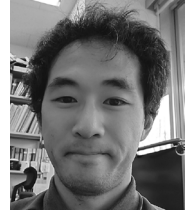


世界最高精度のダークエネルギー、 ニュートリノ質量の制限を目指して



杉山 尚徳

〈国立天文台科学研究部 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: nao.s.sugiyama@gmail.com

タイトルにある「世界最高精度のダークエネルギー、ニュートリノ質量の制限を目指す」とは、「銀河クラスタリングにおける銀河非等方3点統計量の解析手法を新たに確立し、独自のデータ解析手法を用いて世界一の結果を目指す」という意味です。本稿では、銀河の宇宙論解析の概要について簡単に紹介した後、最新の解析手法として近年注目されている非等方3点相関関数についてご紹介します。本稿を読んだみなさんが、銀河非等方3点統計量が熱い！面白い！研究したい！と思っただけのよう、心を込めて書き進めていきたいと思えます。

1. なぜ宇宙論なのか？

みなさんは、一般相対性理論や素粒子論などの基礎物理学に憧れて、研究をしてみたいと思ったことはありませんか？ まだ研究について何もわかっていない大学の学部生の時代に、一度くらいはそのような「難しそう」「賢そう」ことを研究してみたいと憧れを持ったことがある人も多いのではないのでしょうか。私自身は、実は未だに学部生時代からの憧れを持ち続けています。そんな基礎物理学に「自分の手で」、なんとかして重要な貢献ができないものではないのでしょうか？

私が専門としている宇宙論という分野は、ニュートリノやダークエネルギーといった基礎物理における最先端の理論予測と、観測結果が非常に高精度で合致しており、まさに未来の物理学を切り開く分野だと言っても過言ではありません。また、宇宙論は理論的研究と観測的研究が非常に

マイルドに混ざり合っており、関わろうと思えば全てに関わることができる、非常にエキサイティングな分野です。特に近年、日本におけるデータ解析宇宙論は黄金期を迎えつつあります。例えば、銀河探査ではすばる望遠鏡を用いた「すみれプロジェクト^{*1}」が進行中であり、重力レンズや銀河の分光観測において世界一の高品質のデータを提供し続けると期待されています。また、次世代における宇宙マイクロ波背景放射^{*2}の観測衛星「LiteBird」計画も正式に決定されました。それによって、世界初の原始重力波の発見が期待されています。このように、日本には今、宇宙マイクロ波背景放射、重力レンズ、銀河分光観測という宇宙論における三つの主要観測データが全て揃いつつあります。このような素晴らしい時代に日本で宇宙論の研究を行えることは、とても幸せなことだと感じています。

^{*1} すばる望遠鏡の観測装置Hyper Suprime-Cam (HSC) とPrime Focus Spectrograph (PFS) を用いて赤方偏移 $z=0.6-2.2$ までの銀河の大規模探査計画

^{*2} Cosmic Microwave Background (CMB)

2. 銀河解析宇宙論概観

現在私は、宇宙論の分野の中でも特に、銀河分布の解析を用いた研究を行っています。まず最初に、この銀河解析宇宙論について簡単に説明します。この分野を一言で言えば「宇宙に存在する銀河がどんな法則に従って分布しているのか」を調べる研究です。私を含め研究者の方々は、研究者でない知人から「何の研究をしているの?」と質問されることも多いと思います。私はこの質問に対して「例えるなら、夜空を見上げた際に見える星たちがどんな風に散らばっているのか、その法則を調べるような研究をしています」と答えます。もちろん、肉眼で見える範囲の恒星や惑星の分布と、すばる望遠鏡のような高精度望遠鏡によって観測される銀河の分布は違いますが、それでも大雑把な雰囲気は感じてもらえると思っています。何気なく夜空で瞬いている数多の星たちも、ある一定の物理法則にしたがった結果そこに「ある」のだと、常日頃から実感させてくれて、日常風景を見る目を変えてくれる素晴らしい研究分野です。

宇宙論では、数十万数百万もの莫大な数の銀河から構成される「宇宙の大規模構造」について調べます。このような、宇宙に存在する最も大きな構造、すなわち、現在物理学が取り扱うことのできる最も大きなスケールを研究対象にするというだけでも、とてもワクワクする話ではないでしょうか。様々な赤方偏移における大規模構造を観測することで、文字通り宇宙全体の歴史を知ることができるようになります。宇宙の歴史を遡れば、私たちが観測できる範囲での最古の光である「宇宙マイクロ波背景放射(CMB)」に辿り着きます。そして、さらにその先には、インフレーション膨

張と呼ばれる急速で加速的な宇宙膨張期があったとされています。

宇宙の歴史を知ることは、一体なぜ重要なのでしょうか? 高校物理の問題でよくあるような、ボールを放物線状に投げた問題に例えてみましょう。基本的には、ボールの初期質量と、初期位置、初期速度がわかれば、ボールの軌道と最終的にボールが落ちる場所を予言することができると考えられます。インフレーション理論や、宇宙マイクロ波背景放射の観測は、これらボールの初期条件を与えるものだと考えてみてください。後は、ニュートンの運動方程式に従ってボールが動くだけで、何も面白いことはないんじゃないかと思ってしまった方はもう少し本文を読んでください。そもそも、ニュートンの運動方程式が正しいかどうかはまず怪しいところです。また、実はボールは飛んでいる途中で爆発したり、分裂したり、蒸発してしまうかもしれません。不意に風が吹いて、ボールが風に流されていってしまうかもしれません。ボールの動き、すなわち宇宙の進化をきちんと最後まで観測しなければ、私たちは宇宙のことを十全に理解したとは言えないのです。今からおおよそ12年ほど前にWMAP衛星による宇宙マイクロ波背景放射の高精度観測によって、宇宙論の標準模型が確立しました[1]。そして、この時点で宇宙論はもうやることのないんじゃないかと思ってしまった人もいるかもしれません。しかしボール投げの例でもわかるように、初期条件がわかっただけでは、宇宙の十全な理解にはまだまだ程遠いと言わざるを得ません。「宇宙論ではもうやることない」なんていうのは、間違いなのです*3。

*3 CMB lensingの効果を用いても大規模構造の時間進化を追うことができ、ニュートリノ質量へ強い制限をかけることができますが、ここでは話の展開上割愛させていただいています。CMBの威力を過小評価した書き方になっていることを、ここでこっそりとお詫び申し上げます。

3. ダークエネルギー，ニュートリノ質量，修正重力理論

銀河の赤方偏移観測から宇宙の時間進化を調べると一言に言っても、その内容は様々です。主にここで興味があるのは、「宇宙の膨張史」，「宇宙の構造形成の歴史」，そして「銀河の速度場の進化の歴史」の三つです。そしてこれらの観測から、私たちはダークエネルギーの制限、ニュートリノ質量の制限、そして重力理論の検証をそれぞれ行うことが可能となります。

まず最初に、ダークエネルギーとは、宇宙を加速膨張させる原因と考えられている、全く未知のエネルギーです。古くはアインシュタインが宇宙を静的に保つために導入した宇宙定数が基の考えとなっています。その後宇宙膨張が検出されたのち、宇宙項はアインシュタイン自身によって棄却されますが、しかし宇宙の加速膨張の発見によって再び復活を果たしました。この宇宙定数を一般化したものがダークエネルギーと呼ばれます。例えば、ダークエネルギーが定数ではなく、時間変化するかどうかは、宇宙論における重要な問題の一つです。ダークエネルギーは宇宙を加速膨張させるので、「宇宙の膨張史」を調べることでその性質を調べることができます。

次に、ニュートリノについてですが、2015年に梶田隆章先生がノーベル賞を受賞されたように、ニュートリノには質量があることがわかっています。このような質量を持つニュートリノは、物質が構造を作るために集まろうとしている際に、非常に高速の速度分散を持って飛び回することで、重力ポテンシャルの井戸を均してしまいます。その結果、宇宙の構造形成が、ニュートリノが存在しない場合に比べて遅れてしまいます。このように「宇宙の構造形成の歴史」を調べることで、ニュートリノ質量の制限を宇宙論的解析から調べることが可能となります。ニュートリノのような極小の研究対象を、宇宙大規模構造という極

大のスケールから調べることができるなんて、とても不思議で素晴らしいことだと思います。

最後に、修正重力理論です。ニュートン重力を考えてみると、運動している物体の加速度は、重力ポテンシャルの空間微分に比例します。加速度とは、速度の時間微分です。つまりこのことから、宇宙に散らばる「銀河の特異速度の進化の歴史」を観測することで、宇宙の進化を司る重力理論を検証することが可能となります。

以上のように「宇宙の膨張史」，「構造形成史」，「速度場の進化」について概観しましたが、もちろんこれらは互いに影響し合っています。例えば、膨張史は構造形成にも影響を与え、構造形成と速度場にも密接な関係があります。従ってダークエネルギー、ニュートリノ質量、修正重力理論を全て一度に強く制限することは難しく、それぞれ一つずつ調べられることが多いです。

ダークエネルギーの時間進化を発見する、宇宙定数を否定する、ニュートリノの質量を宇宙論から決定する、アインシュタイン方程式のずれを発見する、どれをとっても基礎物理へ与える影響は絶大です。銀河解析宇宙論は、このように基礎物理学の新たな扉を開く大きな可能性を持っているのです。

4. 宇宙大規模構造の物理

ここでは、宇宙大規模構造に存在する主な物理的効果についてお話しします。主な効果は、バリオン音響振動、Alcock-Paczynski (AP) 効果、赤方偏移歪みの三つです。だんだん専門的な話になってきましたが、宇宙論が専門でない方にも理解してもらえるような説明を心がけたいと思います。詳細は、日影千秋氏や奥村哲平氏の過去の天文月報の記事も参照にしてください [2-4]。

最も有名なものは、バリオン音響振動です。宇宙の最初期には、バリオンと光子はトムソン散乱を通じて強結合していますが、宇宙が冷えることで電子と陽子が結合して中性化し、バリオンと光

子との結合が切れます。その結果として、光は直進できるようになり、宇宙マイクロ波背景放射が放射されます。この際、バリオンと光子の結合の位相は現在までそのまま残ることになり、宇宙マイクロ波背景放射と宇宙大規模構造の双方にその名残が残ります。これが、バリオン音響振動です。具体的に言えば「ある一つの銀河から見たとき、バリオン音響振動が現れるおおよそ 100 Mpc/h 離れた場所にある銀河たちは、他の距離にある銀河たちよりも確率的に見つかりやすい」ということです。より定量的には、ある銀河から見たときに、どのスケールでどの程度の確率で銀河が見つかるかを表している 2 点相関関数を測定することで、記述できます。バリオン音響振動は、このとき 2 点相関関数において 100 Mpc/h で一つのピークとして観測されます。そして 2005 年には、世界で初めて宇宙大規模構造のバリオン音響振動が Eisenstein ら [5] によって検出されました (図 1 の左図)。このバリオン音響振動の 100 Mpc/h というスケールは宇宙のどの時期でも変化しないため、バリオン音響振動のスケールに対応する見込み角度を測定すれば、銀河までの角径距離を測定することができます。

AP 効果は、初めて聞く方には少しトリッキー

に見える効果かもしれません。この効果は、私たちが銀河までの距離を赤方偏移から計算して求めることに由来しています。私たちが観測する銀河の位置情報は、あくまで赤経、赤緯、赤方偏移であるため、3次元空間上の銀河分布を得るためには、銀河までの動径方向の距離が必要となります。動径距離はハッブルパラメータの積分で記述され、ハッブルパラメータは宇宙論パラメータに依存していることを考えると、動径距離をあらかじめ固定することはできません。銀河の動径方向の分布は、あくまで動径距離の関数と考えるべきです。このように、動径距離の推定によって観測される銀河分布が変化する効果を、AP 効果と呼びます。宇宙は統計的に一様等方であると考えられるので、動径方向に対して垂直方向の銀河分布がわかれば、動径方向の分布も自然と予想できます。一方で、観測される銀河の動径方向の分布は動径距離に依存しているため、理論予想と比較することで、私たちは銀河までの動径距離、すなわちハッブルパラメータを推定することができます。赤方偏移歪みも、考え方は AP 効果と似ています。私たちが赤方偏移から銀河までの動径距離を見積もりますが、しかし銀河はそれぞれ特異速度を持っているため、観測される赤方偏移にはドッ

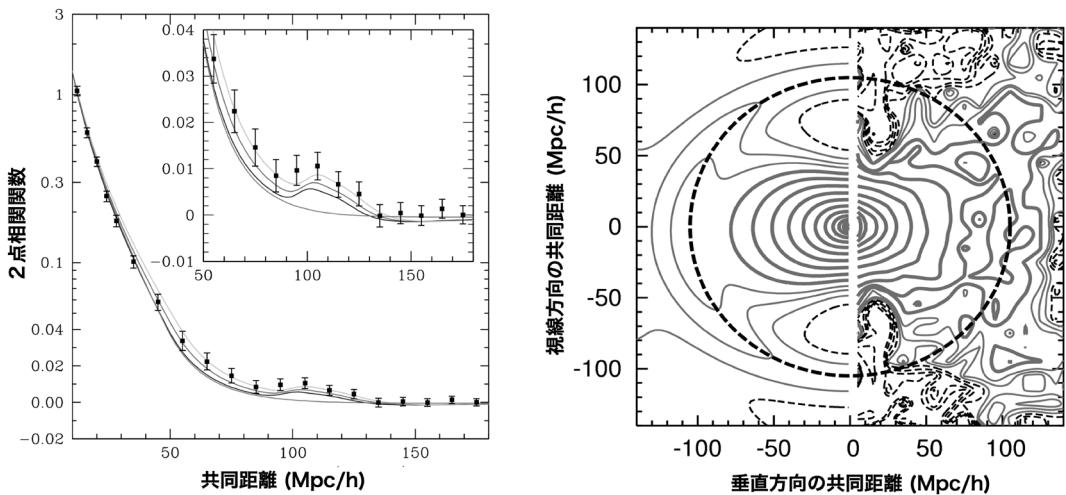


図1 左図: 世界初のバリオン音響振動の検出 [5]. 右図: 世界初の非等方 2 点相関関数の解析 [6].

プラー効果を通じて銀河の特異速度の動径方向成分が含まれてしまっています。この銀河の特異速度による銀河の動径方向の分布の歪みを「赤方偏移歪み」と呼びます。AP効果と同様に、この赤方偏移歪みの程度を評価することで、私たちは銀河の特異速度の情報を得ることができます。

第3章の議論と照らし合わせれば、バリオン音響振動とAP効果から測定される角径距離、ハッブルパラメータは「宇宙の膨張史」に対応し、赤方偏移歪みから測定される銀河特異速度場によって「宇宙の構造形成史」または「速度場の進化」を調べることが可能となります。AP効果と赤方偏移歪みは、観測される銀河密度場を視線方向に歪ませる、つまり本稿のキーワードである「非等方性」を生じさせることを覚えておいてください。銀河観測から宇宙論的情報を得るには、この「非等方性」の取り扱いが本質的に重要になってきます。このような宇宙大規模構造観測の非等方成分を用いた宇宙論解析は、奥村ら [6] によって2008年に世界で初めて行われました (図1の右)。この時点で、現在まで繋がる銀河宇宙論解析の基礎が確立されたと言えると思います。今からおおよそ12年前の出来事です。

以上のように宇宙大規模構造の物理を概観すると、AP効果や赤方偏移歪みは大規模構造があらかじめ持っている物理的效果と言うよりは、むしろ動径距離の推定の際の観測的な不確定性によって生じているように見えます。しかしながら、観測による不確定性を理論的に正しく見積もることができれば、逆に重要な情報として用いることができるのです。このように、どのような効果でもある意味貪欲に情報を取りに行こうという先人方の知恵には、私は敬服するしかありません。

5. 非等方3点統計量

この章からは、いよいよ私自身の研究についてお話ししたいと思います。これまで見てきたように、銀河解析の宇宙論という分野は既に非常に高

度に発展しており、十分な物理的理解にも到達しています。基本的なデータ解析の手法についても、2016年に終了したSDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey (BOSS) プロジェクト [7, 8] を通じて完成したと言えるでしょう。さらには、BOSSプロジェクトの成功を基にして、世界中でさらなる大規模銀河観測計画が進行中です。日本においても、すばる望遠鏡を用いたPFSプロジェクトが計画されています。このような状況の中で、私には宇宙論に対して一体どのような貢献ができるのでしょうか？

今の自分の研究状況を思うと、自分の子供達が公園の砂場で遊んでいる状況と重なります。この世界のどこかには、砂場という遊び場そのものを作る人たちがいます。まさに宇宙論観測プロジェクトを推進する方々です。一方で、今の私はあくまでその砂場を使って遊ばせてもらっている立場です。しかも、私のいる砂場は既にかなり遊ばれている場所で、そこかしこにおもちゃがたくさん残されている状況です。砂場を一から作る時代も、その砂場で一番最初に遊ぶ時代も、既に過ぎ去ってしまいました。ならば今の私には、この見渡す限りあふれんばかりのおもちゃを使って如何に面白い遊びをするか、そのおもちゃの遊び方が問われているのだと思います。その一つの新しい遊び方として、現在私は、銀河の「非等方3点統計量」の研究を行っています。3点統計量と聞いて「CMB観測でも散々聞いたし、銀河観測においても昔から研究されているから、今更二番煎じなんじゃないか？」と思われる方は、残りの文章を通じて、現在最も重用視され、発展しつつある分野であることを認識していただくと幸いです。

通常、宇宙論では2点統計量と呼ばれる量をデータから測定し、それを理論モデルと比較します。理由は様々ありますが、一つ実際的な理由としては、データ容量の削減です。物理的ではなく、つまらない理由に思われるかもしれませんが

が、使えないデータはないも同然ですから、大事なことです。銀河観測の場合では、何十万何百万の銀河の位置から直接宇宙論的情報を引き出すのは困難です。たとえ銀河分布を密度場書き直した場合でも同様です。2点統計量ならば、銀河の相対距離の関数として1次元関数となるため、データ点はせいぜい数十であり、データ解析が劇的に単純化します。しかしながら2点統計量だけでは、銀河分布から宇宙論的情報を十分に取れないのではないかと議論は、長年に渡って続いてきました。その理由には、重力の非線形性が密接に関わってきます。銀河分布は構造が初期宇宙からある程度進化したものを見ているのであり、そのような状況では重力の非線形性効果が重要な役割を果たします。一方で、宇宙マイクロ波背景放射の場合には、宇宙初期において大きな構造が形成されておらず、線形重力によって十分に記述することができます。このように「線形重力か非線形重力か」が、宇宙マイクロ波背景放射と銀河分布の性質の大きな違いと言えます。そして、3点統計量のような高次統計量は重力の非線形性が存在して初めて生成されるため、銀河分布から宇宙論的情報を取り出すには、宇宙マイクロ波背景放射の場合とは異なり、2点統計量の測定だけでは不十分だと考えられます。実際に、2点統計量のシグナル・ノイズ比(S/N)は、小スケールにいくほど線形重力による予言値よりも小さくなっていくことが、N体シミュレーションを用いて確認することができます(図2)。この2点統計量のS/Nの振る舞いは、まさに小スケールにおいて宇宙論的情報が高次統計量、すなわち3点統計量に漏れているということを示しています。

銀河の3点統計量そのものについては、銀河解析による宇宙論の黎明期の段階から研究が続けられていました。私が調べた限りでは、最初の銀河3点統計量の測定は、1975年に Peebles と Groth [9] によって銀河の2次元角度分布から測定されています。SDSSデータを用いた銀河の3

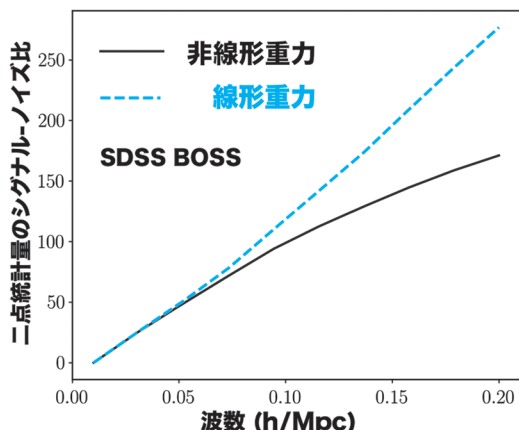


図2 BOSSプロジェクトにおいて測定される2点統計量のシグナル・ノイズ比。点線は線形重力による予言値、実線はシミュレーションによる測定値をそれぞれ表している。

次元分布からの測定の最初の一つは、2004年に加用ら [10] によって行われました。このように40年を超える研究の歴史があるにも関わらず、銀河3点統計量は宇宙論解析の主要な解析としては定着はしていませんでした。その理由は様々ですが、最も大きな理由として、その測定の困難さが挙げられると思います。2点統計量に比べ、3点統計量は測定に時間がかかりすぎます。単純計算として、計算時間は粒子数Nとすると、2点統計量は N^2 、3点統計量は N^3 のオーダーとなります。実は銀河解析においては銀河そのもの以外にも、銀河分布の平均からのずれを見積もるために、観測された銀河の数のおおよそ100倍のランダム粒子を取り扱う必要があります。また、3点統計量のエラーを見積もるためには、観測された銀河分布を再現するシミュレーションデータをおおよそ数千作って、それぞれのシミュレーションデータから3点統計量を測定する必要があります。このため、例えば10万個の銀河を観測し、1000個のシミュレーションデータを用意した場合には、宇宙論解析を完遂するのに必要な3点統計量の計算時間は $(10^5 \times 10^2)^3 \times 10^3$ のオーダーとなります。こんなループ計算は、とてもではないですが気軽

にできるものではありません。この技術的困難は、2015年にScoccimarro [11]と、SlepianとEisenstein [12]によってそれぞれ独立に解決されました。彼らによって高速に3点統計量を測定するアルゴリズムが開発され、そこから爆発的に研究が加速することになります。例えば、2017-2018年にかけてSlepianら [13]と、PearsonとSamushia [14]によって3点統計量の中でバリオン音響振動のシグナルが、 4σ を超える統計的有意性を持って初めて検出されました。2005年に2点統計量からバリオン音響振動が検出されて、実に12年後のことです。また、2017年にはGil-Marínら [15]によって2点統計量と3点統計量の両方を組み合わせて、世界初の宇宙論解析が行われました。これらの出来事が起こったのは、ほんのここ3-4年の間のことです。

近年非常に盛んに研究されている銀河3点統計量ですが、まだまだ課題は多く残されています。(1) 一番の問題は、Gil-Marínら [15]によって与えられた結果では、2点統計量のみ解析結果と比べて、宇宙論パラメータへの制限に大きな改善が見られなかったことです。良くて、10%程度です。その理由として考えられるのは、この解析では3点統計量の「等方的」成分しかデータ解析に用いられていないことだと考えられます。第4章でも述べたように、銀河分布から宇宙論的情報を取り出すためには、AP効果や赤方偏移歪みのような銀河分布の「非等方成分」からの情報を用いることで初めて強力な宇宙論パラメータの制限が可能となります。等方的成分のみに着目している限り、主にバリオン音響振動の効果しか見ることはできませんが、しかし3点統計量上のバリオン音響振動は現在 4σ でしか検出されていないため、宇宙論パラメータの制限を行うにはまだまだ心もとないです。このため、世界の研究の流れは3点統計量の非等方成分をどのように取り扱うかが主要な課題となっており、私自身もその先頭を走る一人だと自負しています。(2) 二つ目の

問題は、3点統計量の自由度の高さからくる、データ数の多さです。2点統計量は銀河の相対距離の1次元関数でしたが、3点統計量は二つの相対距離で記述される2次元関数となるため、単純に2点統計量の場合に比べてデータ数が2乗分増えます。この効果は、特に3点統計量の統計的エラーを見積もる際に問題になります。通常、私たちは測定した統計量のエラーを見積もるために、観測される銀河分布を再現するような擬似的なシミュレーションデータ（モックデータ）を数千個作り、それらからそれぞれ統計量を測定し、統計量の共分散行列を直接的に求めます。そして、信頼に足る共分散行列を得るために必要なシミュレーションデータ数は、測定する統計量のデータ数に依存しています。例えば、2点統計量の基本的なデータ数はおおよそ30程度ですが、BOSSプロジェクトでは2000ものモックシミュレーションデータが用意されています。この場合3点統計量のデータ数は、単純に考えても $30 \times 30 = 900$ 程度と見積もられますが、しかし公開されているモックシミュレーション数は2000と変わらないので、モックシミュレーションから推定される3点統計量のエラーには常にデータ数の多さからくる不確実性が内包されています。この問題を解決するためには、なんとかして3点統計量のデータ数をさらに圧縮するか、もしくはモックシミュレーションデータ数を新たに数万以上用意する必要があります。(3) 三つ目の問題は、少し専門的になりますが、観測領域の形状が測定される統計量に及ぼす影響です。私たちは宇宙全体を観測することはできず、必ず宇宙の一部のみの銀河分布を測定します。このとき、観測される領域の形状によって、測定する統計量の形状が変化します。この効果を正しく見積もらなければ、推定される宇宙論パラメータの値がバイアスされてしまう危険性がありますが、3点統計量においては未だ補正方法が確立されたとは言い難い状況でした。(4) 最後に、銀河非等方3点統計量の理論モ

デルの構築です。複雑でより信頼性のあるモデルはいろいろと考えられますが、しかし計算が複雑すぎて宇宙論解析に用いることができなければ、せっかくモデルを作ってもあまり有用ではありません。マルコフ連鎖モンテカルロ法 (Markov chain Monte Carlo methods; MCMC) アルゴリズムなどを用いた宇宙論パラメータ推定では、数十万程度の理論計算を異なる宇宙論パラメータで行う必要がありますから、「観測を再現する」だけでなく「単純で、高速」な理論モデルの構築が必須です。

私は以上の四つの問題を全て解決し、3点統計量の非等方成分のデータ解析手法を確立すべく、3年ほど前からプロジェクトを開始しました。このプロジェクトを通じて、これまで10年以上積み上げられてきた2点統計量解析の手法と同程度の信頼性を、3点統計量においても達成したいと考えています。具体的な例を言うと「2点統計量ではダークエネルギーの時間変化が検出されませんが、3点統計量を組み合わせた解析の中では検出された」というような状況が万が一にでも起きた場合において、「3点統計量の解析はまだまだ信頼性が低いので、この結果は十全には信じられない」というようなことを決して誰からも言われなようにしたい、ということです。

6. 研究成果

具体的な研究成果についてお話すの前に、本稿の冒頭で、私が「難しそうな」「賢そうな」話に憧れて続けているという話を思い出してください。この憧れに従って、宇宙論の中でも特に理論的な研究であるインフレーション理論の研究を行なって博士号を取り、その後は大規模構造の摂動論的理論計算の方向に進み研究を行ってきました。ですが、私はポスドクの2年目くらいで、遅まきながらようやく悟りました。私が理論的に素晴らしい発見をすとか、私の理論計算を世界中の人が参照すとか、無理そうだな、と。賢い人

たちに賢さで対抗するのは、無謀だな。身長170 cmの私が、2 mを超える人たちにバスケットボールで勝負するようなものです。普通にやってはとでもではないですが敵いません。そしてどうやら、私は田臥選手にはなれそうにはありません。ならば、どうすれば良いのでしょうか？ 潔く諦めれば良いのでしょうか？ いいえ、私は思いつきました。「そうだ！自分で測定したものを、自分で理論予測すればいいじゃないか！」と。誰も測定したことない測定量を考えて、自分で測定して、自分で理論モデルを作って、自分でデータ解析すれば、もう誰に憚ることもなく好き勝手自分の計算結果を使えるじゃないかと。ましてやそれで世界一の結果を出しさえすれば、世界中の人が私の研究結果を参照せざるを得ません。完璧です。完璧なプランです。そしてそれを思いついたときに、改めて周りを見渡せば、偉大な先人の方々が、既にそれを可能にするほどの数々の知見や道具というおもちゃを既に作ってくれていたことに気がつきました。なんて素晴らしい時代なのでしょう。こうして、早速この素晴らしいプランを実行に移すべく、私はこれまで様々な自分なりに新しいデータ解析手法を試みてきました。実は今回のお話の「非等方3点統計量」というのは、その三つ目となっています。

まず、前章で述べた問題点のうち三つ、(1) 銀河3点統計量の非等方成分を抜き出すこと、(2) 観測領域の形状の効果、(3) データ容量の削減、これらを一挙に解決するために、私は非等方3点統計量を *tri-polar spherical harmonics* (TripoSH) と呼ばれる基底関数を用いて展開するという、新たな手法を提案しました [16]。そもその問題として、非等方3点統計量は依存する変数が多すぎて、非等方成分のみを抜き出す手法が一意ではありませんでした。そのためこれまでの研究の多くは、ある特定の座標系を固定して計算することが長年行われてきました。しかしそのような場合、観測している座標系と理論計算において用

いた座標系を一致させる必要があり、不可能ではないにしろ、不便でした。私の提案した TripoSH 展開は、任意の座標系の計算でも最終的には同じ値を返すため、特定の座標系で理論計算された先行研究の結果をそのまま使えるという実的なメリットもあります。実はこの手法は、宇宙マイクロ波背景放射の3点統計量に対して用いられているものをそのまま銀河の3点統計量に適用したも

のです。また、このとき観測形状の効果も計算できることに気がつきました。観測領域という複雑な形状が、測定した統計量にどのように影響を与えるかを定量評価することは、測定を正しく解釈するために本質的に重要です。2点統計量においては、Beutlerら [17]で提案され、Wilsonら [18]によって確立されたように、観測領域そのものを表す統計量を測定することで、観測形状の効果を精密に取り扱うことが可能となりました。同様に、観測領域の3点統計量を TripoSH 展開して測定すれば、測定した3点統計量における観測形状の効果を見積もることが可能となります(図3)。さらに、TripoSH 展開はデータの圧縮にも非常に有用です。TripoSH 展開で現れる展開係数は、原理的には無限個存在しますが、しかし展開係数の最初の数個の次数のみ考慮すれば宇宙論的に重要なほぼ全ての情報が含まれていることがわかりました。これによって、考慮すべきデータ数が100程度にまで劇的に減少します。最後に、理論モデルにおいては、Eisensteinら [19]によって提案された2点統計量におけるバリオン音響振動への非線形性効果をシンプルに記述したモデルを拡張することで、3点統計量のバリオン音響振動シグナルを正確に記述することに成功しました(図4)。

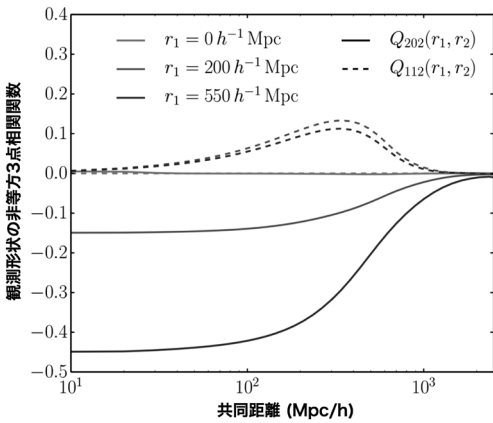


図3 BOSS 観測領域の非等方3点相関関数[16]. 3点相関関数は二つの共同距離, r_1 と r_2 に依存しており, r_1 を固定し, r_2 の関数としてプロットしています. 実線は上から順に, $r_1=0 h^{-1} \text{Mpc}$, $r_1=200 h^{-1} \text{Mpc}$, $r_1=500 h^{-1} \text{Mpc}$ の場合を表しています.

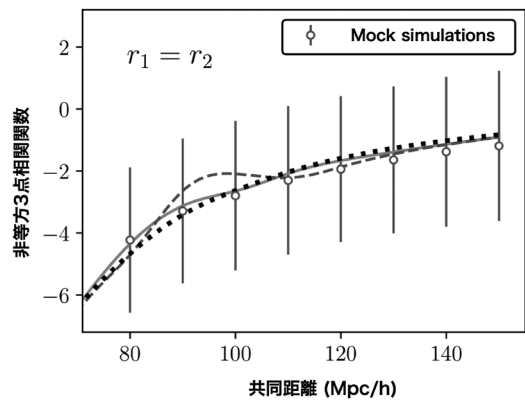
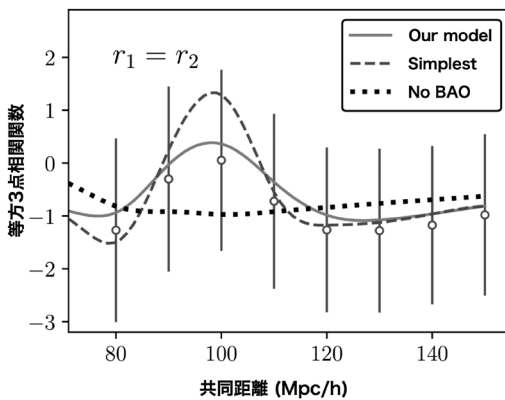


図4 左図: 等方的3点相関関数. 右図: 非等方3点相関関数. 3点相関関数は二つの共同距離, r_1 と r_2 に依存していますが, ここでは簡単のため $r_1=r_2$ の場合のみプロットします. 点線がバリオン音響振動 (BAO) のない理論モデル, 破線が最も単純な理論モデル, 実線が本解析で用いられた BAO シグナルにおける非線形効果を考慮した理論モデル. エラーバー付きのデータ点は, BOSS におけるモックシミュレーションからの測定結果 [20].

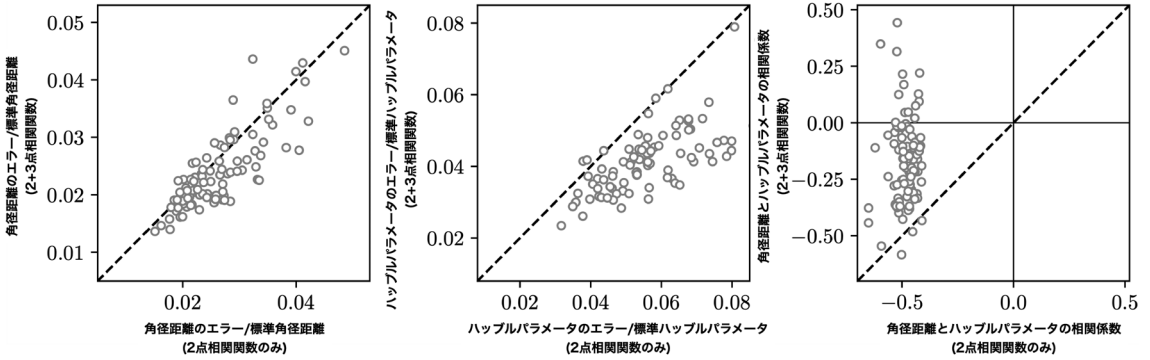


図5 左から、角径距離のエラー、ハッブルパラメータのエラー、角径距離とハッブルパラメータ間の相関係数 [20].

これら一連の研究によって、世界で初めての「銀河非等方3点統計量」の解析法を確立することができたと考えています。

BOSSプロジェクトを再現する100のモックシミュレーションそれぞれにおいて、角径距離とハッブルパラメータの推定を行い、それぞれのエラーと、角径距離とハッブルパラメータ間の相関係数を図5に示してあります。私たちはあくまでパラメータの統計的性質のみ知ることができるため、運が悪ければ実は3点統計量を加えた方がパラメータの制限が悪くなるという可能性もあります。しかし、96%以上の確率で、ハッブルパラメータに関しては制限が改善することが期待でき、最大でおおよそ45%、平均して30%の制限の改善が見込まれることが判明しました。30%のエラーの改善ということは、1.4倍の改善ということです。推定される宇宙論パラメータのエラーは観測領域の体積の平方根に反比例することを考えると、これはつまり2倍の領域を観測したことに対応しています。一体他に誰が、現在進行中の観測計画の観測領域を2倍にできるのでしょうか？ 私自身の個人的な努力によってそれが可能となるのは、まさに宇宙論データ解析において大きな役割を果たせるということだと考えています。さらに重要なことは、3点統計量を加えることで角径距離とハッブルパラメータ間の相関が減

少することです。これはつまり、例えばダークエネルギーの制限を行うために、角径距離とハッブルパラメータの情報をそれぞれ独立に用いることができ、ダークエネルギーの制限に焼き直せばさらなる改善が期待されるということです。

7. 今後の展望

本研究の現状は、BOSSプロジェクトに対応するモックシミュレーションにおいて解析を行い、実際の銀河データにて得られる結果を予言した段階です。当然、次のステップは実際のデータに本解析を適用することです。また、2点統計量においては“Reconstruction”と呼ばれる重力非線形性をデータから測定する段階から部分的に除去し、バリオン音響振動のシグナルを強調する手法が広く行われています。このReconstructionの手法を3点統計量に拡張することも直近の課題です。また、現状では実は80 Mpc/h以上の大スケールしか解析に用いていません。この理由としては、小スケールまで非等方3点統計量を記述する理論モデルがまだ存在しないこと、そして小スケールまで使えばデータ数が増大し、現状のBOSSのモックシミュレーション数だと心もとないことにあります。従って、小スケールまで用いた非等方3点統計量解析を確立するためには、信頼のおける理論モデルの構築と同時に、信頼のお

ける3点統計量の統計エラーを見積もるために、シミュレーション数を増やすことが必要となります。このシミュレーション数を増やすという方向とは別に、3点統計量の統計エラーの解析的な理論モデルを作るという方法もあります。3点統計量のエラーは $3+3=6$ 点統計量の理論計算が必要となりますが、私は既に赤方偏移歪み、銀河バイアスを含めた上での、世界で初めての銀河6点相関関数の理論モデルを構築する研究を行っており[21]、この研究を推し進めることで、測定エラーすら自身の理論モデルを用いることを視野に入れて研究を進めています。

以上のような研究を、既に公開されているBOSSデータに適用することで非等方3点統計解析を確立し、その解析手法をPFSなどの次世代大規模銀河サーベイのデータに適用したいと考えています。PFSプロジェクトとは、すばる望遠鏡を用いた、日本が主導する史上最深の大規模銀河探索プロジェクトです。宇宙論的な興味として、最終的には宇宙の進化を追うために、様々な赤方偏移における高精度宇宙論解析を組み合わせることが必要です。しかし、現在企画されている将来サーベイ計画を見渡しても、PFSプロジェクトほどの遠方銀河によって精密宇宙論解析を行える計画は見当たりません。このように、私の開発した世界一の解析手法を、PFSという世界一のデータに用いることで、世界一のダークエネルギーやニュートリノ質量の制限を行うことが最終的な目標です。

一度、非等方3点統計量解析の手法を確立してしまえば、様々な応用が考えられます。その一つが、インフレーション起源の非ガウス性の制限です。これまで銀河の3点統計量を用いた非ガウス性の制限は未だ一つもなされていません。特にインフレーション起源の非ガウス性は銀河バイアスと縮退しやすいと考えられますが、非等方性を用いた解析ならばその縮退を解くことが可能だと期待されます。同様に、例えば山内ら[22]によ

て予言される修正重力理論による特殊な非線形効果も、等方成分のみに着目する限り銀河バイアスとの縮退が考えられますが、これも非等方成分、つまり非線形速度場から強力な制限が与えられるかもしれません。

行き着くところまで行ってしまっ、3点統計量をさらに飛び越えて、4点統計量の世界初の測定を目指しても面白いかもしれません。例えば、須山-山口の不等式[23]として知られる3点統計量と4点統計量の間になり立つインフレーション起源の非ガウス性の関係は、ほぼ全てのインフレーションモデルで成り立つと期待される非常に一般的なものであり、インフレーション理論の証拠を強固にするためにも、常に検証をする価値があります。また白石[24]は、4点統計量を用いることで、銀河密度場というスカラー場のみを用いて宇宙のパリティの破れを検証できることを示しています。素粒子の世界ではパリティは破れていますが、宇宙大規模構造ではどうでしょうか？

やりたいことはいろいろと思いつきますが、どれもタフで大変な仕事です。ただ、個人的にこの非等方3点統計量の研究を始めてから実感したことです。面倒臭く根気のいる仕事をやっている、案外ライバルも減って行って、だんだん快適になっていきます。もし本稿を読んだ方々の中で、大変だけれど快適な研究を一緒にして下さるといふ方がいれば、是非ともご連絡していただければ幸いです。

謝 辞

この原稿を執筆するにあたって、妻の仁美、娘の知歩、息子の新に感謝します。宇宙一可愛い彼ら彼女らがいなければ、とても仕事をするモチベーションなど上がりません。素晴らしい研究環境を与えてくださっている国立天文台フェロシップに感謝いたします。共同研究者である斎藤俊氏、Florian Beutler氏、Hee-Jong Seo氏に感謝します。彼らは銀河宇宙論解析のスペシャリスト

であり、彼らの助言がなければここまで研究を進めることはできませんでした。数値計算およびデータ解析は国立天文台 CfCA の XC50 を用いて行われました。最後に、この原稿を書くことを進めてくださった岡部信広氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] Komatsu, E., et al., 2009, *ApJS*, 180, 330
- [2] 奥村哲平, 2008, *天文月報*, 101, 10
- [3] 日影千秋, 2014, *天文月報*, 107, 3
- [4] 奥村哲平, 2017, *天文月報*, 110, 2
- [5] Eisenstein, D. J., et al., 2005, *ApJ*, 633, 560
- [6] Okumura, T., et al., 2008, *ApJ*, 676, 889
- [7] Eisenstein, D. J., et al., 2011, *AJ*, 142, 72
- [8] Alam, S., et al., 2017, *MNRAS*, 470, 2617
- [9] Peebles, P. J. E., & Groth, E. J., 1975, *ApJ*, 196, 1
- [10] Kayo, I., et al., 2004, *PASJ*, 56, 415
- [11] Scoccimarro, R., 2015, *Phys. Rev. D*, 92, 083532
- [12] Slepian, Z., & Eisenstein, D. J., 2015, *MNRAS*, 454, 4142
- [13] Slepian, Z., et al., 2017, *MNRAS*, 469, 1738
- [14] Pearson, D. W., & Samushia, L., 2018, *MNRAS*, 478, 4500
- [15] Gil-Marín, H., et al., 2017, *MNRAS*, 465, 1757
- [16] Sugiyama, N. S., et al., 2019, *MNRAS*, 484, 364
- [17] Beutler, F., et al., 2014, *MNRAS*, 443, 1065
- [18] Wilson, M. J., et al., 2017, *MNRAS*, 464, 3121
- [19] Eisenstein, D. J., et al., 2007, *ApJ*, 664, 660
- [20] Sugiyama, N.S., et al., arXiv:2010.06179
- [21] Sugiyama, N. S., et al., 2020, *MNRAS*, 497, 1684
- [22] Yamauchi, D., et al., 2017, *Phys. Rev. D*, 96, 123516
- [23] Suyama, T., & Yamaguchi, M., 2008, *Phys. Rev. D*, 77, 023505
- [24] Shiraishi, M., 2016, *Phys. Rev. D*, 94, 083503

Aiming to Constrain Dark Energy and Neutrino Mass with the World's Highest Precision

Naonori SUGIYAMA

*National Astronomical Observatory of Japan,
Division of Theoretical Astronomy, 2-21-1
Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

Abstract: The title “Aiming to constrain dark energy and neutrino mass with the world’s highest precision” means “Establishing a new analysis method for the anisotropic three-point statistic in galaxy clustering and aiming for the world’s best result using our original data analysis method”. In this article, I will give a brief overview of the cosmological analysis using galaxies, and then introduce the anisotropic three-point correlation function, which has been drawing a lot of attention in recent years as a new analysis method for galaxy clustering. I hope that everyone reading this article will find the galaxy anisotropic three-point statistic “hot!”, “Interesting!” and “I want to study it!”. I would like to put my heart and soul into writing this article so that you will think so.