

# 論文審査の結果の要旨

氏名 マヌエル マルキオ

重力波検出実験は、数 km にもわたる非常に長い基線長を持つレーザー干渉計を構築し、その基線長のわずかな変動を測定することで重力波を検出する。その際の主要なノイズ源が、干渉計の鏡の熱雑音である。日本で現在建設が進められている重力波検出器である KAGRA では、この熱雑音を低減するため、直径 20 cm をこえる巨大なサファイア鏡を 20 K まで冷却しているが、その温度を維持するためにはレーザー光の鏡材、あるいは鏡面の反射膜による吸収を極力抑える必要がある。

本論文は、KAGRA で用いられているこの直径 22 cm、厚さ 15 cm のサファイア鏡やその反射膜での吸収を非常に高い精度(0.2 ppm 以下)で計測するシステムを構築し、それを用いて実際に吸収を測定するとともに、次世代の高反射膜として期待されている AlGaAs 結晶膜の試作品の吸収率を評価したものである。

本論文は 6 章からなる。第 1 章は序章であり、まず一般相対論から導かれる重力波の基礎と天体からの重力波放射について簡潔にまとめ、それに引き続き、干渉計による重力波検出の基本原則と、実際にはどのような手法によって観測精度を向上させているかについての説明が、既存の重力波検出器を例に述べられている。最後に、実際の測定時に問題になるノイズ源についてまとめられている。

第 2 章は KAGRA についての説明である。冷却防振鏡のシステムについての詳細が説明され、特にサファイア鏡による吸収の要求仕様が述べられている。また、現在進められている KAGRA の感度向上のための様々な計画、特に本論文の第 6 章で取り扱う次世代高反射率結晶膜について説明され、それによって見込まれる感度向上の試算が示されている。

第 3 章は本研究で用いた吸収測定システムについての説明である。このシステムの原理は PCI (photo-thermal common-path interferometer) と呼ばれており、測定対象物に細いレーザー(ポンプ)を入射しつつ、その入射スポットに対して別波長で測定用のレーザー(プローブ)を打ち込み、その出射光のピーク強度を検出器で測定するというものである。ポンプレーザーの吸収により対象物は加熱され、屈折率が局所的に変化してレンズ効果が生じる。これによって変化したプローブレーザーのピーク強度から吸収率を推定する。また、このシステムによる測定をシミュレートする詳細な数値モデルを構築し、実測定との比較を行った。その結果、実験結果を非常によく再現することができた。このようなシミュレーションはこれまでにほとんど行われておらず、先進的な試みである。

第 4 章は本研究で開発した PCI システムについての説明である。これは既存のシステムを大規模に拡張し、大型ミラーを搭載できるようにするとともに、プローブレーザーとして赤外線レーザーを追加し可視光を透過しない物質でも測定できるようにしたものである。実際のシステムの詳細とともに、光学系の軸合わせなどのセットアップ、測定のキャリブレーション手法についての説明がなされている。

第5章は KAGRA のサファイア鏡の吸収測定の結果である。内部の3次元吸収マップを構築することに成功し、様々な吸収構造がみられることを示した。この吸収構造は製造時の結晶成長に伴うものと考えられ、今後の製造プロセスの改善に役立てられると考えられる。

第6章では KAGRA のアップグレードの一つとして検討されている、AlGaAs 結晶反射膜の吸収測定と、熱ノイズの直接測定を行っている。試験した反射膜は直径 5 cm であり、吸収は 1 ppm を切る非常に良好な値を持つことが示された。熱ノイズについても既存の非晶質コーティングに比べて、室温でも同等あるいはそれ以下になるという結果が得られ、この反射膜技術が十分に有効であることが示された。

以上、本論文では重力波検出の感度向上にとって最も大事な熱ノイズ低減に向けて、大型鏡の熱吸収測定システムを日本国内で立ち上げて運用するとともに、次世代の反射膜の評価を行い、その有望性を示すことに成功した。重力波天文学の今後の進展を切り開く重要な結果であり、高い学術的価値があると認められる。

なお、本研究は Raffaele Flaminio, Laurent Pinard, Christoph Deutsch, Paula Heu, Daniele Forest, Garret D. Cole, David Follman との共同研究であるが、論文提出者が主体となって PCI システムの拡張と実験、データ解析及びその結果の議論を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

よって、博士（理学）の学位を授与できるものと認める。