

トポロジカルスピン構造から生じる磁気光学応答の観測に成功

1. 発表者

- 林 悠大 (東京大学 大学院工学系研究科 物理工学専攻 博士課程3年)
- 岡村 嘉大 (東京大学 大学院工学系研究科 附属量子相エレクトロニクス研究センター 助教)
- 金澤 直也 (東京大学 大学院工学系研究科 物理工学専攻 講師/理化学研究所 創発物性科学研究センター 強相関物性研究グループ 客員研究員)
- 是常 隆 (東北大学 大学院理学研究科 物理学専攻 准教授)
- 塚崎 敦 (東北大学 金属材料研究所 低温物理学研究部門 教授)
- 十倉 好紀 (理化学研究所 創発物性科学研究センター センター長/東京大学 国際高等研究所東京カレッジ 卓越教授)
- 高橋 陽太郎 (東京大学 大学院工学系研究科 附属量子相エレクトロニクス研究センター 准教授/理化学研究所 創発物性科学研究センター 創発分光学研究ユニット ユニットリーダー)

2. 発表のポイント

- ◆ヘッジホッグ格子 (注1) と呼ばれる特殊なスピン構造によって、光のねじれ現象である磁気光学効果が巨大化することを発見しました
- ◆観測した磁気光学効果の共鳴が異常ホール効果 (注2)・トポロジカルホール効果 (注3) と呼ばれる電子の軌道が曲がる現象の起源であることがわかりました。
- ◆今後のテラヘルツ帯 (注4) の光学デバイスや、磁気メモリの読み取りデバイスの開発につながることを期待できます

3. 発表概要

伝導電子と磁性との相互作用の結果、電流と垂直方向に電圧が生じる現象は「異常ホール効果」と呼ばれ、基礎研究・デバイス応用の両観点から大きな注目を集めています。異常ホール効果が生じるメカニズムはこれまでに様々な観点で研究されており、近年では電子構造のトポロジー (注5) が重要な役割を担っていることが明らかになっています。最近では、さらにトポロジカルな磁気構造の形成により発現するホール効果 (トポロジカルホール効果) が観測され、大きな注目を集めています。しかし、トポロジカルホール効果に関しては、その発現機構の解明に迫る実験的手段は限定されていました。

東京大学大学院工学系研究科の林悠大大学院生と岡村嘉大助教、金澤直也講師、高橋陽太郎准教授、理化学研究所創発物性科学センターの十倉好紀センター長を中心とする研究グループは、東北大学金属材料研究所の塚崎敦教授、東北大学大学院理学研究科物理学専攻の是常隆准教授、東京大学大学院工学系研究科の余同樺大学院生、有田亮太郎教授、市川昌和名誉教授、川崎雅司教授らの研究グループと共同で、カイラル磁性体 MnGe (Mn: マンガン、Ge:

ゲルマニウム)の薄膜において、トポロジカル磁気構造の形成に由来する巨大な磁気光学効果を発見しました。

MnGe 薄膜では、低温においてヘッジホッグ格子と呼ばれる特異なスピン構造（トポロジカルスピン構造）に由来した、トポロジカルホール効果を生じることが知られています。今回、林悠大大学院生らはテラヘルツ帯において、磁気光学ファラデー効果（注6）の測定を行いました。その結果、ファラデー効果が急峻に増大する特徴的な共鳴スペクトルを観測することに成功しました。理論モデルによる解析からこの共鳴構造が MnGe の異常ホール効果やトポロジカルホール効果の主たる起源であることがわかりました。

今回得られた成果は、トポロジカルスピン構造が電子状態に強く干渉し巨大なトポロジカルホール効果を発現させることを強く示唆しています。本成果は今後、トポロジカル磁気構造を利用した新しい光デバイスの開発へとつながることが期待されます。

本研究成果は、英国科学雑誌「Nature Communications」に英国時間 10 月 13 日に掲載されます。

本研究は、科学技術振興機構(JST)戦略的創造研究推進事業 CREST「ナノスピン構造を用いた電子量子位相制御ナノスピン構造を用いた電子量子位相制御(研究代表者:永長直人)」(No. JPMJCR1874)、日本学術振興会(JSPS)科学研究費若手研究「磁気スキルミオンによる新奇トポロジカル電荷ダイナミクスの探索(研究代表者:岡村嘉大)」(No. 19K14653)の支援を受けて行われました。

4. 発表内容

<研究の背景>

強磁性体における異常ホール効果の発見は 19 世紀までさかのぼりますが、その起源については長年の間活発な議論の的となっています。近年の研究では、物質の電子構造のトポロジーが異常ホール効果に重要な役割を果たしていることが明らかになっています。さらに、トポロジカルなスピン構造がトポロジカルホール効果という新しいホール効果を引き起こすことが発見され、大きな注目を集めています。しかしながら、トポロジカルホール効果の背景物理に迫った実験研究は極めて限られていました。

<研究の経緯>

東京大学大学院工学系研究科の林悠大大学院生らは、MnGe という物質に着目しました。MnGe 中では図 1 (a, b) のようなヘッジホッグ状のスピン構造が生じることで、図 1 (c) に示すような巨大なトポロジカルホール効果が現れます。林悠大大学院生らはホール効果の生成メカニズムに迫るため、光学領域のホール効果に相当する磁気光学効果に着目しました。

<研究内容>

MnGe 薄膜を用い、テラヘルツ帯とよばれる遠赤外領域の磁気光学ファラデー効果測定を行いました。測定の結果、この帯域で磁気光学効果が顕著な共鳴を持つことがわかりました。この共鳴現象の出現に同期して、ホール伝導度スペクトルにも顕著な共鳴構造が観測される

ことから、この光学領域の共鳴現象が MnGe の巨大なホール効果の起源であることがわかりました (図 2 (a))。理論モデルを用いて解析すると、この共鳴構造は 2 つの異なる要素から構成されており、1 つは異常ホール効果に、そしてもう 1 つがヘッジホッグ格子の形成によって生じているトポロジカルホール効果に対応していることを明らかにしました (図 2 (b))。

<展望・社会的意義>

本研究では、MnGe 薄膜の異常・トポロジカルホール効果がともにテラヘルツ領域に存在する共鳴構造に由来することを明らかにしました。近年ではヘッジホッグ格子以外にも様々なトポロジカル磁気構造が見つかり、スピンの集団が作る特異な物理現象が益々注目を集めています。今後は今回発見したトポロジカル磁気構造の磁気光学応答の普遍性の検証が待たれます。

また、ヘッジホッグ格子のようなトポロジカルスピン構造はその安定性から将来の情報担体としての役割を期待されています。本研究の成果はトポロジカルスピン構造の存在を光によって高速かつ非接触に検出する技術の開発へ向けた、重要な一歩と言えます。

5. 発表雑誌

雑誌名 : 「*Nature Communications*」

論文タイトル : 「Magneto-optical spectroscopy on Weyl nodes for anomalous and topological Hall effects in chiral MnGe」

著者 : Y. Hayashi, Y. Okamura, N. Kanazawa, T. Yu, T. Koretsune, R. Arita, A. Tsukazaki, M. Ichikawa, M. Kawasaki, Y. Tokura, Y. Takahashi

DOI 番号 : 10.1038/s41467-021-25276-1

6. 問い合わせ先

<研究に関すること>

東京大学 大学院工学系研究科 物理工学専攻

博士課程 3 年 林 悠大 (はやし ゆうだい)

Tel : 03-5841-6855

E-mail : hayashi[at]ce.t.u-tokyo.ac.jp

東京大学 大学院工学研究科 附属量子相エレクトロニクス研究センター

助教 岡村 嘉大 (おかむら よしひろ)

Tel : 03-5841-6855

E-mail : okamura[at]ap.t.u-tokyo.ac.jp

東京大学 大学院工学系研究科 附属量子相エレクトロニクス研究センター 准教授

理化学研究所 創発物性科学研究センター 創発分光学研究ユニット ユニットリーダー

高橋 陽太郎 (たかはし ようたろう)

Tel : 03-5841-6850

E-mail : youtarou-takahashi[at]ap.t.u-tokyo.ac.jp

東北大学 金属材料研究所 低温物理学研究部門

教授 塚崎 敦 (つかざき あつし)

Tel : 022-215-2085

E-mail : tsukazaki[at]imr.tohoku.ac.jp

東北大学 大学院理学研究科 物理学専攻

准教授 是常 隆 (これつね たかし)

E-mail : koretsune[at]cmt.phys.tohoku.ac.jp

<JST 事業に関すること>

科学技術振興機構 戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ

嶋林 ゆう子 (しまばやし ゆうこ)

Tel : 03-3512-3531

E-mail : crest[at]jst.go.jp

<報道担当>

東京大学 大学院工学系研究科 広報室

Tel : 070-3121-5626

E-mail : kouhou[at]pr.t.u-tokyo.ac.jp

東北大学 金属材料研究所 広報班

Tel : 022-215-2144

E-mail : imr-press[at]imr.tohoku.ac.jp

東北大学 大学院理学研究科 広報・アウトリーチ支援室

E-mail : sci-pr[at]mail.sci.tohoku.ac.jp

科学技術振興機構 広報課

Tel : 03-5214-8404

E-mail : jstkoho[at]jst.go.jp

理化学研究所 広報室 報道担当

E-mail : ex-press[at]riken.jp

7. 用語解説

(注1) ヘッジホッグ格子

物質中の最小の磁石であるスピンの数多く集まり、ハリネズミ（ヘッジホッグ）型の構造が自発的に生じることがある。物質中ではスピンの中心または外側を向くヘッジホッグ・反ヘッジホッグが周期的に並んだ3次元格子を形成する。これらが伝導電子と相互作用してトポロジカルホール効果が生じる。

(注2) 異常ホール効果

磁場を電流が流れる平面に垂直に印加したときに、磁場と電流の方向の両方に垂直な方向に電圧が生じる現象をホール効果と呼ぶ。これは一般的に金属において見られる現象であるが、磁性体においては多くの場合磁化の大きさに比例するような振る舞いが見られる。これを異常ホール効果と呼ぶ。

(注3) トポロジカルホール効果

スピンの集団が立体的な構造をとるときに現れる異常ホール効果。磁気スキルミオンやヘッジホッグ格子などのトポロジカルスピン構造において観測される。

(注4) テラヘルツ帯

波長やエネルギーが可視域とマイクロ波の中間に位置する光学領域を指し、テラヘルツ(10^{12} Hz)程度の周波数を持つ。伝導電子や磁性に起源を持つ応答が現れることが多い帯域である。

(注5) トポロジー

位相幾何学。物理学では近年、電子状態を幾何学的性質に基づいて分類することで物理現象を理解する試みが活発に行われている。

(注6) 磁気光学ファラデー効果

磁性体中を進行する光の偏光が回転する現象。磁気メモリデバイスやアイソレーターの基礎原理として用いられている。

8. 添付資料

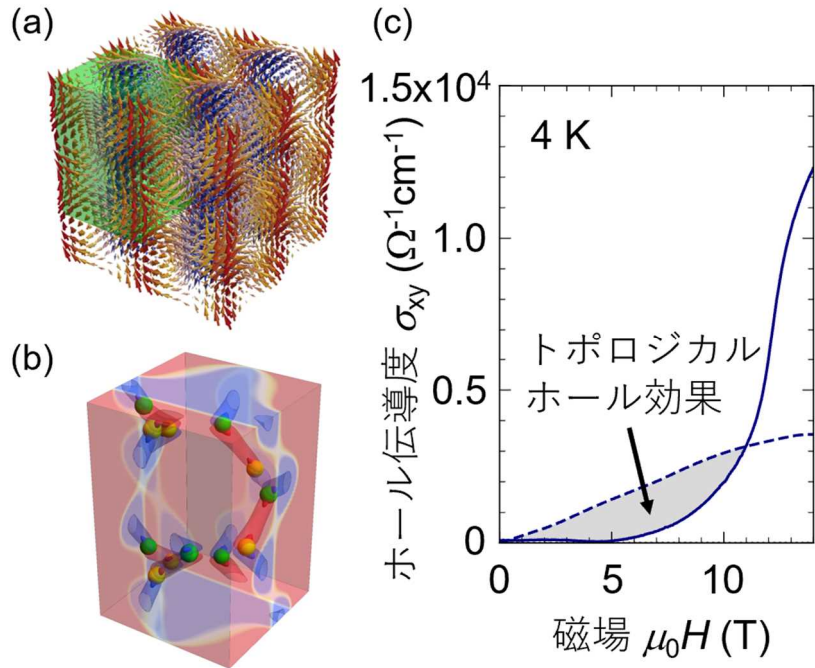


図 1 (a) MnGe の形成するヘッジホッグ格子。 (b) (a) の緑で示している領域におけるヘッジホッグ格子中のヘッジホッグと反ヘッジホッグ (注 1) の配置。 (c) 4 K の温度におけるトポロジカルホール効果

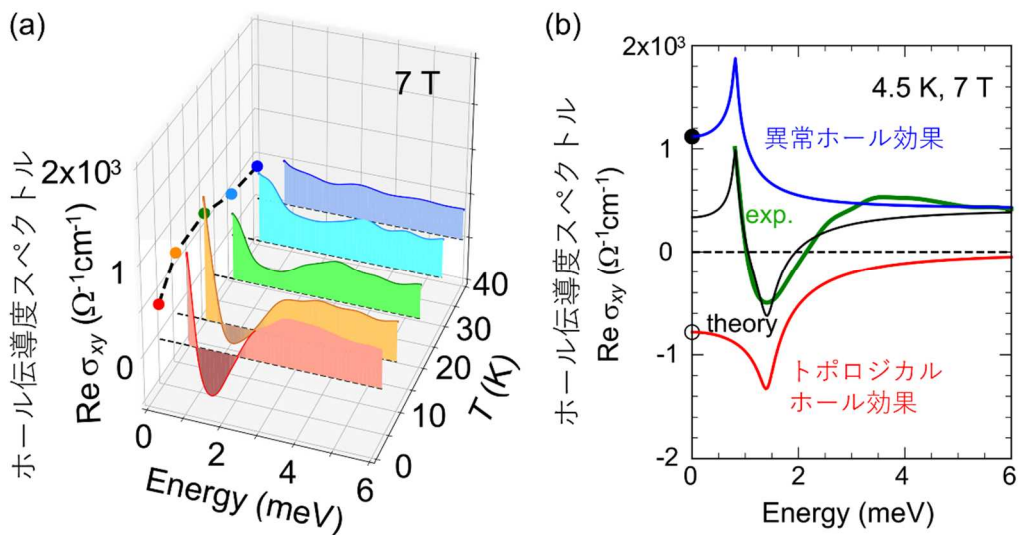


図 2 ホール伝導度スペクトルの実部の、7T の磁場における温度依存性 (a) と理論モデルによる解析 (b)。図の軸にある Re は実部 (Real part) であることを示している。共鳴は異常ホール効果とトポロジカルホール効果の 2 つの成分が重なったものである。緑の線が実験で得られたスペクトルで黒線がフィッティング曲線。フィッティング曲線は異常ホール効果 (青線) とトポロジカルホール効果 (赤線) の寄与の和である。