

京都大学	博士 (理学)	氏名	杉村 和幸
論文題目	Quantum Tunneling During Inflation: Non-linear Analysis of the Quantum Fluctuations		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本学位論文では、インフレーション期にスカラー場の量子トンネリングが起こった場合に、非線形効果まで考慮した量子ゆらぎの発展の解析がされていて、さらに、非線形発展によって生じる量子ゆらぎの非ガウス性について論じられている。</p> <p>宇宙の極初期に起こったとされるインフレーションは、観測との整合性から現在では宇宙論の標準理論の一部として組み込まれているが、その背後に潜む物理についてはまだほとんど解明されておらず、現在活発に研究されている状況にある。そのような中で、高エネルギー理論の候補である弦理論を用いてインフレーションを理解しようとする枠組みとして、弦理論的ランドスケープが提唱されている。弦理論的ランドスケープとは、弦理論から示唆される壮大なスカラー場ポテンシャルの景色のことである。ポテンシャルの詳細はまだ不明であるが、一般的な特徴としてポテンシャルの極小点の間で量子トンネリングが起こることから、量子トンネリングに特有な観測的シグナルを調べることで、弦理論的ランドスケープを観測的に検証できるのではないかと考えられる。本学位論文における研究は、そのような観測的シグナルとして、インフレーション期の量子トンネリングから生じる量子ゆらぎの非ガウス性に注目した研究である。</p> <p>量子ゆらぎの非ガウス性とは、具体的には、ゆらぎのガウス成分に対応する2点相関関数を越えた、ゆらぎの3点相関関数や4点相関関数などの高次相関関数に対応する観測量である。観測技術の著しい発展により、量子ゆらぎの非ガウス性はインフレーションモデルを強力に制限する観測量となろうとしている。そのため、弦理論的ランドスケープを観測的に検証するうえでも、量子ゆらぎの非ガウス性を利用することは有力な手段となると考えられる。しかし、これまで、インフレーション中の量子トンネリングから生じる量子ゆらぎの非ガウス性についての研究は存在せず、そもそも、計算手法すら確立されていなかった。通常、量子ゆらぎの非ガウス性の計算に用いられる“in-in formalism”と呼ばれる手法は、そのままでは量子トンネリングが起こった場合に適用できなかった。</p> <p>本学位論文では、量子論の基礎方程式であるシュレディンガー方程式に立ち戻って“in-in formalism”を拡張し、量子トンネリングから生じる量子ゆらぎの非ガウス性を定式化した。定式化の際には、初めに、インフレーション中の量子トンネリングを単純化した系である、二次元の量子力学の場合を詳細に調べ、そこで得た表式をインフレーション中の量子トンネリングの場合に拡張するという方針が採られている。さらに、本学位論文では、得られた定式化を以下に記す弦理論的ランドスケープに基づくインフレーションモデルに応用し、インフレーション中の量子トンネリングから生じる量子ゆらぎの非ガウス性を具体的に求めている。</p> <p>具体的には、量子トンネリングを契機にスローロールが始まるインフレーションモデルに対して新たに得られた定式化を応用し、量子トンネリングから生じる量子ゆらぎの非ガウス性を調べている。そして、量子ゆらぎのバイスペクトルを計算し、単純なインフレーションモデルとの相違が、量子ゆらぎの長波長領域で大きくなることが示されている。このように、これまで知られていた量子ゆらぎのパワースペクトルに加えて、量子ゆらぎのバイスペクトルの情報も使うことで、より強力な弦理論的ランドスケープの観測的検証の手段となると期待される。</p>			

(続紙 2)

スローロールインフレーション中にバブル生成を伴って量子トンネリングが起きた場合についても新たに得られた定式化を応用し、量子トンネリングから生じる量子ゆらぎの非ガウス性を調べている。具体的には、宇宙背景輻射の温度ゆらぎのスキューネス(歪度)を計算し、バブル状の構造をもつ高スキューネス領域が生じる場合があることが示されている。これまで知られていなかったこの特徴的な観測的徴候を探索することで、インフレーション中のバブル生成、ひいては弦理論の初めての観測的証拠が得られる可能性がある。

(論文審査の結果の要旨)

本学位論文では、現在の宇宙論におけるメインテーマの一つであるインフレーションの背後に潜む物理について調べる研究として、弦理論的ランドスケープと呼ばれる理論的に提唱された非常に魅力的なインフレーションの枠組みを、観測から検証することを目指している。それゆえ、本学位論文における研究のモチベーションは、今後の宇宙論を考えるうえで、非常に重要な観点である。

弦理論的ランドスケープを観測的に検証することは、弦理論を観測から検証するのが難しいのと同様に、難しい課題である。しかし、本学位論文における研究では、現在や近い将来における観測技術の著しい発展の中で初期宇宙からの微少なシグナルを受けることが可能になることに注目し、「ゆらぎの非ガウス性」と呼ばれる微少なシグナルを弦理論的ランドスケープの観測的検証に用いることを試みており、よい着眼点をもった研究である。

本学位論文における研究では、弦理論的ランドスケープに特徴的な現象として、インフレーション期のスカラー場量子トンネリングとそれに伴うバブル生成に着目して、そこから生じる「ゆらぎの非ガウス性」を調べている。上にも述べたように、そのような場合に「ゆらぎの非ガウス性」を調べることは弦理論的ランドスケープを観測的に検証する上で非常に重要であり、本学位論文における研究でその計算手法を確立したことで、弦理論的ランドスケープの観測的検証に向けて一歩先に進むことができたと言える。

また、本学位論文では、量子トンネリングから生じる「ゆらぎの非ガウス性」の定式化をおこなっただけでなく、新しく得られた定式化をいくつかのインフレーション期にスカラー場が量子トンネリングするモデルに応用し、それらのモデルから生じる「ゆらぎの非ガウス性」を具体的に計算している。その結果、インフレーション期のスカラー場量子トンネリングから生じる「ゆらぎの非ガウス性」についての定性的・定量的な理解が進み、これも本学位論文の非常に重要な成果である。

以上より、本学位論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成26年1月16日に、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った。発表においては、まず、研究のバックグラウンドを専門外の聴衆にもわかりやすいよう丁寧に説明し、その後に学位論文の内容に沿って学位論文の研究内容の説明が始まった。研究内容の説明についても、本人の研究成果についての深い理解に基づいて自分の言葉でわかりやすく説明することを心がけていた。発表後の質疑応答においても、数多くの質問が出ていたが、それぞれに対して丁寧に対応しており、質問への回答も的確なものであった。それゆえ、試問について合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公表可能日： 2014 年 3 月 1 日以降