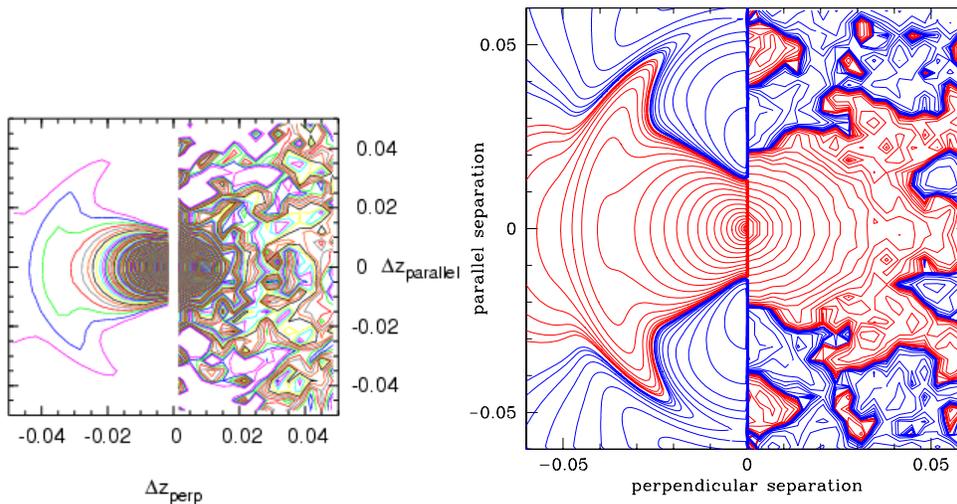


図 6: (左)SDSS LRG から測定された 2 次元 2 点相関関数 (右) $z = 1$  において期待される baryon ridge。各々、左側が Matsubara(2004) の線形理論による予言、右側が実際に測定される相関関数

- (修士論文) 奥村 哲平 「SDSS 銀河の非等方相関関数を用いた宇宙論的解析」(名古屋大学理学研究科)