

論文審査の結果の要旨

氏名 市 来 淨 與

本論文は、6章からなり、第1章は導入部で、現在の標準宇宙モデルが成功をおさめている点と問題点について言及した後、本論文の主要テーマである高次元膜宇宙模型の歴史的背景、数学的なモデル構築、および本論文の概要と目的について述べられている。

第2章では、余剰次元の存在から導かれる「暗黒輻射」と呼ばれる新しいエネルギー項に着目している。この項は宇宙のスケール因子 a に対して a^{-4} で減少していく。この物理量はバルク時空のエネルギー（曲率）を反映した量であり、数学的には正負両方の値をとりうる。論文提出者はこの項を含めて初期ビックバン元素合成期に生成される軽元素の量、および宇宙マイクロ波背景輻射揺らぎを数値的に計算して現在の観測と比較することにより、この項が正の量であった場合には小さな量しか許されないのに対して、もし負の量である場合には、より広い存在量の範囲が許されることを示した。さらには、そのような負の暗黒輻射の効果は、現在観測されているヘリウム (^4He) と重水素 (D) の間の不一致を解消させる方向へ働くことを明らかにした。

第3章では、現在の宇宙に存在している暗黒物質が、我々の膜宇宙に束縛された粒子と考えることの、宇宙論的な示唆を考察している。先行研究により、質量を持った全ての粒子の束縛状態は準安定であることが明らかにされていたが、論文提出者は冷たい暗黒物質がもっとも短い時間でバルクの次元へ「消滅」することがもっとも可能性が高いことを示し、「消滅する暗黒物質」という新しい仮説を提唱した。論文提出者は、宇宙の膨張則の変化と、バリオン密度と暗黒物質密度の比の時間変化を通じて、この新しいパラダイムへの宇宙論的な制限を課すことが可能であるとし、実際に95%の信頼度ですべての宇宙論観測と無矛盾であることを示した。暗黒物質の存在時間 Γ^{-1} の最尤値を含む 2σ の信頼領域は、 $15[\text{Gyr}] < \Gamma^{-1} < 80[\text{Gyr}]$ であった。この有限の寿命を示唆する結果は統計的には十分に有意であるとは現時点では言えないが、将来の精密化された観測により、高次元宇宙模型の観測的検証が可能になると期待される。

第4章では、宇宙背景重力波の境界条件を明らかにするために膜宇宙模型の因果構造を考察している。先行研究でしばしば用いられているガウス法線座標系では、バルク時空の有限な距離で重力波の方程式が特異点を持ち、大きな困難の一つであった。論文提出者は、この特異点が先行研究により既に存在が示されていた膜宇宙模型の「縫い目特異点」に対応することを示した。またこの因果構造の考察に基づき、ヌル座標を導入することにより、この特異性を回避しつつ発展方程式を解く数値計算法を開発した。

第5章では、第4章で構築した手法に基づいて数値計算を実行し、現在の宇宙での背景重力波のスペクトルを見積もった。論文提出者が新しく明らかにしたことは、 ρ^2 の項が卓越する初期宇宙においては、低エネルギーで我々の膜宇宙に閉じ込められているはずの重力波が高次元の重力波モードと結合することによりバルク時空へ逃げていくことである。結果として得られたエネルギースペクトルは、バルク時空の曲率半径に対応した現在での振動数より高周波側で、

標準宇宙模型の予言するものより弱くなる可能性があることを明らかにした。この結果は膜宇宙模型での最も信頼できる制限を与えるものの一つとなるものである。第6章では、膜宇宙模型の現時点での天文観測からの制限と、今後の展望についてまとめを行い、最後に詳細精密な天文観測が高次元を覗く新しい窓となると期待して、本文を結んでいる。

本研究の特色は、

1. 力の統一理論として芽生えつつある高次元宇宙モデルが、豊富な天文観測からの制限を満たすような宇宙モデルであるかどうかを、詳細に考察した点、
2. 高次元宇宙モデルでの宇宙論的摂動論という難問に対し、新しい座標系を持ち込むというアイデアを提案し定式化した。さらに、問題解決のために必要な数値計算コードの開発を通じて定量的な議論を初めて可能にした点

にある。

以上のように、本論文は、高次元宇宙論モデルの天文学的な検証可能性に関する新しい知見が得られていて、高く評価できる。

なお、本論文の第2,3章は梶野敏貴、八尋正信、Grant J. Mathews、Peter M. Garnavich、折戸学との共同研究であり、第4,5章は中村康二との共同研究である。また、Appendix Aは大栗真宗、高橋慶太郎との共同研究である。しかし、その多くは論文提出者を第一論文提出者とする論文としてまとめて出版されており、論文提出者の寄与は十分であると判断できる。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。