

学位論文審査結果の概要

氏名	古谷 有
学位論文審査委員氏名	主査 仙洞田 雄一
	副査 浅田 秀樹
	副査 葛西 真寿
	副査 高橋 信介
	副査 高橋 龍一
	副査
論文題目	Primordial gravitational waves from triaxially anisotropic pre-inflation (三軸不等な前インフレーションからの原始重力波)
審査結果の概要（2,000字以内）	
<p>本論文は将来の宇宙論的な重力波の観測によってインフレーションと呼ばれる初期宇宙の加速膨張期に先行する前インフレーション（pre-inflation）期の存在を検証し、その性質を特定するための基礎となる理論的考察を展開したものである。この研究の背景には、現在の宇宙が一様等方的で曲率が小さいのに対してインフレーション以前の宇宙は素粒子統一理論のスケール程度の大きな曲率を備えることが自然だとする初期宇宙描像がある。本論文では前インフレーション期のモデルとして Bianchi I 型と呼ばれる一様非等方的膨張を仮定し、その場合に量子揺らぎから生成されると考えられる原始的な重力波の特性が詳細に調べられた。</p> <p>第1章の内容は導入となる序論であり、研究分野の歴史的背景を踏まえ、この研究の目的とその先にある長期的な目標を提示している。第2章ではこの研究で用いる Kasner-de Sitter 計量で表現された初期宇宙モデルを説明し、重力波の解析のために必要な Bianchi I 型非等方宇宙でのゲージ不変摂動論の要約と具体的な重力波の運動方程式の導出が行なわれた。第3章と第4章が研究成果の根幹を成す部分であり、第3章では原始重力波の初期条件を計量摂動の量子化を通じて設定する方法の吟味が行なわれた。学位申請者自身の研究成果として、過去の研究で詳細に調べられていなかった三軸不等的な非等方性を持つ前インフレーション期を考察する際に生じる初期特異点の存在に付随した理論的困難の詳細と、それへの対策が論じられている。さらに、具体的な量子論的初期条件の例を取り上げ、原始重力波の天球面上の強度分布をいくつかの波長において数値的に計算し、パワースペクトルの解析的な評価も行なった。続く第4章の内容も申請者の研究成果であり、前インフレーション期における原始重力波の波形の時間進化を天球面上の方向ごとに詳細に調べている。特に、局所的に大きな重力波強度が現れるための条件が理解され、いくつかの波長における線型成長因子の分布が得られた。第5章は論文全体のまとめと将来的な研究の方向性や見通しの提示に当てられている。</p> <p>一様等方性を備えた宇宙モデル以外ではインフレーションないしそれ以前の時期に由来する原始重力波を量子的初期条件から計算する方法が確立していない。特に本論文で論じているような三軸不等の一般的な非等方性がある場合には宇宙膨張を遡ると非等方性が発散する初期特異点に達し、それゆえに漸近的な断熱性を備える適切なモード関数系を構成することができず、その存在に依拠した標準</p>	

的な量子化の手続きに支障を来す。それに代わる考え方として本論文では、初期特異点の近傍ではなく非等方性の大きさが減少した後の時間帯で断熱的に振動する変数と時間座標の組み合わせを探索してその時期における量子状態空間を近似的に構成し、そのエネルギー準位を利用して量子場の状態を表現するという方針が立てられ、手法の実行可能性と有用性を確認した。実際に前インフレーションでの量子的真空状態と重力波の初期条件を一意的に決定するにはなお他の情報が必要となるが、それに向けた一歩ともなる知見である。

また申請者が指摘したように、この枠組みにおける量子化の困難の本質的原因の一つは宇宙膨張の非等方性が大きい時期に有効的な二乗振動数が負になり振動関数でなくなるモード関数が現れることであったが、密に関連した現象として、それらのモード関数の増幅ないし減衰抑制が起きる可能性がある。本論文では相対的に大きな振幅が得られるための条件を宇宙膨張の非等方性の度合いや前インフレーションの開始時刻といった背景時空の情報と、重力波の進行方向と非等方的膨張の三主軸との間の角度という理論パラメーターの組み合わせごとに精細に調べた。その結果、膨張が遅い主軸に近い方向から到来する重力波が初期値に対する強度比として相対的に大きな値を持つことが解析的手法および数値計算によって示され、全天での重力波強度分布という観測的情報から前インフレーション期の非等方性の度合いを読み取る可能性が提案された。

以上のように、本論文は前インフレーション期の存在を将来の重力波観測技術に基づいて検証するための一手法の理論的構築という宇宙物理学上の意義ある結果を体系的にまとめ上げており、学位申請者が学位授与に値する研究成果を挙げたことを示すと判断される。従って、学位論文として審査した結果を合格と判定する。

学位論文の基礎となる参考論文

- [1] Yu Furuya, Yuki Niiyama and Yuuiti Sendouda, “A quantisation procedure in the presence of an initial Kasner singularity: primordial gravitational waves from triaxially anisotropic pre-inflation”, *Classical and Quantum Gravity*, Volume 36, Number 8, 085007, 2019
- [2] Yu Furuya, Yuki Niiyama and Yuuiti Sendouda, “Probing pre-inflationary anisotropy with directional variations in the gravitational wave background”, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, Volume 2017, Number 01, 009, 2017