

氏 名	こ ばやし つとむ 小 林 努
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 2981 号
学位授与の日付	平 成 18 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	理 学 研 究 科 物 理 学 ・ 宇 宙 物 理 学 専 攻
学位論文題目	Braneworld Cosmological Perturbations (ブレーン宇宙摂動論)

論文調査委員	(主 査) 助教授 田 中 貴 浩	教授 中 村 卓 史	教授 畑 浩 之
--------	----------------------	------------	----------

論 文 内 容 の 要 旨

超弦理論等の近年の素粒子論の進展の方向性からは、高次元時空の存在が強く示唆されている。高次元の理論から4次元の宇宙モデルを構築する方法としてブレーンワールドシナリオの研究が近年進んでいる。現象論的にブレーンワールドシナリオとは、通常物質は4次元のオブジェクトであるブレーンに局在するが、重力は高次元時空中を伝播するとするシナリオのことである。重力相互作用に関しては0.1mm以下のスケールにおいては実験的検証がなされていないため、比較的低いエネルギースケールで高次元時空の効果が現れるようなモデルを考えても現在までの観測や実験と矛盾しない。このため、ブレーンワールドシナリオでは、将来のLHC等の加速器実験や宇宙論的観測で検出可能な特異な現象が起こる可能性が指摘されている。

本申請論文では、ブレーンワールドシナリオにおいて、宇宙の構造形成の種となった宇宙初期のインフレーション中における量子ゆらぎの生成について議論している。宇宙の初期ゆらぎに関しては、宇宙背景放射や将来の重力波観測等によって、詳細な情報がもたらされることが期待されている。したがって、初期ゆらぎの生成がブレーンワールドシナリオの場合に、通常の4次元の宇宙モデルと比べて、どのように異なるかを理解することは、シナリオの実験的検証のために極めて重要になる。特に、余剰次元が無限に広がっているタイプのモデル（以下ではRSモデルと呼ぶ）は、4次元の有効理論として扱うことができないため、通常の4次元の宇宙モデルと異なる新奇的な振る舞いの出現が期待される。それと共に、新たな解析手法の開発が必要となり理論研究の対象として興味深い。

宇宙初期に生成される量子ゆらぎは、密度ゆらぎと重力波ゆらぎに分類されるが、本論文では取り扱いが比較的容易な重力波ゆらぎに焦点を当て、その新たな解析手法の考案から、具体的なゆらぎのスペクトルの計算までが一貫して議論されている。通常の4次元のモデルでは、単純に常微分方程式を解くことでスペクトルを決定することが可能である。それに対してRSモデルの場合には場の方程式は境界のある偏微分方程式となる。更に、量子ゆらぎを考える場合には単純に適当な初期条件を与えて時間発展を求めればよいわけではなく、量子ゆらぎの計算を実行可能にするためには定式化の段階で工夫が必要となる。ここでは、場の方程式を解く条件を終状態として適当に与え、それを過去向きに解くことで欲しい物理量のみを計算するという方法で、大幅に計算量を減らすことに成功している。

本論文では、上記手法を用いた、解析的、数値的計算の結果として、主に2つのことを明らかにすることに成功している。第一は、インフレーション中の初期ゆらぎの生成に関するものである。この場合には、まず、解析的な方法で単純化されたモデルについて考察をおこない、4次元のモデルを用いた簡単な計算を適当な規則で読み替えることで非常によい近似スペクトルを与えることができるという予想を立てたのち、数値的にその予想が一般に正しいということを明らかにしている。この結論を得るに際して、本研究ではじめて可能となったゆらぎの量子論的な取り扱いが非常に重要であった。第二は、インフレーション後の宇宙の発展におけるスペクトルの進化に関するものである。この場合は、インフレーション中とは対照的に初期に古典的なゆらぎを与えた計算で十分に良い精度の評価を与えることができることを示している。その結果として、

これまで古典的な計算に基づいて主張されていた「輻射優勢宇宙での重力波ゆらぎの振幅の進化が4次元の標準的なモデルの場合と同様の結果になる」という主張が正しいことを明らかにしている。

論文審査の結果の要旨

近年ブレーンワールドの研究は盛んに進められてきたが、本質的な基礎過程の理解という点では多くの課題が残されている。精密な観測的宇宙論が進展する現在、宇宙論的摂動論の研究は重要な地位を占めているが、宇宙論的摂動論がブレーンワールドのシナリオの中でどのように変更されるかについては、いくつかの研究があるものの、依然、明らかでない点が多数存在する。申請論文では、宇宙初期のゆらぎの生成過程にまで踏み込んで宇宙論的摂動論を議論する枠組みを与え、具体的計算をおこなっており、このような研究は他に例がなく評価できる。

余剰次元が無限に広がっているタイプのブレーンワールドモデルは4次元的有效理論による記述ができないと考えられている。このため、4次元の標準宇宙論の場合と異なり、高次元時空中での摂動の発展を計算する必要が生じる。このような高次元時空中での摂動方程式を数値的に積分したという例は他にもあるが、申請論文では初期条件としての量子ゆらぎを取り入れることのできる手法を数値計算に始めて用い、インフレーション期とその後の発展までを系統的に調べている点で評価できる。

インフレーション期のゆらぎの生成に関しては、まず、解析的な手法を用いて、4次元の計算で得られた結果を読み替えるだけでブレーンワールドにおける重力波ゆらぎの振幅を評価できる簡便な関係式が成り立つという予想を与えている。更に、その予想が一般の場合にも成り立つことを数値的に証明している。この関係が何故成り立つのかは未だ明らかにされていないが、4次元的有效理論としての記述が近似的に成り立つということを示唆しており大変興味深く、また、簡便にゆらぎの振幅を評価する上で実用的にも有用であるという点で評価できる。

インフレーション期以後のゆらぎの発展に関しては、輻射優勢宇宙に接続される場合について数値的にゆらぎの発展を調べている。結果としては、量子論的に扱わなければ現れない効果は抑制されており、これまでの古典論的取り扱いと大きな差がないことが明らかになった。輻射優勢宇宙の場合には重力波ゆらぎのスペクトルは4次元の標準宇宙モデルと同じ冪を示し、区別がつかない。しかし、インフレーション直後の遷移時期を詳しく調べることで何らかの観測可能な効果が見えてくる可能性があり、今後の研究の発展が期待される。

参考論文は、ガウス-ボンネ項がある場合のブレーンワールドモデルにおけるブラックストリング解、及び、パイジャ解に関するもので、ブレーンワールドシナリオに関連した論文であり主論文とは密接な関係がある。

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られるものである。主論文、および、参考論文に報告されている研究業績を中心として、これに関連した研究分野について口頭試問した結果、合格と認めた。