

論文審査の結果の要旨

氏名 上岡 修星

本論文は6章および5つの補遺からなる。第1章は本論文のイントロダクションとして、真空複屈折の物理的背景とその探査手法を説明した上で、先行研究をふまえて本研究の位置づけと特徴を説明している。第2章では、高速繰り返し磁石とレーザー干渉計を用いた真空複屈折の探査手法の原理と、そこで用いられる要素技術が記されている。本研究では、光共振器内に蓄えられたレーザー光の光路上に強磁場を印加することで励起される複屈折成分を検出する、という手法が用いられる。その複屈折成分がどのように信号として現れるのかの定式化と、考慮する必要がある雑音源が説明されている。また、高速繰り返し磁石の原理についても示されている。

第3章では、本研究で用いられた実験セットアップの概要と詳細がまとめられている。光学系としては、光源、ファブリ・ペロー光共振器、制御系、偏波の分離、光検出器、光強度安定化系のそれぞれについて設計と評価結果が示されている。その上で、このレーザー干渉計の感度の評価結果と、各種の雑音源の寄与の測定結果が示されている。結果として、感度を制限する雑音源が完全に特定されるには至らなかったが、光共振器内での2つの偏波のそれぞれが感じる光路長の差として、200Hz - 900Hzの周波数帯での感度は $1 \times 10^{-19} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下という性能が得られている。これは先行研究を上回る感度であった。その後、本研究の特徴である高速繰り返し磁石の設計と評価結果が示されている。本研究では、真空複屈折探査に用いる高磁場用の単レーストラック型磁石と、校正用に用いるダイポール型磁石の2種類を開発している。それぞれについて、発生する磁場の時間プロファイルと空間分布を評価し、所期の動作を確認している。特に、単レーストラック型磁石では8.2Tという高いピーク磁場が実現されたことが示されている。また、これらのパルス磁石に用いる回路系、制御系や液体窒素を用いた冷却系についても説明されている。さらに、磁場印加時にレーザー干渉計が受ける擾乱の評価結果も示されている。

第4章では、連続動作運転とデータ解析の手法と結果が示されている。窒素ガスの複屈折を測定することで装置の動作確認と校正を行うための試験運転および、真空複屈折探査のための約1か月間にわたる連続動作の概要をまとめた上で、データ解析手法が説明されている。本研究では、得られた時系列データから想定される信号波形を探査する手法が用いられており、その原理とデータの前処理が説明されている。その後、試験運転で得られたデータの解析結果が示されている。測定された波形は加えた磁場から予想されるものとよく一致しており、窒素ガスの複屈折の測定値も先行研究と無矛盾であることが示されている。また、光共振器の鏡を回転させることで、得られる信号の振幅や符号を調整できることも確認されている。これによって真空複屈折探

査の際の系統誤差を抑圧できることが示されている。それらをふまえて、真空複屈折探査データの解析結果が示されている。各種の系統誤差要因も踏まえ、結果として、真空複屈折の大きさに関係する k_{CM} という指標において、 $1.8 \times 10^{(-20)} [B^{(-2)}]$ (信頼区間 95%) という上限値が得られている。

第 5 章では、その結果の考察および得られた知見がまとめられている。本研究の結果は先行研究で得られた上限値には約 2 桁及ばない結果であった。その一方で、高速繰り返し磁石を用いるという新たな探査手法を確立させ、その課題を洗い出したという意義が説明されている。またそこで得られた知見をもとに、本研究をアップグレードするための提案がまとめられている。磁場強度、磁場と光の相互作用長、磁場繰り返しレート、系統誤差の低減、光学系の改良と雑音低減、データ解析手法の改良、といった可能性について議論されている。

最後に第 6 章では、本論文の結論となっている。実験の概要と得られた上限値、本研究の意義といった、本研究の総括が行われている。

本研究は、論文提出者が主体となって、研究課題への着眼と、装置の設計・開発、探査のための連続運転とデータ解析、結果の解釈、という一連の研究を進めたもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。結果として得られた上限値は先行研究には及ばないものではあったが、強力なパルス磁石を用いつつ、レーザー干渉計を用いて精密な計測をおこなうという容易ではない実験研究を進め、レーザー解析まで含めて手法を確立させた意義は大きい。真空複屈折の探査という重要な研究において、新たな可能性を示したという点で、この分野における論文提出者の貢献は大きい。

したがって、博士(理学)の学位を授与できると認める。