

論文審査の結果の要旨

氏名 北嶋 直弥

本論文は 5 章および 4 つの補遺から成る。第 1 章では現代宇宙論の謎の一つであるダークマターについて最近の観測事実を概観し、宇宙初期に形成される原始ブラックホールをダークマターの候補として紹介する。さらに、原始ブラックホールが宇宙初期の密度揺らぎから形成される際には、同時に重力波も生成されることを指摘し、将来の宇宙衛星による重力波観測や地上電波望遠鏡によるパルサー天体の観測を通して重力波が検出可能であると述べる。これらの将来観測への展望が本論文の研究の動機付けとなっている。

第 2 章では初期宇宙における密度揺らぎの生成機構としてカーバトン模型が紹介される。カーバトンとは振動するスカラー場のことであり、宇宙の構造の起源となる密度揺らぎを生成することができる。本章では、宇宙創生直後のインフレーション期が終焉する頃にカーバトンが支配的になる理論モデルを提案し、そのようなモデルでは波長が小さいものほどその振幅が大きくなる密度ゆらぎが生成され得ることを示す。さらにカーバトンポテンシャルが巾乗および複素関数で与えられるモデルに対し、パワースペクトル指数を具体的に導く。これらの結果は以降の 2 つの章で用いられる。

第 3 章ではカーバトン模型におけるブラックホール形成を解説している。はじめに、様々な宇宙観測から得られた原始ブラックホール存在量に対する制限を詳述する。これまでの観測からは、25 桁以上にもわたる広い質量領域について、原始ブラックホールが現在の宇宙のダークマターの主要な要素となる可能性は低いという結論が得られている。しかし、いくつかの質量域においては天文学的観測の解釈に理論モデル依存性が付随する。本章では特に月質量あるいはそれ以下の質量の原始ブラックホールに着目し、その存在量に対する観測的制限は弱いと論ずる。そして、第 2 章で提案したカーバトン模型について、生成される原始ブラックホールの質量や生成量を具体的に計算し、ダークマターの主要な要素となり得ることを示した。さらに、太陽質量の 1 万倍以上のブラックホール形成可能性を考察し、数密度は極めて小さいが、最近の遠方宇宙の観測により発見された非常に稀な超巨大ブラックホールの種となりうることを示した。

第 4 章では、カーバトンにより生成される初期曲率揺らぎを源とする重力波に着目する。本論文で考察する巾乗ポテンシャルや複素ポテンシャルに対しては、波長が短いほど大きな振幅を持つ曲率揺らぎが生成されるため、摂動の 2 次の項を考慮する必要がある。論文提出者は詳細な解析的計算を行い、これら二つのモデルに対して重力波スペクトルを正確に求めた。結果として、カーバトンの崩壊時にちょうど宇宙の地平線サイズの波長をもつ重力波が最も大きな振幅をもつことを示し、将来の宇宙重力波観測によりスペクトルを測定することができれば、崩壊率などカーバトンの特徴づける諸量についての情報が得られると結論した。さらにある種のカーバトンの場合には、電波観測によるパルサー天体のモニタリングから重力波を検出可能であることを明らかにした。

なお、本論文第 3 章は川崎雅裕氏、柳田勉氏との共同研究をもとにしているが、カーバトンにより生成されるブラックホールの質量と存在量は論文提出者自らが計算した。さらに広いパラメータ領域での制限を導き、宇宙物理学的示唆を議論したのも論文提出者である。また、第 4 章は川崎雅裕氏、横山修一郎氏との共同研究をもとにしている。摂動の第 2 次項まで含めた重力波生成の計算は先行研究により示され、共同研究者横山氏との議論を通して着想を得たものであるが、巾乗ポテンシャルやアクシオン様の複素ポテンシャルを具体的に設定して計算したのは論文提出者であり、重力波の振幅とカーバトンの崩壊率との対応に考察を与え、将来の宇宙重力波衛星と地上電波観測を組み合わせた制限を導く手法は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カーバトン模型が議論されており、その存在を観測的に明らかにすることや、崩壊率や揺らぎのスペクトルなどを測定することは宇宙論分野の重要な課題の一つである。また、現在の宇宙のダークマターのエネルギー密度や初期宇宙における超巨大ブラックホールの存在はそれぞれ宇宙論、天文学のもっともホットな研究テーマに数えられる。本論文は原始ブラックホール形成や重力波生成といったカーバトン模型に固有の機構に着目し、密度揺らぎの振幅や崩壊率などカーバトンの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。