

論文審査の結果の要旨

氏名 石徹白 晃治

本論文は、「Search for low-frequency gravitational waves using a superconducting magnetically-levitated torsion antenna (超伝導磁気浮上型ねじれアンテナを用いた低周波重力波の探索)」の実験研究を、9章からなる英文で記述したものである。

第1章で序論として概要と本論文の構成を述べ、第2章で重力波および重力波検出の基礎事項と低周波重力波天文学の背景と現状を説明している。第3章で超伝導磁気浮上ねじれアンテナの基礎事項を説明し、第4章で開発した超伝導磁気浮上で非接触支持されたねじれ振り子を利用した新しい地上低周波重力波検出器(超伝導磁気浮上型ねじれアンテナ)のプロトタイプについて述べている。第5章でアンテナの性能評価実験、第6章で重力波探査実験データ取得、第7章で PSR J2144-3933 起源の連続重力波の探査、第8章で背景重力波の探索について述べ、第9章で結論をまとめている。

重力波は現在まで直接検出された例が無い。重力波の直接検出は、一般相対性理論の検証になるだけでなく、通常の光では見る事のできない星のコアのダイナミクスや晴れ上がり以前の宇宙の様子を直接観測する重力波天文学の開拓にもつながる。特に、低周波(1 mHz - 1 Hz) 帯域は、初期宇宙で発生した重力波や、中間質量または超巨大ブラックホールに起因する重力波などが予言されているが、この低周波域に感度を持つ重力波検出器は現在存在せず、いくつかの宇宙空間を利用した低周波重力波検出器の提案があるのみである。宇宙重力波検出器には多数のリスクが伴い、かつ稼働時間の制限の現実問題も予想されるため、地上で低周波に感度を持つ重力波検出器の開発が重要と考えた。

このような背景・動機のもと、本研究では、超伝導磁気浮上型ねじれアンテナのプロトタイプを東京大学本郷キャンパスに開発作製し、超伝導磁気浮上で非接触支持された棒状試験質量の力学特性の測定と、デザイン雑音レベルでの動作の検証を行った。プロトタイプアンテナは、超伝導磁気浮上により非接触支持された逆 T 型の棒状試験質量が重力波により回転する効果を、レーザー干渉計で測定する構成になっている。超伝導磁気浮上は、試験質量の上部に取り付けられた永久(ネオジウム) 磁石とその上に置かれた超伝導体の相互作用で実現されている。

作製されたねじれアンテナに対して、力学的特性(回転自由度のダンピング定数 γ とバネ定数 κ) を、棒状試験質量(質量 131 g) の自由減衰振動を測定して調べた。その結果、 $\gamma = 1.2 \pm 0.7 \times 10^{-8}$ Nms/rad と $\kappa = 3.6 \pm 2.1 \times 10^{-7}$ Nm/rad を得た。これらの値は、50 g 程度の負荷を与えた時のタングステンワイヤーとほぼ同程度であり、通常のワイヤーでは難しい大きい支持力と小さいダンピング定数を両立できた。ダンピング定数は残留ガスの影響で制限されていると考えられる。バネ定数は共振周波数 5 mHz に対応しており、

目指す観測帯域 $0.1 - 1 \text{ Hz}$ から考えると十分な値であった。次に、プロトタイプアンテナの雑音の評価を行った。測定及びモデル計算を行い、磁場カップリング雑音と地面振動雑音で制限されるデザイン雑音レベルで、アンテナが動作していることを検証した。

開発したプロトタイプアンテナは、低周波数帯($0.1 - 1 \text{ Hz}$) で感度を持つ現在唯一の重力波検出器であるので、2009 年夏に実際に運転を行い重力波探査を試みた。観測データの中から連続かつ安定している 320 分のデータを用いて、周期 8.51 秒というデスラインを超える周期を持ちながら電波を放出する特異パルサーの一つである PSR J2144-3933 起源の連続重力波と、 0.2 Hz のバンド幅 10 mHz で背景重力波を探索した。

その結果、有意な重力波信号を検出できなかったが、連続重力波の振幅と背景重力波のエネルギー密度の上限値をこの周波数帯で初めて評価することができた。PSR J2144-3933 起源の連続重力波の振幅に関して、頻度主義的上限値 2.8×10^{-9} とベイズ的上限値 8.4×10^{-10} を得た。背景重力波に関しては、 $h_0^2 \Omega_{\text{gw}} = 8.1 \times 10^{17}$ という頻度主義的上限値を得た。

以上、本論文の内容は、重力波観測・重力波天文学研究における有意義な開発と新しい周波数領域での計測実験を達成したことについて、博士論文として高い評価に値すると判断される。

なお、本論文の研究内容は指導教官らとの共同研究であるが、測定装置の整備・運転、実験の計画と遂行、結果の解析など、研究の大部分は論文提出者が主体となって行ったものと判断される。

よって、論文審査委員会は全員一致で博士(理学)の学位を授与できると認めた。