

(続紙 1)

京都大学	博士 (理 学)	氏名	橋本 一彦
論文題目	Toward a precision cosmological test of gravity from redshift-space bispectrum based on perturbation theory		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>観測の進展に伴い、宇宙の成り立ちと進化を探る宇宙論は近年飛躍的に発展し、宇宙の標準モデルが確立した。これにより、宇宙膨張と構造形成に関する様々な観測を整合的に説明できるようになったが、遠方Ia型超新星などの観測で明らかになった宇宙の加速膨張の起源については依然として未解明のままである。標準モデルでは、ダークエネルギーと呼ばれるエネルギー体が加速膨張の原因として説明されるが、その性質・状態は未だ明らかになっていない。むしろ、標準モデルの基盤をなす一般相対論が宇宙論的スケールで修正を受けることで、加速膨張が自然に説明できるとする考えもある。果たして一般相対論は宇宙論的スケールでも本当に正しいのか、今後の精密宇宙論観測から検証することが不可欠である。</p> <p>この問題に対し、近年、銀河サーベイを用いた「赤方偏移空間歪み」の測定に注目が集まっている。銀河サーベイでは分光観測により赤方偏移を測定する事で視線方向の距離が決定される。ただし、測定された赤方偏移には、銀河の固有運動に由来するドップラー効果が含まれ、実際の距離とは系統的なずれが生じる。このずれによって銀河分布が見かけ上、視線方向に歪む現象が赤方偏移空間歪みである。赤方偏移空間歪みの強さは、大スケールでは重力による構造の成長率に比例することが知られている。つまり、銀河分布の統計量から赤方偏移空間歪みを測定することで構造の成長率が決定でき、ひいては重力のテストが可能となる。赤方偏移空間歪みの測定にもとづくこれまでの重力のテストによると、おしなべて一般相対論と無矛盾であるとの結果が得られている。ただし、各銀河サーベイから求めた構造の成長率は10%程度かそれ以上の誤差があり、将来観測に向けて、決定精度を高める工夫が求められている。</p> <p>構造の成長率の決定精度向上に向けて、申請者は、銀河2点統計量を用いた従来の測定方法に加え、バイスペクトルと呼ばれる3点統計量を組み合わせた赤方偏移空間歪みの測定法を考え、理論テンプレートから構造の成長率決定に不可欠なデータ解析まで、一連の手法の開発を行った。その結果、バイスペクトルを組み合わせることで、構造の成長率が従来よりも高精度かつロバストに決定できることを示した。</p> <p>具体的な成果は以下の通りである。まず、摂動論にもとづく計算を駆使し、重力進化の弱非線形領域まで適用範囲を広げた赤方偏移バイスペクトルの理論モデルを構築、N体シミュレーションから測定したバイスペクトルに現れる赤方偏移空間歪みを定量的に説明できることを示した。次いで、大規模シミュレーションデータからハローと呼ばれる自己重力束縛天体を同定し、銀河サーベイの模擬カタログを作成した。このハローの模擬カタログをもとに、データ解析に必要な一連の手法の開発・検証を進めた。ここでいう一連の手法とは、観測データからパワースペクトル・バイスペクトルを高速に推定する方法、前述の理論モデルに銀河・ハローバイアスの系統的効果を取り入れた理論テンプレートの高速度計算法、さらに、構造の成長率決定のためのマルコフ連鎖モンテカルロ法にもとづく統計解析手法である。これらの手法をもとに解析を行なった結果、バイスペクトルに現れる非等方性、特に四重極成分を用いることで、系統誤差を3%以内に抑えて構造の成長率を決定でき、パワースペクトルを用いた従来の決定法と組み合わせることで、バイスペクトルの形状を限定した場合でも決定精度を有意に向上できることを示した。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

近年、観測の進展により、宇宙膨張と構造形成に関する様々な観測を統合的に説明する宇宙の標準モデルが確立した。ただ、標準モデルは、宇宙の成り立ち・進化の解明を目指す宇宙論研究の出発点にすぎず、浮かび上がった未説明の問題を今後の観測を通じて解き明かしていくことが不可欠である。特に、銀河サーベイを中心とする宇宙の大規模構造の将来観測では、より大規模かつ系統的な観測が行われるようになり、これまで以上に統計精度が高まる。高精度の観測データを駆使することで、どこまで未説明の問題に迫れるか、方法論の追求が求められている。

申請者の論文では、銀河サーベイを用いた宇宙論的スケールでの重力のテストに焦点をあて、従来手法を凌駕する精度で重力のテストを行う方法論の構築を進めている。ここでいう重力のテストとは、宇宙の大規模構造が重力不安定性により成長する速度(構造の成長率)を観測から測定し、一般相対論との整合性を検証することを指す。構造の成長率は、赤方偏移空間歪みと呼ばれる効果を用いて測定でき、近年、様々な銀河サーベイで測定されている。従来、構造の成長率は銀河の2点統計量を用いて測定されてきたが、申請者の論文では、2点統計量に加え、バイスペクトルと呼ばれる3点統計量を組み合わせた測定方法を考え、その方法論の構築を行なった。大規模構造の統計性は、重力進化の非線形性などにより非ガウスのようになることが知られており、高次の多点統計量からも宇宙論に関する情報を引き出せる。その意味で、申請者のアプローチはごく自然なものだが、方法論自体を具体的に構築することは一筋縄ではない。とりわけ構造の成長率決定には、赤方偏移空間歪みによって生じるバイスペクトルの非等方成分の記述が本質的で、これまで、重力進化の非線形性が影響する小スケールにも適用できる精度のよい理論テンプレートは知られていなかった。

申請者は、摂動論にもとづく計算手法を用いてこの問題に取り組み、赤方偏移空間歪みの影響を適切に取り入れたバイスペクトルの理論モデルを構築した。シミュレーションとの詳細な比較から、申請者の開発した高次摂動計算による理論モデルが、バイスペクトルに現れる非等方性、特に四重極成分を精度よくかつ広範囲にわたって記述できることを示した。さらに大規模なシミュレーションから模擬カタログを作成し、理論テンプレートとしての有効性を検証した。その結果、パワースペクトルを用いた従来の方法にバイスペクトルの四重極成分を組み合わせることで、構造の成長率を精確に決定でき、決定精度も向上することを具体的に示した。決定精度の向上はただか20%程度であったが、これは解析の都合上、バイスペクトルの形状を限定したためである。にも関わらず、SDSS BOSSと呼ばれる銀河サーベイで行われたデータ解析結果とほぼ同程度の精度向上が見られた点は特筆すべきである。SDSS BOSSでは、申請者の解析と比較して、多くの形状のバイスペクトルを使い、非線形性が強い小スケールまで用いて解析を行なっている。しかるに、バイスペクトルの非等方性をうまく記述する理論モデルを構築できず、等方成分のデータしか用いなかった。つまり、バイスペクトルの非等方性が、構造の成長率の決定精度向上に本質的で、申請者が構築した理論モデルがきわめて有効であったことを示している。将来、本格的なデータ解析を行うことでさらに精度向上が期待される点でも、申請者が得た結果は高く評価できる。さらに、一連のデータ解析を高速に行う要素技術(バイスペクトルの高速測定法と高速テンプレート計算法)を開発した点も、実用面で重要な成果といえる。

よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成30年1月12日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降