論文審査の結果の要旨

氏名　　榊原裕介

現在、わが国では東京大学宇宙線研究所が中心となって、レーザー干渉計型大型重力波検出器 KAGRA を岐阜県神岡鉱山の地下に建設中である。KAGRA は１つのアーム長が 3 km の長さをもつマイケルソン干渉計で、欧米で進行中の同様のプロジェクトとともに、宇宙からの重力波の初検出と重力波天文学の創生を目指している。KAGRA ではレーザー干渉計の反射鏡を極低温（20 K程度）まで冷却することによって熱雑音を低減し、重力波に対する究極的な感度を達成することが重要な課題となっている。榊原氏は、KAGRA の冷却システムの実現のための２つの研究を行った。一つは、冷却系の熱モデルの構築と放射冷却を利用した冷却時間の短縮の実現、もう一つは、反射鏡への熱流入を抑制するためのダクトシールドの設計とその実験的検証である。

論文は全体で６つの章よりなる。第１章のイントロダクションに引き続いて、第２章では重力波の基本的理論と検出原理について、第３章では、冷却技術に関する理論的・実験的背景をレビューしている。第４章で、実際に KAGRA の冷却系の熱モデルの構築と、放射冷却を活用した冷却時間の短縮実験について、第５章でダクトシールドの熱雑音、反射雑音の設計と KAGRA における実験的検証について、それぞれ述べている。第６章は全体の結論であり、将来への展望が併せて示されている。

先に述べたように、KAGRA では、マイケルソン干渉計の反射鏡を極低温に冷却して運用する。マイクロ波干渉計の光路（3 km のアーム）は高真空に保たれるが、それでも反射鏡への水分子の吸着が避けられない。水分子の吸着は反射率を低下させ、従って重力波に対する感度を低下させるので、1 年に 1 回程度の頻度で反射鏡を常温に戻し、吸着した水分子を除去しなければならない。しかし、一旦常温に戻すと再び極低温まで冷却するのに 2 ヶ月程度を要するため、その間は重力波の観測ができない。このデッドタイムをできるだけ短くすることは、KAGRA にとっての一つの大きな課題であった。

榊原氏は、振動の伝達の影響がなく、かつ、機械制御が不要な放射冷却を活用することに着目し、冷却システムに熱放射率の大きい物質でコーティングすることを考えた。コーティング剤としては真空中でのアウトガスの性質などを考慮して、ダイヤモンド様炭素（DLC）を採用した。まず、小型の簡便な装置を用いて、その効果をシミュレーションと実験で確認した後に、KAGRA の冷却系に適用した。まず、その熱モデルを構築し、DLC のコーティングが有効に働くことを予想し、実際に KAGRA を用いた測定でそれを実証した。その結果、60 日程度だった冷却時間を 40 日程度まで短縮することができた。これは、KAGRA の時間稼働率を 71%から 77%に向上させることを可能にし、突発的重力波イベントに対する対応力を高めることにつながるものである。この研究のもう一つの重要性は、KAGRA の冷却系の熱モデルを構築したことにある。実際の冷却曲線はモデルによるシミュ

レーションと非常によく対応してており、モデルが物理的本質をよく捉えていることを意味する。従って、このモデルは将来の KAGRA の冷却系の改良や、将来の重力波検出器の開発の基礎となり得るばかりか、DLC の放射率の測定自体は、物性物理学実験を始めとする様々な分野にも有用な情報と言える。

榊原氏は、上記の成果に加えて、冷却した反射鏡にマイケルソン干渉計のアーム部からの放射による熱流入を最大限抑制するためのダクトシールドの設計と実験的評価を行った。ダクトシールドの設計にあたっては、外部からの熱放射とともに、反射鏡でのレーザー光の反射散乱光による雑音低減を考慮する必要がある。レイトレースの手法を用いて最適化構造のシミュレーションを行い、実際に KAGRA に搭載してその有効性を実証した。

榊原氏は、物理学に関する強い基礎力をもとに、シミュレーションと実験を結合した研究を推進し、KAGRA における冷却系の特性評価と改良に成功し、大型冷却重力波検出器の実現に貢献した。この研究は、KAGRA チーム、特に冷却系チームとの共同研究であるが、本研究の内容は論文提出者が主体となって考案し、実行したものであり、本人の独創性と寄与が十分認められる。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。