

論文審査の結果の要旨

氏名 阿久津 智忠

本論文では、100 MHz の重力波に感度を持つレーザー干渉計型検出器を開発と、それを用いた重力波背景放射の探査について述べられている。重力波の存在は、連星パルサー PSR B1913+16 からの電波パルス周期変化の観測から間接的に確認されているが、直接観測に成功した例はない。第 1 章では本研究の背景として、重力波の源として超新星爆発や連星の運動のようなものから、初期宇宙に起源を持つ宇宙背景放射まで様々なものがあること、いくつかの理論からは、超高周波に大きな成分をもつ重力波背景放射が予言されていることなどが述べられている。第 2 章では、以降の論理展開に必要な数式が整備されている。

従来のマイケルソン干渉計では重力波の波長が検出器のサイズよりも小さくなると感度が低下するが、本論文のシンクロナス・リサイクリング干渉計では、四枚の鏡で構成される L 字のリング型光共振器の中で、重力波の効果を光の位相に蓄積する。重力波の周期がこの光共振器を光が一周する時間と等しいときに、この蓄積効果が最大となり、その周波数の重力波に対して共振的な感度を持つ。第 3 章では、これらのシンクロナス・リサイクリング干渉計の原理、重力波に対する応答と重力波検出器としての感度が導出されている。雑音源としてショットノイズのみが考慮されており、干渉計の共振特性を反映して、共振周波数で雑音が低下し、微弱な重力波を検出できることが示されている。

シンクロナス・リサイクリング干渉計を実際に重力波検出器として稼働させるために不可欠な信号を取得する方法は、4 章に展開されている。まず、従来の Fabry-Perot 共振器の制御と同様な Pound-Drever-Hall 法で光共振器の制御ができることが示され、次に干渉計から重力波信号を取り出す方法として、光共振器を制御するのに必要な radio frequency sideband を、重力波 sideband に対する local oscillator として流用して、100 MHz の重力波信号を 15 MHz 程度の中間周波数の電気信号に変換している。

第 5 章では、シンクロナス・リサイクリング干渉計の開発とその性能について述べられている。Pound-Drever-Hall 法を用いて、レーザー光が共振器内で安定に共振を保ち続ける状態に制御（ロック）できることが確認され、2 台の干渉計ともストレイン振幅に換算

して $10^{-16}\text{Hz}^{-1/2}$ 程度の雑音レベルを達成している。本干渉計の基本概念は 1980 年代に Drever によって提案されていたが、本論文により初めてその動作が確認された。これまで、100 kHz を超えるような高周波の重力波を直接観測する試みは Cruise たちの実験のみであるが、本論文の達成した単体感度は、Cruise たちの検出器を二桁程度上回っている。

第 6 章では、二台の重力波検出器から得た信号の相互相関をとり、重力波への感度を相対的に向上させる手法について述べられている。単純に二つの出力の相互相関を計算するのではなく、低周波重力波検出器の解析で用いられているような optimal filter が、高周波に拡張し導入されている。観測時間は約 1000 秒で、観測に用いた信号帯域幅は 100.1 MHz のまわりの 2kHz である。最終的に得られた相互相関関数の推定値は約 4.9×10^{-12} となり、その推定の標準偏差は 3.7×10^{-12} となった。この推定値は、両方の干渉計の出力が互いに無相関なノイズに支配されているとしたときの値にほぼ一致し、100 MHz 付近の背景重力波の upper limit として $h_0^2 \Omega_{gw}(f) < (6.0 \pm 1.2) \times 10^{25}$ を得た。ただし、upper limit は、片側 90%信頼区間で定義してある。なお $h_0^2 \Omega_{gw}(f)$ は、単位 logarithmic 周波数あたりの重力波のエネルギー密度を宇宙の臨界密度で割った値である。 h_0 は、規格化されたハッブル定数を表す。第 7、8 章では、考察・今後の課題・本論文のまとめが述べられている。

本研究では、Drever によって提案されていたシンクロナス・リサイクリング干渉計を開発し、Pound-Drever-Hall 法を駆使して、世界で初めて安定した動作に成功した。これにより、100MHz において大幅な重力波の検出感度向上を実現した。また、論文では、実験に必要な理論的検討・評価が詳細に行われている。

なお本論文は、藤本真克、川村静児ら計 13 名との共同研究であるが、論文提出者が主体となって研究を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。本論文は重力波天文学の進展に顕著な貢献をするものであり、博士（理学）の学位を授与できると認める。