

論文審査の結果の要旨

氏名 塚田 怜央

本論文は7章および補遺からなる。第1章はイントロダクションとして、一般相対性理論から導かれる重力波の性質やその実験的検証の歴史的な経緯がまとめられている。2015年の重力波初検出により幕を開けた重力波宇宙物理学の急速な進展について紹介し、レーザー干渉計 LIGO の概要と、2015年より行われている観測の諸元をまとめている。特に本論文の解析に用いる LIGO 稼働初期の O1, O2 ランについてはその詳細を記す。さらに第1章の最後では、本研究の探索対象である軽いボソン粒子について、素粒子物理学における重要性や宇宙のダークマターとなる可能性を紹介している。

第2章では背景重力波に着目し、その起源や統計的性質を論じる。これまでに検出された重力波は中性子星連星の合体など、特定の天体から放出されたものである。これらは一般に振幅が大きく、個々のイベントとして検出される。一方、将来の高感度重力波検出器では、様々な源から放出され、現在の宇宙に飛び交う微小な重力波の重ね合わせとして現れる「背景重力波」を検出することが可能であると考えられている。本章で、稼働中の LIGO を用いて背景重力波を探索するための手法を紹介し、特に波形フィルタリングや複数検出器を用いた相関解析など、本論文で重要となる手法について定式化している。

第3章では軽いボソン粒子に着目し、ブラックホール(BH)とボソン粒子群から成る系から放出される重力波を考察する。ここで重要となる物理機構が超放射不安定性と呼ばれるものである。回転する BH 周辺に有質量のボソンが存在する場合、特定の波数状態が増幅され、BH に極めて近い領域に集積したボソン雲を生成する可能性がある。ボソン雲はブラックホールの回転を遅め、同時に連続的な重力波を放出することが理論的に示唆されている。そのような BH-ボソン系が宇宙に多数生成されれば、それらから放出される重力波が積み重なり、現在の宇宙で背景重力波として残存する。複数の重力波検出器による観測により背景重力波を検出し、その振幅や波形からボソン粒子の質量や BH のスピン分布などの物理量を推定するという本論文の目標がここで提起される。

第4章では背景重力波の波形や振幅を理論的に求める。はじめに、星の進化の最終段階に残される BH や、BH 同士の合体により生ずる重い BH を考慮し、

BH の数密度進化を計算する。このためにこれまでの天文観測から得られた宇宙の星生成史をもとに、多数の銀河の中で星生成の後に残される BH 種族を積算する。最後に、スカラーボソンやベクトルボソンなど、軽いボソン粒子の理論モデルと粒子質量を具体的に定め、BH-ボソン系から生ずる重力波の振幅と周波数依存性を求めた。

第 5 章ではベイズ統計学に基づき、背景重力波の観測からボソン質量や BH スピンの分布を推定する手法を考案する。論文提出者が開発したデータ解析ソフトウェアを LIGO のデータパイプラインの最下層に組み込み、実データ解析に使用できることを確かめる。続いて第 6 章では、LIGO のノイズ特性や第 4 章で求めた背景重力波シグナルを用いて模擬観測を繰り返し、統計解析に必要な諸量を求める。最後に、LIGO の O1, O2 ランの実データを解析し、 10^{-13} エレクトロンボルト程度のボソン質量域に新たな制限を与えた。

第 7 章では、ここまで得られた成果を総括し、自ら提案したパラメータ推定法の性能と精度を考察した上で将来展望を述べている。本論文では、アクシオンなどの宇宙に存在し得る軽い粒子を探索する新たな手法を提案することができた。将来得られる重力波観測データや天文観測、地上実験などからのデータを統合解析し、それら粒子の性質に迫ることができると結論する。

なお、本論文第 4 章および第 6 章は Richard Brito, William East, Nils Siemonsen の三氏との共同研究をもとにしている。超放射機構による BH-ボソン系からの重力波の探索についてはこれらの共同研究者との議論に基づいている。しかし第 4 章で BH 種族モデルを構築し、期待される背景重力波シグナルを計算したのは論文提出者である。また第 6 章で BH スピンやボソン質量についての事前確率を様々に変えてのパラメータ推定を行ったのも論文提出者である。パラメータ推定精度チェックを行い、各種バイアスの有無を確かめ、LIGO の実データ解析によりボソン質量に制限を与えるなど論文提出者のオリジナルな成果であると認められる。

2015 年の初検出以降、ブラックホールなどのコンパクト天体からの重力波イベントが次々と検出され、重力波物理学が大きく進展している。重要課題の一つである背景重力波に着目し、軽いボソンを探索する本研究は、現在稼働中および将来の重力波検出器を用いた観測に大きな示唆を与えるものである。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。