

論文の内容の要旨

論文題目 Non-reciprocity of magnon excitations in non-centrosymmetric magnets

(空間反転対称性が破れた磁性体におけるマグノン励起の非相反性)

氏名 井口 雄介

物質中の対称性の破れは、興味深い物理現象を引き起こす。例えば、空間反転対称性の破れた系では、圧電性や自然旋光性が現れる。また、時間反転対称性の破れは、ホール効果やファラデー効果などをもたらす。近年、磁性誘起強誘電性（マルチフェロイクス）の発見を契機として、空間と時間反転対称性が同時に破れた系に特有な物理現象への関心が高まってきている。その一つが電気磁気効果であり、電場によって磁化が変化し磁場によって電気分極が変化する。反転対称性の同時の破れは、素励起の動力学にも影響を及ぼす。その一つとして、波数 $+k$ を持つ素励起のエネルギーと減衰率が、波数 $-k$ の場合と非等価になる。これを非相反性という。本博士論文では、マイクロ波領域におけるマグノン励起に関連した非相反現象に着目した。特に、マグノン励起付近における非相反なマイクロ波伝搬と非相反なマグノン励起の2点について研究を行った結果をまとめた。具体的には、(1) キラル強磁性体中の非相反マグノン伝搬の観測、(2) マルチフェロイックヘリ磁性体における非相反マイクロ波伝搬の電気磁気制御、(3) マルチフェロイック反強磁性体における非相反マイクロ波伝搬の観測に関する研究を行った。

(1) キラル強磁性体中の非相反マグノン伝搬の観測

空間反転対称性が破れた強磁性体中では、有限のジャロシンスキー守谷相互作用に起因して非対称なマグノンバンド分散が現れる。非対称バンド由来のマグノンの非相反伝搬は、これまで界面型（ポーラー型）ジャロシンスキー守谷相互作用が有限な薄膜中のみで観測が行われてきた。しかし、キラルなバルク強磁性体中で有限なキラル型ジャロシンスキー守谷

相互作用においても非対称マグノンバンドが現れることが理論的に予想される (図 1 (a))。本研究では、キラルなバルク強磁性体 LiFe_5O_8 の単結晶試料と微細加工したマイクロ波アンテナを用いて、非相反なマグノン伝搬を観測することを目的として研究を行った。

非対称バンド中では、高波数のマグノンにおいてより大きな非相反伝搬が期待される。また、低波数領域では磁気双極子相互作用を媒介とした静磁波モードが支配的で、マグノンバンドを対称に大きく変調する(図 1 (a))。このため我々は高波数マグノンを励起できる微細マイクロ波アンテナ(図 1 (b))を作成した。このデバイス中で、マイクロ波の透過率 S_{12}, S_{21} として、ポート 1 から 2、2 から 1 へのマグノン伝搬を観測した。キラル強磁性体 LiFe_5O_8 中 (図 1 (c)) では、明らかな非相反性が観測されたが、反転対称強磁性体 $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 中 (図 1 (d)) では非相反性は見られなかった。また非相反マグノン伝搬の磁場方向依存性も観測した。この結果、キラル型ジャロシンスキー守谷相互作用由来の非相反性と静磁波モード由来の非相反性が区別できることを明らかにした。

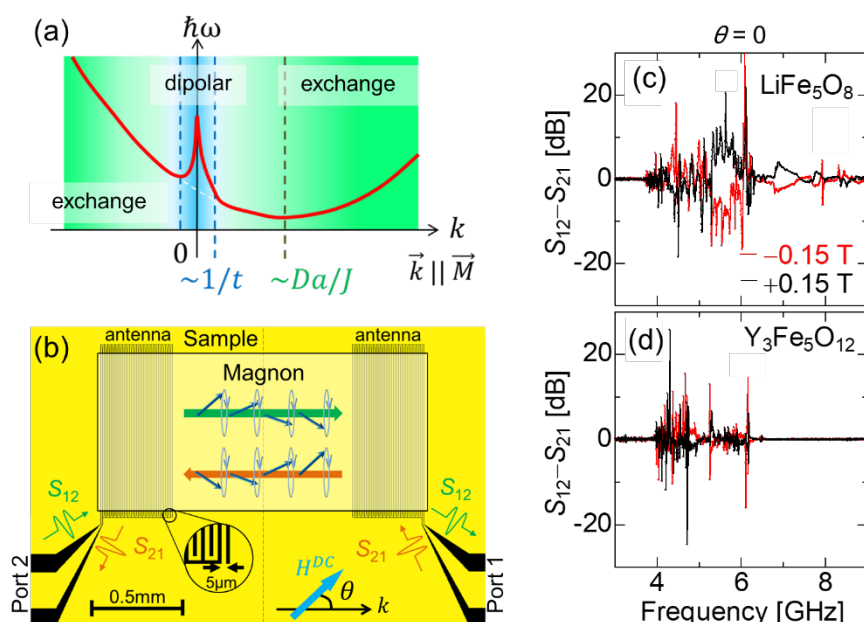


図 1. キラル強磁性体 LiFe_5O_8 における非対称マグノンバンド(a)と微細マイクロ波アンテナ(b)、 LiFe_5O_8 (c)と $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (d)の非相反マイクロ波透過率。

(2) マルチフェロイックヘリ磁性体における非相反マイクロ波伝搬の電気磁気制御

従来のマイクロ波アイソレーターの外場制御は原理的に困難であるため、異なる原理による非相反応答が求められている。キラル磁性体中でマイクロ波非相反性が観測されているが、結晶のキラリティを起源とした非相反性は電氣的に制御することが困難である。本研究では、ポーリング電場によって電気分極を制御できるマルチフェロイックヘリ磁性体 $\text{Ba}_2\text{Mg}_2\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$ を利用することでマイクロ波非相反性の電氣的制御を行うことを目的として研究を行った。

マイクロ波領域において、 $\text{Ba}_2\text{Mg}_2\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$ がコニカルマグノンモードを持つことを実証した。図 2 (a),(b)の様に、トランスバースコニカル磁性相の $\text{Ba}_2\text{Mg}_2\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$ では、トロイダルマグノン $\Delta\mathbf{P} \times \Delta\mathbf{M}$ に起因した非相反なマイクロ波伝搬が期待される。コニカルマグノンモードにおいて、ポーリング電場の強度に依存した非相反なマイクロ波応答 $\Delta S_{12} - \Delta S_{21}$ を観測した(図 2 (c))。図 2 (d)は、マイクロ波非相反性 I_{12} の大きさと符号がポーリング電場 E と外部磁場で制御でき、電気分極の大きさに比例することを示している。

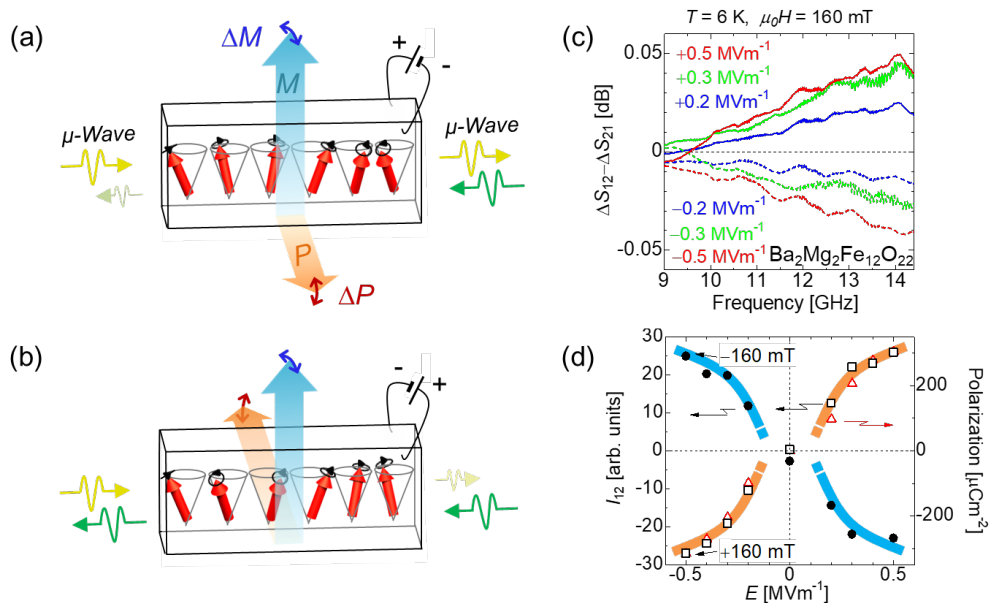


図 2. マルチフェロイックヘリ磁性体 $\text{Ba}_2\text{Mg}_2\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$ における非相反マイクロ波伝搬の電氣的制御。

(3) マルチフェロイック反強磁性体における非相反マイクロ波伝搬の観測

反強磁性スピントロニクスは、大きな磁化を持たないためナノデバイスへの応用に適していること等から、近年大きな関心を集めている。強磁性体やコニカル磁性体などの有限磁化を持つ磁性体中のマグノン励起に比べて、反強磁性マグノン励起は観測のために高周波数・高磁場が求められる傾向がある。本研究では、磁場に依存した反強磁性マグノンとそれらにおける非相反応答を綿密に調べるため、低いネール点と小さい磁気異方性を持つマルチフェロイック反強磁性体 $\text{Ba}_2\text{MnGe}_2\text{O}_7$ のマイクロ波応答を観測した。

マルチフェロイック反強磁性体 $\text{Ba}_2\text{MnGe}_2\text{O}_7$ は、マイクロ波領域に容易面型磁気異方性の典型的な反強磁性マグノンモード (ω_1 と ω_2, ω_{11}) を持つことを実証した (図 3 (a))。モードの磁場依存性から、理論式を用いて交換相互作用と磁気異方性の大きさを見積もった。テラヘルツ領域に反強磁性マグノンモードを持つ $\text{Ba}_2\text{CoGe}_2\text{O}_7$ と比較し、 $\text{Ba}_2\text{MnGe}_2\text{O}_7$ の非常に小さな磁気異方性がマイクロ波領域で反強磁性マグノンが観測できる大きな要因であることを明らかにした。また、 $\text{Ba}_2\text{MnGe}_2\text{O}_7$ の反強磁性マグノンモードにおける非相反応答を観測した。図 3 (b)は、2つの実験配置における反強磁性マグノンモードの相対的な非相反性の大きさを示しており、特定の实验配置における ω_1 モードのみが大きな非相反性

を示すことが分かった。このマイクロ波非相反性の振る舞いは、スピン波理論と久保公式及びスピン依存する金属配位子混成機構を基に量的に説明することができた。

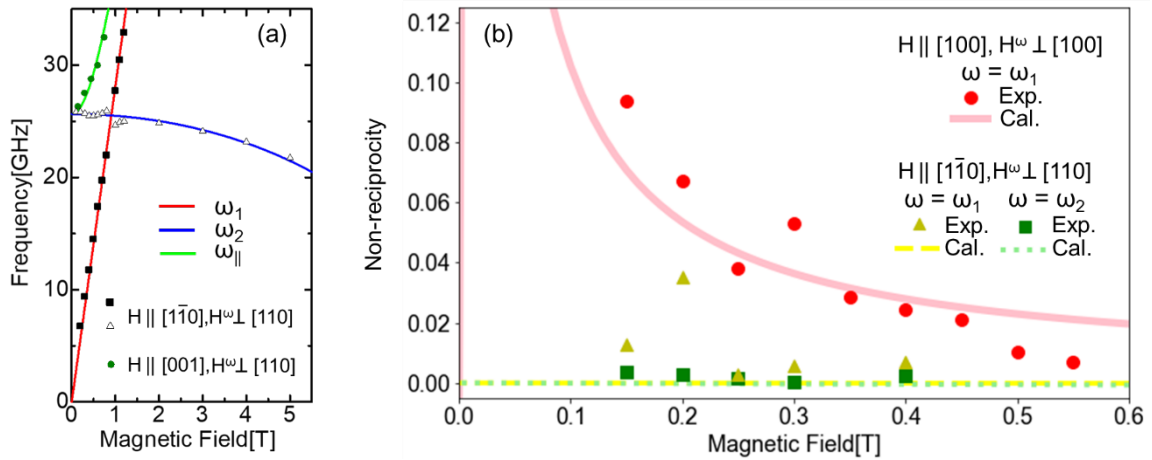


図 3. (a)マルチフェロイック反強磁性体 $\text{Ba}_2\text{MnGe}_2\text{O}_7$ のマイクロ波領域における反強磁性マグノンモードの磁場依存性。(b)相対的マイクロ波非相反性の磁場依存性。

結論

本論文の研究から、マグノン励起に関連したマイクロ波伝搬とマグノン伝搬の非相反性について以下のような知見を得た。

- [1] キラルなバルク強磁性体 LiFe_5O_8 において、マグノンは磁化方向に非相反伝搬する。この非相反性は、時間と空間反転対称性が同時に破れた系で有限なジャロシンスキー守谷相互作用に由来した非対称マグノンバンドで説明できる。
- [2] キラル型ジャロシンスキー守谷相互作用由来の非相反性と磁気双極子相互作用を媒介としたデーモンエーシバツハモード由来の非相反性は区別することができる。これは、前者が磁化に平行に伝搬するのに対して、後者は磁化に垂直に伝搬するためである。
- [3] マルチフェロイックヘリ磁性体 $\text{Ba}_2\text{Mg}_2\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$ はマイクロ波領域にコニカルマグノン励起を持つ。マグノン励起において、 $\text{Ba}_2\text{Mg}_2\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$ は非相反マイクロ波伝搬を示す。加えて、マイクロ波非相反性の強度と符号はポーリング電場によって制御できる。
- [4] マルチフェロイック反強磁性体 $\text{Ba}_2\text{MnGe}_2\text{O}_7$ は、容易面型磁気異方性における従来型反強磁性マグノンモードをマイクロ波領域に持つ。 $\text{Ba}_2\text{MnGe}_2\text{O}_7$ の 1 つの反強磁性マグノンモードにおける非相反応答を観測した。得られたマイクロ波非相反性は、スピン波理論と久保公式及びスピン依存する金属配位子混成機構を基に量的に説明することができる。