

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 久富 隆佑

本論文は、「強磁性絶縁体におけるマグノン誘起ブリルアン散乱のヘテロダイン分光」と題し、強磁性絶縁体における新奇なマグノン誘起ブリルアン散乱現象を量子光学分野で多く用いられているヘテロダイン分光測定を用いて研究した成果をまとめている。

固体中の素励起の一つであるマグノンは、強磁性体の持つ巨視的な磁化の揺らぎを記述する集団スピン歳差運動モードの量子である。典型的な強磁性絶縁体であるイットリウム鉄ガーネット (YIG) 単結晶中のマグノンの励起は、ギガヘルツオーダーで振動する外部磁場と磁気双極子相互作用により直接的に結合し、強磁性共鳴として観測される。一方、マグノンは数百テラヘルツで振動する電磁場（光）とも電気双極子相互作用・スピン軌道相互作用を介して非共鳴的に相互作用し、「マグノン誘起ブリルアン散乱」を起こす。特にその中でも散乱光のエネルギーが入射光に比べ1マグノン分だけ変化する散乱過程のことを「1マグノン散乱」と呼ぶ。

強磁性体を用いた従来の研究では、主に1マグノン散乱のみが着目されてきた。本論文ではそれら既存の研究の対象領域を超えて、スピン集団運動モードとマイクロ波共振器モードの複合系において発現するノーマルモードの素励起（マグノンポラリトン）によるもの、2マグノンの関与するもの、マグノンに加え結晶の対称性が関与するものなど、新奇なブリルアン散乱現象に焦点を当てた実験的研究を行い、成果を上げている。

本論文は全7章からなる、以下に各章の内容を要約する。

まず第1章では、本論文の序論として研究背景と目的をまとめている。本論文で示す新奇なブリルアン散乱現象と、その応用先としての量子情報処理技術やマグノンBEC（ボース-アインシュタイン凝縮）研究との関連を説明し、本論文における研究の立ち位置を示している。

第2章では、本論文を通じて使用する球状YIG単結晶試料内に存在するスピン集団運動モードであるWalkerモードについて説明している。本論文では、このWalkerモードに属する均一歳差運動モード（Kittelモード）のみを使用している。Kittelモードは強磁性共鳴（FMR）を用いて観測可能であり、FMR観測によるモードの同定手法並びにYIG単結晶の結晶軸方向の推定方法について説明がなされている。第6章で示す結晶の対称性が関与するブリルアン散乱においては、YIG単結晶の結晶軸方向が重要な役割を果たすことになる。

第3章では、マグノン誘起ブリルアン散乱を記述する理論を説明している。マグノンが電磁場に与える影響は、物質中の誘電率テンソル中に振動磁化成分として取り込まれることになる。さらに本論文で使用するYIGの誘電率テンソルを、YIG単結晶のもつ対称性を利用して導出し、従来の研究で観測されてきた1マグノン散乱が矛盾なく説明されることを述べている。さらにその理論を自然に拡張することによって、これまで観測されてこなか

った2マグノン散乱が予想されることも明らかにしている。

第4章では、まず、ミリメートルサイズの球状YIG単結晶をマイクロ波空洞共振器内の適切な位置に設置することにより、Kittelモードがマイクロ波共振器モードと磁気双極子相互作用を介して強く結合し、ノーマルモード（マグノンポラリトンモード）を発現することを説明し、その観測結果を示している。その後、マイクロ波共振器中のYIG単結晶に光を入射し、その透過光のヘテロダイン測定により、マグノンポラリトンモードによって誘起されたブリルアン散乱を初めて観測している。さらに、その逆過程があると予想し、マグノンポラリトンモードの共鳴周波数に等しい差周波数を持つ2色のコヒーレント光を用意し、マイクロ波共振器中のYIG単結晶に入射することで、マグノンポラリトンモードがコヒーレントに励起されることも合わせて実証している。これらの物理過程はマイクロ波と光の波長変換として捉えることができ、第3章で示したマグノン誘起ブリルアン散乱の理論モデルを基にして、波長変換器としての理論モデルの構築を行い、実験結果を用いた各種パラメータの評価を行っている。

第5章では、第3章において既存の理論の拡張により予想された2マグノン散乱の観測をヘテロダイン測定によって行い、その存在を初めて確認している。本章で確認された2マグノン散乱における角運動量の収支は、光とマグノンの角運動量保存を考えることによって理解できる。

第6章では、結晶の対称性の関与するマグノン誘起ブリルアン散乱の観測を行っている。前章の実験ではYIG単結晶の(100)面に垂直に光を照射していたが、本章では(111)面に垂直に光を照射する状況を考えることにより、1マグノン散乱過程における角運動量保存則に結晶の対称性に起因した補正が生じうることを理論的に予想している。その後、ヘテロダイン測定を用いた実験により、理論予想と一致する1マグノン散乱の観測に成功している。さらに、マグノン散乱過程でコヒーレンスが保持されていることも実証している。

第7章では本論文の研究成果をまとめている。

以上のように、本博士論文では、典型的な強磁性体であるYIGを舞台として、マグノン誘起ブリルアン散乱をヘテロダイン測定の手法によって分光することにより、3つの新しい現象を観測している。これらの成果は、強磁性体中のスピン集団励起と光の相互作用の研究において、これまで考慮に入れられてこなかった他の物理的自由度との結合の可能性や、高次の散乱過程を利用するという新しい道を提示するとともに、新たに結晶の対称性も考慮に入れなければならないことを示している。本博士論文の成果は、オプトマグノンクス研究における新たな展開への足がかりになると考えられ、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）の学位論文として合格と認める。