

論文審査の結果の要旨

氏名 中野雅之

重力波検出はアインシュタインの最後の宿題とも呼ばれ、一般相対性理論の検証として今世紀の物理学の最重要課題の一つである。KAGRA 実験は岐阜県飛騨市神岡町の地下に建設中で、2019年に本格稼働を目指す世界初の地下低温重力波検出器である。全長3kmの直交するアームを2本有するKAGRA検出器はレーザー光を用いた干渉計で、世界最高級の感度を持つ。KAGRAは地球から140Mpc離れた所で起こる中性子星系の合体により生ずる重力波検出を目指している。

本論文は、世界初の地下低温重力波検出器KAGRAの重要な構成要素のひとつである入射光学系の開発に関する研究である。

本論文は5章からなり、第1章は導入部で、重力波に関する理論的導入、重力波検出器の検出原理に関する説明、重力波の発生源となる天体现象の紹介、世界の重力波検出器と重力波観測に関するレビュー、KAGRA実験の意義と本論文の研究動機とその目標について、第2章はKAGRA重力波検出器の全体像の解説と入射光学系の構成要素に関する詳細について、第3章はKAGRA重力波検出器の入射光学系の開発及び実装について、第4章は本論文の目玉である入射光学系の周波数安定化について、第5章は結論について述べている。

2015年に米国のadvanced LIGO実験が2台の重力波検出器を用いてブラックホール合体から生じた重力波を世界で初めて検出し、その後イタリアにあるadvanced VIRGO重力波検出器との合同観測も含めて、現在まで6回の重力波事象が観測されている。KAGRAの感度は、10Hz以上では先行する3台の重力波検出器と同等、10Hz以下では世界最高感度となる予定である。KAGRAは前述の3台の重力波検出器とともに4台目の重力波検出器として国際重力波観測網の一翼を担い、2019年に予定されているO3観測に参加予定である。重力波源の天体と特定するためには最低3台の重力波検出器が必要である。KAGRAが国際重力波観測網に参加することにより、地球上で3台以上の重力波検出器が稼働している確率が50%から80%に増大する。また、4台の重力波検出器を利用することにより、角度分解能が 30.5 deg^2 から 9.5 deg^2 に改善される。

KAGRAのデザイン感度を達成するためにはいくつかの雑音源の低減が必要

不可欠となる。そのなかでも入射レーザー光に含まれる周波数雑音、強度雑音、ビームジッター雑音等が主要な雑音源となる。入射光学系の役割は、低雑音のレーザー光を主干涉計に供給することである。入射光学系はレーザー光の周波数安定化、強度安定化、ビームジッター低減、空間モードクリーニングを行う。

論文提出者は、入射光学系の重要な構成要素である **Pre-Stabilized Laser (PSL)**及び **Input Mode Cleaner (IMC)**の設計、実装、検査・調整、及び統合を行った。PSLはビーム安定化のために空気中にある光学系であり、IMCは3個の懸架鏡から成る周回長 50m の光共振器である。PSL と IMC は入射光学系の主要部分であり、レーザー光安定化を行うためのほとんどすべての役割を担っている。また、本論文の主要テーマは、入射光学系のなかで最も重要なシステムのひとつである **Frequency Stabilization System (FSS)**の実装と検査・調整である。FSSには、2つの要求仕様がある。ひとつは **duty cycle** が 95%以上であること、もうひとつは周波数雑音が 100Hz において $1\text{Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下の条件を満たすことである。この雑音レベルに関する要求仕様は、周波数雑音が他の根源的な量子雑音、熱雑音、地面振動雑音よりも低レベルになるように設定されている。FSS の制御の自動化に成功し、約 1 週間システムロック状態を保った。もしもロックが失われても 1 分間以内にロックは復旧するので、1 週間に 1 回ロックが外れたとしても **duty cycle** は 99.99%となり、要求仕様の 95%を満たす。また、数個の伝達関数を用いて FSS の各アクチュエーターの校正を行い、FSS のモデルを構築した。そのモデルを用いて、実際の KAGRA が稼働した場合の周波数雑音のシミュレーションを行った。そのモデルに基づく **noise budget** を作成し、周波数安定性の限界を決める雑音成分の特定に成功した。そして、天体事象からの重力波検出が予想される 1 kHz 以下の周波数帯域において、FSS は周波数雑音レベルの仕様を満たすことが判明した。

以上のように、本論文は KAGRA の入射光学系の FSS の開発に関する研究である。2019 年に予定されている世界重力波観測網の O3 観測に参加する大きなステップをクリアしたことになる。本開発研究は、宇宙線物理学及び宇宙物理学実験の重要なテーマのひとつである重力波観測の発展に大きく貢献するものである。

なお、本論文の実験は KAGRA 実験という大規模なグループ実験であるが、論文提出者が主体となって開発した入射光学系は KAGRA 検出器の要の一つとなる要素であり、論文提出者が主体的に行った研究である。従って、論文提出者の KAGRA 実験及び論文に関する寄与が十分であると判断した。また、共同実験研究者から論文内容の結果を学位論文として提出することについて了承を得ているものであることを確認した。

従って、審査員一同は博士（理学）の学位を授与できると認める。