

# 論文審査の結果の要旨

氏名 有富 尚紀

本論文は9章からなる。第1章は、イントロダクションである。第2章では、一般相対性理論から理論的に重力波を導出し、重力波の波源となる主な天体现象が紹介され、Advanced LIGO や Advanced Virgo 重力波望遠鏡による連星ブラックホール合体、及び連星中性子星合体からの重力波の観測の歴史と、将来の国際的重力波観測ネットワークについて述べられている。第3章では、レーザー干渉計型重力波望遠鏡の動作原理と光学的構成、及び、高感度化のための技術的工夫が解説されている。さらに、レーザー干渉計型重力波望遠鏡の感度を制限する主な雑音源として、光の量子雑音、地面振動雑音、熱雑音が説明され、現在の各重力波望遠鏡で目標とされる感度曲線が、これらの雑音要素に分解された形で紹介されている。第4章では、まず、光の量子状態に関する理論的解釈に続き、特に本論文で核となる光の Squeezed 状態の性質、Optical Parametric Oscillator (OPO)を用いたその創出方法、Squeezing Angle を制御する Coherent Control が解説されると同時に、この Squeezed 状態を悪化させる主な原因を紹介している。第5章では、実際のレーザー干渉計型重力波望遠鏡の構成における光の量子雑音の詳細な性質が説明されている。特に、Ponderomotive Squeezing により、レーザー干渉計型重力波望遠鏡の高周波側を支配する Shot 雑音に対して、低周波側の感度を支配する光輻射圧雑音では、Squeezing Angle Rotation が発生しているため、従来の全周波数帯域で位相方向だけに Squeeze された真空場を生成する“周波数非依存 Squeezing”技術では、返って、低周波側の光輻射圧雑音を悪化させる問題があることが説明されている。そして、この Shot 雑音と光輻射圧雑音の二つの量子雑音を同時に低減する方法として、高周波側で位相方向に、低周波側で振幅方向に Squeeze された、周波数依存性のある Squeezed 光を生成する“周波数依存 Squeezing”技術の開発の必要性が説明されている。それを可能にする一つの方法として、周波数依存性のない Squeezed 光を、適切なフィネスを持つ Fabry-Perot 共振器(フィルター共振器)に反射させることで周波数依存性を持たせる方法が紹介されている。第6章以降から、実験的成果が説明されている。第6章では、複数の周波数同期されたレーザー光源、第二高調波発生器、OPO、モードクリーナーを組み合わせ、さらに低雑音なホモダイン検出器を開発することで、Squeezing レベルが $-5\text{dB}$ に達する Squeezed 光源の開発に成功したことが説明されている。さらに、Squeezing レベルを制限するロスの構成とその寄与の割合についても考察されている。第7章では、実際に300 mの基線長を持つ、振り子構造により防振された鏡二枚で構成される Fabry-Perot 共振器をフィルター共振器として用いることにより、世界で初めて、100 Hz 以下で Squeezing Angle Rotation が発生する周波数依存 Squeezed 光源の開発に成功したことが述べられている。まずこの点で十分な学術的価値を認めることができる。第8章では、

第7章で用いられた従来のフィルター共振器の制御では、フィルター共振器の共振器長揺らぎ、アラインメント揺らぎ、および detune 周波数の揺らぎを十分抑制できない問題点があることが指摘されている。この問題点を改善する方法として、本論文提出者自身が新たに考案したコヒーレントコントロール光を使ったフィルター共振器の制御手法が説明されている。そして、実際にこの制御手法を用いることで、共振器長揺らぎが 3.4 ピコメートルから 0.75 ピコメートルまで低減された周波数依存 Squeezed 光源が実現できたことが報告されている。この点でも、十分な学術的価値を認めることができる。第9章では、第7章と第8章の成果がまとめられるとともに、本提案手法により、重力波望遠鏡の感度は 50%程度向上し、重力波の検出頻度は 3倍以上向上すること、及び、第三世代重力波望遠鏡においても、本提案手法がその感度向上に寄与できるという結論に至っている。

なお、本論文第6章と第7章は、共著者のうち、主に Y.Zhao 氏, E.Capocasa 氏, M.Leonardi 氏との共同研究であるが、本論文提出者も同等の貢献で装置開発と性能評価を行ったものであり、本人の寄与は相応にあると判断する。一方、第8章も同諸氏との共同研究ではあるが、論文提出者の独自の発案にもとづき主体的に行った立証実験であり、十分な寄与があると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。