

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 長田 有登

共振器内に電磁場を閉じ込めることで物質と電磁場の相互作用を増強させる共振器電気力学のアイデアは、核磁気共鳴の発見やレーザーの発明に繋がり、また、単一の原子や光子のレベルで量子力学を検証する道を開いた。共振器電気力学を固体の機械的自由度の制御に適用し、よりマクロな系で量子力学を検証する試みが、2000年以降、共振器オプトメカニクスの名のもと活発化している。共振器オプトメカニクスは、微細加工技術を基盤とするナノ・マイクロメカニクスの分野とレーザーを使った精密測定を基盤とする量子エレクトロニクスの分野の交流を促し、双方の分野に新しい視点を提供した。

共振器電気力学の概念は、固体の他の自由度と電磁場との相互作用の増強にも適用できるはずである。たとえば、磁性体中のスピン波（マグノン）と光の間の相互作用の増強に利用すれば、単一光子、単一マグノンのレベルでの磁気光学効果の実現を見据えた共振器オプトマグノニクスとも呼べる新しい研究領域が開拓できるものと期待される。

本論文では、強磁性絶縁体であるイットリウム鉄ガーネット(YIG)の球状試料をウィスパリングギャラリモード光共振器として利用する共振器オプトマグノニクスの系を開発し、この系を舞台にして発現した新規な磁気光学効果について報告している。まずは、ミリメートルサイズのYIG球がWGM光共振器として実際に機能することを実証し、YIG球内に励起される静磁波スピン波モードの同定を経て、静磁波スピン波モードのうちでも最も基本的な一様スピン波モード(キッテルモード)による共振器内光子のブリルアン散乱過程が実験と理論の両面から詳細に検討されている。

本論文は7章からなる。以下に各章の内容を要約する。

第1章では本論文の導入として、磁気光学効果や共振器量子電気力学、共振器オプトメカニクスの研究の歴史、共振器オプトマグノニクスの位置づけについて議論し、本論文の構成を示している。

第2章ではこれまで観測例のなかったYIG球のウィスパリングギャラリモードの観測を報告し、2つの偏光モードごとの共振周波数の特性やQ値を評価している。また、ウィスパリングギャラリモードのスピン・軌道角運動量に関して理論的な考察をしている。

第3章ではYIG球の静磁波スピン波モードの観測を報告し、そのモードの同定・Q値の評価を行っている。また、静磁波スピン波モードの解析解を用いてその軌道角運動量に関する考察をしている。ブリルアン散乱において静磁波スピン波モードの軌道角運動量はウィスパリングギャラリモードのそれとともに保存されるべき量であるため、重要となる。

第4章ではウィスパリングギャラリモードが静磁波スピン波モードによりブリルアン散乱を受ける過程を理論的なモデルをもとに解説している。ブリルアン散乱においてはウィスパリング

ギャラリモードと静磁波スピン波モードのスピンと軌道の角運動量がそれぞれ保存されるような散乱が起こることが説明されている。

第5章では、静磁波スピン波モードの中でも一様なキッテルモードにより引き起こされるブリルアン散乱を観測した結果が報告されている。ブリルアン散乱に見られたストークス・アンチストークス散乱の非対称性や散乱の非相反性は第4章で述べたスピンおよび軌道角運動量の保存則によってよく説明されることが示されている。

第6章ではキッテルモードに限らず観測された様々な静磁波スピン波モードによるブリルアン散乱の強度の印加磁場依存性を調べている。特にキッテルモードによるブリルアン散乱強度の印加磁場依存性から、ブリルアン散乱のウィスパリングギャラリモードによる共鳴的な増強が報告されている。一般の静磁波スピン波モードによるブリルアン散乱は第4章で考察した理論と合致しない結果が得られたが、これは磁場の非一様性により複数の静磁波スピン波モードが互いに強く結合し、軌道角運動量が良い量子数でなくなっていることが一因であると考察されている。

第7章では本研究の結果をまとめ、今後の展望を述べている。

以上のように、本論文は、球状の YIG 試料を舞台に、ウィスパリングギャラリモードの光子が静磁波スピン波モードによってブリルアン散乱される過程を量子光学の実験技術と理論を駆使して分析し、そこに出現したストークス・アンチストークス散乱の非対称性や散乱の非相反性といった新規な磁気光学効果について報告している。この成果は、これまで交流の希薄であった磁性の分野と量子エレクトロニクスの分野の境界領域に、共振器オプトマグノニクス、という新しい研究領域を切り開く礎となる成果であり、今後の物理工学の発展に大きく寄与すると期待される。

よって、本論文を博士（工学）の学位請求論文として合格と認める。