

空間反転対称性が破れた磁性体における異常マイクロ波応答

Anomalous microwave response in noncentrosymmetric magnets

(日本物理学会推薦)

代表研究者 東京大学 小野瀬佳文 The University of Tokyo Yoshinori ONOSE

In noncentrosymmetric magnets, where the inversion and time reversal symmetries are simultaneously broken, the propagation of quantum wave is nonreciprocal i.e. the degeneracy between $+k$ and $-k$ states are completely lifted. In this study, we have investigated the nonreciprocity of magnons and phonons (acoustic waves) excited by microwave and microwave itself in GHz region. We have demonstrated the nonreciprocal propagation of magnons in a chiral ferrimagnet LiFe_5O_8 . The microscopic origin of nonreciprocity is ascribed to the asymmetric magnon band induced by the Dzyaloshinskii-Morya interaction. We have also studied the nonreciprocity of microwave itself in another noncentrosymmetric magnet CuB_2O_4 . We have detected the nonreciprocal microwave transmittance in the canted antiferromagnetic state. We have shown that the nonreciprocity can be explained by the microscopic magnetoelectric coupling. Finally, the nonreciprocity of phonons (acoustic waves) has been studied in terms of microwave. We have successfully observed the nonreciprocity of surface acoustic wave in a Ni/LiNbO_3 bilayer excited by the interdigital transducer and microwave. By means of detail angle dependence analysis we have clarified the origin of nonreciprocity is different polarizations depending the direction of wave vector. These results may pave a new path to designing the nonreciprocal microwave device.

研究目的

一般に結晶の対称性はその電磁気応答と密接に結びついている。特に、空間反転対称性が破れた物質においては、光の偏光面が物質中で回転していく自然旋光性や応力によって電気分極が誘起する圧電効果など非自明な物理現象が現れる。本研究では、空間反転対称性が破れた磁性体に着目しその非自明なマイクロ波応答を開拓することを目的とした。磁性体においては、多くの場合磁気モーメント反転に関する対称性（時間反転対称性）も同時に破れている。空間反転対称性と時間反転対称性が同時に破れている場合には、量子の分散関係が非対称になる、すなわち、波数 $+k$ をもつ状態と $-k$ の状態の縮退が完全に破れた非相反性が期待される。重要なことは、このような非相反性は電子だけではなく、フォトン、マグノン、フォノンといった固体中の素励起全般に起こることである。マイクロ波領域には、フォノンやマグノンといった固体中の基本的な量子が存在しており、無線通信周波数帯でもあるため応用上も重要である。

特に本研究では、空間反転対称性が破れた磁性体におけるマイクロ波によって励起されたマグノン、フォノン（弾性波）の非相反性やマイクロ波自身の非相反性の研究を行った。

研究経過

本研究では、上記の目的に沿った研究成果としてキラルなフェリ磁性体 LiFe_5O_8 におけるマグノン非相反性の観測、空間反転対称性が破れた反強磁性体 CuB_2O_4 におけるマイクロ波の非相反性の観測、および LiNbO_3 圧電体基板/強磁性 Ni 薄膜二層構造における非相弾性波伝搬の観測、の三つの成果を挙げる事が出来た。以下これらについて述べる。

1、空間反転対称性が破れたフェリ磁性体 LiFe_5O_8 におけるマグノン伝搬の非相反性

LiFe_5O_8 は、マグネタイト Fe_3O_4 のスピネル構造における B サイトの Fe の 1/4 が Li で置換され、その Li が鏡映対称性を破るように整列した物質

である。磁性は、900K 以上で A サイトと B サイトの Fe が反平行に整列したフェリ磁性転移を示す。このような鏡映対称が破れたフェリ磁性体では、らせん磁性体 MnSi などと同様に一様なジャロシンスキー守谷相互作用が存在するが、この場合は磁気異方性が比較的強く共線的なフェリ磁性が安定化している。しかしながら、励起状態にはジャロシンスキー守谷相互作用が影響し、運動量空間で非対称なマグノンバンドが形成されていると考えられていた。我々は、このような非対称マグノンバンドの効果をマイクロ波測定によって観測するためにフォトリソグラフィーによって比較的高い波数のマグノンを励起および検出が可能なミクロンスケールのアンテナを作成し、アンテナ間のマイクロ波透過強度の非相反性としてマグノンバンド非対称性の影響を観測することが出来た (Fig.1)。さらには、空間反転対称性がある強磁性体のリファレンス試料 ($Y_3Fe_5O_{12}$) との比較や磁場方向依存性の解析などにより、このような非相反性が試料の空間反転対称性の破れによるジャロシンスキー守谷相互作用の効果であることを明らかにした。

かにした。

2、空間反転対称性が破れた反強磁性体 CuB_2O_4 におけるマイクロ波の非相反性

CuB_2O_4 の結晶構造の空間反転対称性は破れているが、有限の自発誘電分極を持つ極性物質でもなく、鏡映対称性が破れたキラルな物質でもない。しかしながら磁気モーメントが存在すると方向に応じて、極性やキラリティが生じるユニークな物質である。このような性質の為に結晶構造の空間反転対称性の効果が検証しやすく、可視光領域の方向二色性が東大新領域の有馬グループによって精力的に研究されている。我々は、この物質におけるマイクロ波の非相反性（方向二色性）の観測に成功した (Fig. 2)。 CuB_2O_4 には Cu の二つの異なるサイトがある。A サイトの Cu は、磁気モーメント間の相互作用が比較的強く 20K 以下で反強磁性、8K 以下でらせん磁性を生じる。一方で B サイトの Cu は磁気モーメント間の相互作用が弱く、A サイトとの磁気相互作用を有効磁場として受けつつも 4K でも常磁性状態を保っている。こ

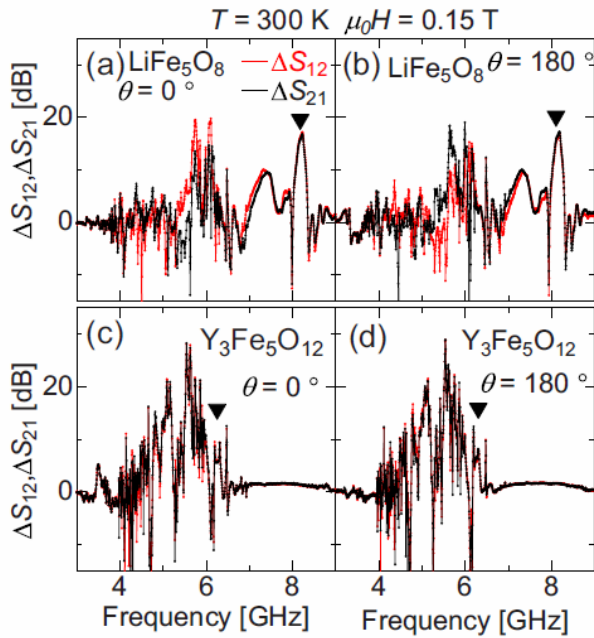


Fig. 1: Microwave transmittance owing to magnon propagation from port 2 to port 1 (ΔS_{21}) and from port 1 to port 2 (ΔS_{12}) for (a),(b) chiral $LiFe_5O_8$ and (c),(d) reference $Y_3Fe_5O_{12}$ crystals.

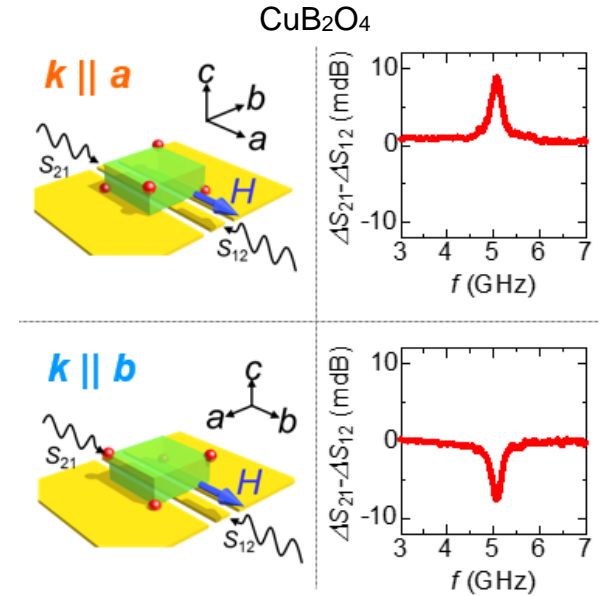
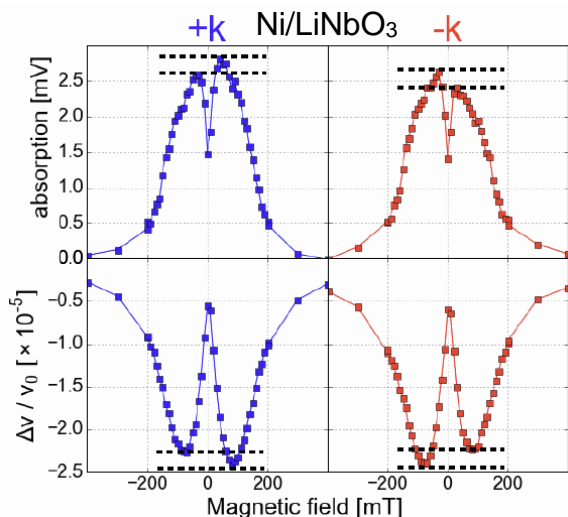


Fig. 2: Nonreciprocity of microwave transmittance in CuB_2O_4 . When the crystal chirality is reversed by the rotation of magnetic field, the nonreciprocity is also reversed, indicating the nonreciprocal microwave dichroism.



場合、有限の非相反性が観測された。この非相反性は、磁場の方向を 180° 回転するかもしくは結

Fig. 3: Absorption and phase velocity change as functions of magnetic field in ferromagnetic Ni/ piezoelectric LiNbO₃ bilayer sample.

晶を 90° 回転して磁場と波数が[010]方向に向くと反転した。これにより、空間反転対称性と時間反転対称性が同時に破れたことに伴う非相反性であることが明らかとなった。さらに、磁場方向依存性の詳細な解析により、スピン依存 *d-p* 混成機構と呼ばれる電気磁気結合がその微視的な起源であることが裏付けられた。

3、LiNbO₃ 圧電体基板/Ni 強磁性薄膜二層構造における非相反弾性波伝搬

LiNbO₃ は最も有名な圧電体の一つであり、その基板表面にいわゆるすだれ状電極を付けると表面弾性波と呼ばれる表面を伝搬する弾性波が存在する。このような表面弾性波は高周波のバンドパスフィルターなどの素子に応用されている。このような表面弾性波には相反性が存在しており、波数 $+k$ と $-k$ の振動数は一致しているが、表面に強磁性体の Ni を付けると時間反転対称性が破れて非相反性が表れることが期待される。我々は、LiNbO₃ 圧電体基板上に厚さ 50nm の Ni 強磁性薄膜を蒸着し、基板上での弾性波を測定した。その結果、圧電体の吸収や位相速度変化に方向依存性が表れる有限の非相反性を観測することができた(Fig. 3)。磁場角度依存性の解析などから非相反応答の依存性は弾性波によって作られる磁性体に働く有効磁

の物質では、A サイトの反強磁性共鳴励起は 20GHz 以上の高い周波数帯にあるが、B サイトの常磁性磁気共鳴励起は 10GHz 以下と低い周波数帯で観測されている。本研究では、反強磁性相においてマイクロ波の非相反性を観測することに成功した。この B サイト常磁性磁気共鳴励起周波数における磁場とマイクロ波の波数が共に[100]方向にある場の楕円偏光の向きが波数の方向によって異なることに起因していることが明らかになった。

考察

マイクロ波の非相反性は、強磁性体を組み込んだマイクロ波回路形状に非対称性が存在すると磁気双極子相互作用由来の非相反性が現れることが知られており、これをもとにアイソレータやサーキュレータといったマイクロ波非相反素子が作られている。本研究で行ったことは、空間反転対称性と時間反転対称性が破れると電磁波やマグノンといった GHz 帯の量子の分散関係が非対称になり、古典的な非相反性に加えて結晶構造対称性に依存した新たなタイプの非相反性が存在することを明らかにしたことである。これらの非相反性は、外場制御型マイクロ波非相反素子など高付加価値なデバイス創成へつながることが期待される。

研究の発表

口頭発表

1. 小野瀬佳文“Topological effects on magnetic excitations in magnetic materials”
The OIST International Workshop on Novel Quantum Materials and Phase
沖縄 2014 年 5 月 (招待講演)
2. 井口雄介、上村宗一郎、上野和紀、小野瀬佳文「空間反転対称性が破れた強磁性体 LiFe₅O₈ における高波数マグノン励起のマイクロ波応答」日本物理学会、早稲田大学
2015 年 3 月
3. 小野瀬佳文“Magnon Hall effect”Spintronics VIII Symposium of the SPIE Optics & Photonics Conference、サンディエゴ 米国
2015 年 8 月 (招待講演)
4. 小野瀬佳文 “Nonreciprocal magnon propagation in a noncentrosymmetric ferromagnet LiFe₅O₈”EMN Hong Kong

meeting 香港 中国 2015 年 12 月 (招待講演)

5. 小野瀬佳文 “Nonreciprocal magnon propagation in a noncentrosymmetric ferromagnet LiFe_5O_8 ” Core-to-Copre International Meeting cMag2016 symposium 広島 2016 年 2 月
6. 小野瀬佳文「強磁性マグノン伝搬の相対論効果」第55回化合物新磁性材料専門研究会、東京大学 2016 年 3 月 (招待講演)
7. 小野瀬佳文「ジャロシンスキー守谷相互作用に由来する非相反マグノン伝搬」日本物理学会、東北学院大学 2016 年 3 月 (招待講演)
8. 新居陽一、佐々木遼、井口雄介、小野瀬佳文「非反転対称磁性体 CuB_2O_4 のマイクロ波応答」日本物理学会、東北学院大学 2016 年 3 月
9. 佐々木遼、新居陽一、井口雄介、小野瀬佳文「 Ni/LiNbO_3 における表面弾性波の磁気弾性結合と非相反性」日本物理学会、東北学院大学 2016 年 3 月

誌上発表

1. Y. Iguchi, S. Uemura, K. Ueno, and Y. Onose, Phys. Rev. B 92, 184419 (2015).