

論文審査の結果の要旨

氏名 宮本 幸一

本論文は9章からなる。第1章ではイントロダクションとして、初期宇宙における宇宙紐生成を示唆する理論モデルが紹介される。宇宙紐とは空間にひろがる幾何学的に細い紐状の位相欠陥のことであり、急激に膨張冷却する初期宇宙の相転移の結果として生成され得る。最近では高次元時空を取り扱う数理論理学でも膜宇宙の衝突により生成されると示唆されている。宇宙紐は重力波や宇宙背景放射の偏光などに特徴的な痕跡を残すと考えられており、将来の検出可能性が期待される。第2章では宇宙紐の生成機構をスカラー場の発展を中心に具体的に解説し、また第3章では生成された宇宙紐の力学的進化を論じている。宇宙紐は生成後に互いに衝突やつなぎ替わりを繰り返しながら、全体として複雑なネットワーク構造を形成する。この過程で重力波を爆発的に放出し、また宇宙を飛び交う背景放射の経路を曲げることで特徴的な揺らぎを誘起する。ここで重力波とマイクロ波背景放射の観測により宇宙紐の性質を解明するという本研究の目的が提示される。

第4章では宇宙紐が形成する閉じたループを解析的に取り扱い、典型的ループサイズと宇宙紐の張力や重力波放出効率との関係を明らかにする。

第5章では宇宙紐の運動により生成放出される重力波の強度や波形が求められる。宇宙紐はつなぎ替わりなどによりループやカスプといった特徴的な構造を作り、それらが空間内を運動したりまた消滅したりする際に爆発的に重力波を放出する。宇宙紐ループの数密度や消滅率から重力波放出の頻度を求め、現在の宇宙の観測者点でどれくらいの振幅の重力波を観測することができるかを具体的に計算した。さらに第7章以降の将来観測のための一般論を展開する。

第6章では多数の宇宙紐がマイクロ波背景放射に及ぼす影響を詳細に論じている。はじめに個々の宇宙紐が光子の伝搬に及ぼす影響を解説する。次に、解析的に取り扱うことのできるUSMモデルを導入する。USMモデルでは長く連なる宇宙紐は多数の短い直線状のひもの集まりとして表現され、宇宙紐による重力レンズ効果等を計算することが可能である。より詳細な直接数値シミュレーションの結果と比較した上で、USMモデルにより宇宙紐がマイクロ波背景放射の異方性や偏光に及ぼす影響を十分な精度で推定できると結論づけている。さらに、

マイクロ波背景放射の揺らぎのスペクトルを具体的に求め、将来の観測により検出可能なパラメータ領域を明らかにした。

第7章では将来の地上重力波観測ネットワークにより宇宙紐を検出し、その性質を探る方法が提案される。宇宙紐を特徴づける3つのパラメータ（ループサイズ、張力、結合確率）をそれぞれ変えたモデルに対して重力波強度を計算し、KAGRAをはじめとする次世代の重力波検出装置による観測で制限を与えることのできるパラメータ領域を明らかにしている。

第8章では地上・宇宙における重力波観測、マイクロ波背景放射の偏光観測、および電波観測によるパルサータイミング計測を組み合わせて宇宙紐に関する上記のパラメータを推定する方法を提案する。多変数フィッシャー解析を行い、種々の前景ノイズなどが除去でき、10年にわたって重力波観測を行う理想的な状況では宇宙紐の各パラメータを数十パーセント程度の精度で特定できると結論づけている。第9章において結果を総括するとともに、宇宙紐の性質解明への展望を考察した。

なお、本論文第7章と第8章の一部、将来の観測によるパラメータ制限に関する部分は黒柳幸子氏、関口豊和氏、高橋慶太郎氏、Joseph Silk氏との共同研究をもとにしているが、地上・宇宙における重力波観測、マイクロ波背景放射の偏光観測、および電波観測によるパルサータイミングの測定を全て組み合わせた統計的解析を行うという着想は論文提出者本人が得たものである。それぞれの観測に対して観測量を理論的に計算し、多変数フィッシャー解析を行う作業も論文提出者自身が行った。最終的に宇宙紐を特徴づけるパラメータ間の縮退に考察を与え、論文提出者のオリジナルな成果であると認められる。

素粒子や初期宇宙進化に関する多くの理論モデルにおいて宇宙紐の生成可能性が指摘されており、その存在を観測的に明らかにすることや、現在の宇宙での存在量に制限を与えることは宇宙論分野の重要な課題の一つである。本論文は重力波バーストや背景放射偏光といった宇宙紐に固有の痕跡に着目し、典型的ループサイズや張力など宇宙紐を特徴づける基本的な性質を推定する方法を提案した。計画されている将来の重力波観測に大きな示唆を与え、素粒子物理学と宇宙論にまたがる重要問題に迫る研究成果である。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。