

論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称	博士（理学）	氏名	南岳
学位授与の要件	学位規則第4条第①・②項該当		
論文題目			
Dark Energy with Large-scale Inhomogeneities (大規模非一様性を持つダークエネルギー)			
論文審査担当者			
主査	教授	小畠 康史	
審査委員	教授	深澤 泰司	
審査委員	教授	志垣 賢太	
審査委員	教授	山本 一博（九州大学）	
審査委員	准教授	岡部 信広	
〔論文審査の要旨〕			
<p>現在の宇宙は加速膨張を始めており、それに必要な、暗黒エネルギーと呼ばれる成分が宇宙の全エネルギーの約70%を占めると見積もられている。その未知成分の可能性として宇宙項があり、現在の宇宙の加速膨張を説明する理論模型として標準的に受け入れられている。しかし、その宇宙項は現象論的模型であり、場の真空のエネルギーの問題と関連し、なぜ宇宙項が存在するのか、その大きさはどのように説明されるのかなどの根源的問題となっている。量子重力を含む究極理論とされる超弦理論においては、加速膨張時空を記述するドジッター時空の存在を許さないという予想もあり、それが正しいと宇宙項の存在を否定することになる。そのため、現在の加速膨張を引き起こす暗黒エネルギーが、動的なスカラー場によって引き起こされているという説が数多く研究されている。</p> <p>近年の宇宙論的観測により、暗黒エネルギーに対する制限を与える努力が続けられている。例えば、暗黒エネルギーの圧力とエネルギー密度の比を状態方程式パラメーターと呼ばれる、暗黒エネルギーを特徴付ける量があるが、その値に対して、10%から数%程度の誤差で観測的制限を与えられている。それは、宇宙項と概ね矛盾しないが、暗黒エネルギー密度が時間変化する動的なスカラー場の模型を必ずしも否定するものでもない。これまでの暗黒エネルギーの理論的研究の多くは、それが時間的な変化をする可能性に対して焦点が当てられてきた。今後、未解明である暗黒エネルギーの解明に向けて、様々な観点からその可能性を研究する必要がでてきている。宇宙膨張と関連するハッブル定数不一致問題や、宇宙背景放射の大スケールでのアノーマリーといった標準宇宙模型では説明できない問題が指摘されており、新たな視点も重要になると考えられている。</p> <p>Nan(南)氏の研究は、Aokiらによって提案されたスカラー場に起因する理論模型を詳しく解析し、空間的に非一様な暗黒エネルギーのとの関連を調べたものである。Aokiらの模型では、偽真空崩壊を伴うインフレーション模型でスカラー場の超曲率モードの量子揺らぎが生成されることに着目し、このダイナミカルなスカラー場が現在の暗黒エネルギーの起源となることを主張する模型である。膨張宇宙における超曲率モードの進化は、通常連続モードの揺らぎと異なり、時間進化は極めて遅く、ほとんど減衰せず、そのスカラー場</p>			

が現在の暗黒エネルギーとなるというものである。Nan氏は、このスカラー場に基づいた暗黒エネルギーモデルでは、量子場の揺らぎに起因するスカラー場のランダム性により、現在のホライズンを超える非常に大きなスケールで、暗黒エネルギー密度に強い非一様性を持つことを見出し、その観測的な帰結を論じた。

本論文の構成では、簡単な現代宇宙論のまとめを包括した後、Aokiらのモデルに従って、超曲率モード由来の暗黒エネルギーモデルにおける場の相関関数を評価し、現在のホライズンスケールを遥かに超えるスケールで、非一様な暗黒エネルギー密度のモデルとなっていることを具体的に示した。次に、その観測的な帰結を明らかにするために、局所的な座標を導入し、現在のホライズンスケールで暗黒エネルギーの非一様性を、一様等方宇宙からの摂動として取り扱うことにより、進化の様子を明らかにした。共形ニュートニアンゲージの宇宙論的摂動理論を用いて、暗黒エネルギーの非一様性の進化を定式化し、等曲率暗黒エネルギーモデルとして分類される非一様性の進化を明らかにした。重力ポテンシャルの時間変化が引き起こす積分ザックスヴォルフ効果を通して、大スケールの宇宙背景放射の温度揺らぎへの影響を見出した。また、その定量的な評価も行い、宇宙背景放射の双極子成分と4重極子成分の観測に影響する可能性から、観測データと比較することによって、理論モデルへの制限を与えている。

さらに、Nan氏は、Aokiらのモデルを一般化し、ホライズンを遥かに超えるスケールに非一様性を持つ暗黒エネルギーモデルに対し、空間が平坦な宇宙モデルを基礎にした定式化を与えた。この定式化は、暗黒エネルギーの非一様性による超ホライズンモードの非一様性を実空間の座標の展開により特徴づけたもので、空間的に平坦な宇宙モデルを基礎にしているので取扱いが簡単で、観測との比較に都合の良いものとなっている。また、先行の計算では、暗黒エネルギーの時間変化は無視する近似であったが、発展部分の研究ではダイナミカルな暗黒エネルギーの時間進化を、数値計算により背景となる暗黒エネルギーの進化と非一様性の進化を統合的に解いた。その結果、宇宙背景放射の双極子成分と四重極子成分からの観測的制限の正確な評価を行い、暗黒エネルギー密度の非一様による、光度距離の非等方性への影響まで明らかにした。

Nan(南)氏の研究成果は、暗黒エネルギーの非一様性という新しい暗黒エネルギーの可能性を開拓するものであり、宇宙論の大スケールのアノマリーに関連して今後の応用的研究への発展性も秘めている。研究内容は、暗黒エネルギーという未解明問題の研究に、新しい方向性を与えるものとしても評価できる。

以上、審査の結果、本論文の著者は博士(理学)の学位を授与される十分な資格があるものと認める。

公表論文

- (1) Large-scale inhomogeneity of dark energy produced in the ancestor vacuum.

Yue Nan, Kazuhiro Yamamoto, Hajime Aoki, Satoshi Iso, and Daisuke Yamauchi

Physical Review D 99, 103512 (2019).

参考論文

- (1) Gravitational redshift in the void-galaxy cross-correlation function in redshift space.

Yue Nan and Kazuhiro Yamamoto

Physical Review D 98, 043527 (2018).

- (2) Higher multipoles of the galaxy bispectrum in redshift space.

Yue Nan, Kazuhiro Yamamoto, and Chiaki Hikage

Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 07 (2018) 038.

- (3) Analytic halo approach to the bispectrum of galaxies in redshift space.

Kazuhiro Yamamoto, **Yue Nan**, and Chiaki Hikage

Physical Review D 95, 043528 (2017).

- (4) Dark energy model with very large-scale inhomogeneity.

Yue Nan and Kazuhiro Yamamoto

submitted to Physical Review D (DD13014).