

令和 3 年 5 月 12 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K14653

研究課題名(和文) 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

研究課題名(英文) Topological charge dynamics derived from magnetic skyrmions

研究代表者

岡村 嘉大 (Okamura, Yoshihiro)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・助教

研究者番号：20804735

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：スキルミオンのベリー位相効果によって引き起こされる新奇な伝導電子ダイナミクスの解明・開拓を目指し、ひいては新奇光機能性や巨大光学応答の実証を目指した。具体的には、スキルミオン由来の(1)電流誘起磁化(エデルシュタイン効果)、(2)磁気光学ファラデー回転の観測を目指した。前者については再現性のあるデータがとれなかった一方で、後者に関しては、トポロジカルホール効果とよく対応した振る舞いの磁気光学効果が観測された。この磁気光学ファラデー効果はスキルミオン形成に伴うバンド変化によって引き起こされる光学遷移において共鳴的な増大を示し最大20mradを超える巨大偏光回転を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スキルミオンにおけるベリー位相効果は理論的には明かに示されているものの、実験的な実証は容易ではなく、また現象のバリエーションとしても乏しいのが現状である。本研究では、これまで行われてこなかった光学応答の探索を行い、スキルミオンと電子状態が強く相互作用することで初めて生じる光学応答を確立することができた。応用的な観点からみても、磁気光学効果は現代ではアイソレーターの原理として携帯電話などの通信デバイスのキーテクノロジーである。その増強指針においてトポロジカルスピン構造という新しいガイドラインを提案することができた。

研究成果の概要(英文)：We explore the novel topological charge dynamics derived from the Berry-phase effect of the magnetic skyrmions, which may lead to the optical functionality and giant response. To this end, we addressed two subjects: (i) Current-induced magnetization (Edelstein effect) and (ii) Magneto-optical Faraday rotation. Although we found some spurious effects in case (i), we successfully observed the Faraday rotation arising from the skyrmion formation. This topological Faraday rotation shows the resonance structure upon the band crossings due to the skyrmion formation, which reaches the giant value of 20 mrad. Our work demonstrates that the Berry phase effect of the magnetic skyrmion can show up in the optical response.

研究分野：光物性

キーワード：スキルミオン 磁気光学効果

1. 研究開始当初の背景

固体中の量子力学的素励起が有する非自明な位相因子(ベリー位相)は、創発的輸送現象の背景にある本質的概念として、また量子干渉効果を利用した将来の量子情報処理の基礎原理として、その重要性が認識されており精力的に研究がなされている。特に、固体中のベリー位相効果は、古くから研究が行われている異常ホール効果や量子ホール効果などの量子輸送現象を統一的に説明する概念であることが明らかになっており、現在の物性物理で最も注目されているテーマの一つである。

本研究課題の舞台となるスキルミオンは、一つが数十ナノメートル程度の渦状の磁気構造体である。スキルミオンは、構成するスピンを球面上に射影すると球面の立体角を覆いつくすため伝導電子の波動関数にベリー位相が付与され、ベリー位相効果が物性に顕著に現れることが知られている。例えば、伝導電子は数十テスラの実効磁場を感じ、ホール効果において巨大な付加項が生じる(トポロジカルホール効果)。さらには、スキルミオン自体が従来の強磁性磁壁の10万分の1程度の低い電流密度で駆動可能であることやその際にはスキルミオンがホール運動を起こすなど、スキルミオンのベリー位相効果が支配的な役割を果たす現象が報告されている。しかしながら、そのバリエーションは乏しい状況にある。

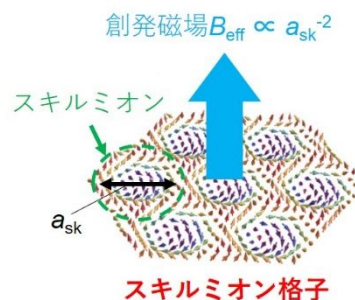


図1: スキルミオン格子の概念図。

2. 研究の目的

スキルミオンにおける輸送現象について光学測定という新しい切り口から迫ることで、ベリー位相効果によって引き起こされる新奇な伝導電子ダイナミクスの解明・開拓を目指し、ひいてはスキルミオンの新奇光機能性や巨大光学応答の実証を目指す。具体的には、スキルミオン由来の(1)電流誘起磁化(エデルシュタイン効果)、(2)磁気光学ファラデー回転の観測を目指す。以下ではそれぞれについてより詳細に言及する。

(1) スキルミオン由来のエデルシュタイン効果

エデルシュタイン効果は、ラシュバ分裂に代表されるようなスピンと運動量が一対一対応しているようなフェルミ面(スピン運動量ロッキング状態)を有する物質において、電流印加することで電子の分布を変調し、系にマクロなスピン偏極を与える効果である。本研究では、カイラル磁性体に反転対称性がないことに着目することでエデルシュタイン効果の実現を狙い、さらにそれとスキルミオンのベリー位相効果との相関について調べる。カイラルな対称性を持つ系では、ラシュバ系におけるエデルシュタイン効果とは対照的に、電流と平行な方向にスピン偏極を生じるという新しいタイプのエデルシュタイン効果が期待される。その上、近年の理論的研究によれば、この効果は異常ホール効果とよく似た数式で記述される項が存在するため、スキルミオンのベリー位相が重要な役割を果たす可能性がある。

(2) スキルミオン由来の磁気光学ファラデー・カー回転

上述のように、スキルミオンの形成時には、伝導電子の波動関数にベリー位相と呼ばれる量子力学的な位相が付与され、実効的に物質に対して数十テスラもの巨大な「創発」磁場が印加されている状況と等価になる。このため、印加磁場に比例する磁気光学効果も大きく増大する可能性がある。このことは磁気光学効果がホール効果の光学的拡張であるホール伝導度スペクトルと比例関係にあることから示唆されることであるが、さらにトポロジカルホール効果は光学領域において共鳴的増大を示すことが期待される。スキルミオンの形成によってバンド交差点が発現し、その交差点をよぎる光学遷移において共鳴が現れるのである。したがって、磁気光学効果についても共鳴的増大が期待される。

3. 研究の方法

本研究では、光学測定を行うことで自由度の高い測定を行うことで、上記の現象の実証を行う。

(1)電流誘起磁化(エデルシュタイン効果)では、電流印加時におけるスピン偏極に敏感な磁気光学カー回転を測定することでエデルシュタイン効果の検出を行い、各磁気構造との対応を調べることでスキルミオンによる寄与を導出する。また、(2)スキルミオン由来の磁気光学ファラデー・カー回転のテーマでは、テラヘルツから可視領域までの広い光学領域において測定することで、スキルミオン特有の信号を探索する。

4. 研究成果

(1) スキルミオン由来のエデルシュタイン効果

スキルミオン相を有する FeGe において、交流電流を印加しながらそれと同期した斜入射配置の磁気光学カー回転をロックイン測定することで、電流により生成されるスピン偏極(すなわちエデルシュタイン効果)の観測を行った。温度依存性・磁場依存性について詳しく調べたところ、転移温度以下で信号が発現し、信号が電流に比例するなど、エデルシュタイン効果と整合する振る舞いが観測された。しかしながら、光の入射方向や磁場印加方向を変えることで、電流によって誘起された磁化の方向を調べたところ、矛盾する振る舞いが見られた。原因はあまり定かではないが、物質の固有の性質を検出ではないと考えられるため、このテーマは断念することにした。

(2) スキルミオン由来の磁気光学ファラデー回転の観測

MnGe という合金の薄膜サンプルにおける磁気光学効果の測定をテラヘルツ領域において行った(図2(a))。この物質では、スキルミオンの形成(しかも特殊な3次元スキルミオン)が中性子散乱やローレンツ電子線顕微鏡といった手法によって確認されており(図2(b))、さらにトポロジカルホール効果は報告されている中でも最大級である。テラヘルツ時間領域分光法を用いた磁気光学測定の結果、低温に下げていくに従い、ホール伝導度スペクトルにおいて顕著な共鳴構造が観測された(図2(c-e))。磁場・温度依存性について詳細に調べ輸送特性とも慎重に比較したところ、この共鳴構造はこの物質の異常ホール効果・トポロジカルホール効果を引き起こす電子構造における光学遷移の重ね合わせによって記述できることがわかった。これと対応して、ファラデー回転スペクトルにも鋭い共鳴構造が現れ、磁気光学ファラデー回転は 20mrad 以上にもなる非常に大きなものになっている(図2(f))。すなわち、本研究の目論見通り、スキルミオン由来の大きな磁気光学効果の実現することができた。

また、ここで得られたスキルミオン由来の磁気光学効果は、同様のスキルミオン系である Gd₂PdSi₃ についても観測された。ただし、測定したエネルギー領域は 0.1eV 付近の遠赤外領域であり、上記の場合に比べて 100 倍程度大きなエネルギースケールである。すなわち、スキルミオン形成が比較的広いエネルギー領域の電子構造に及んでいることがわかった。また、今回構築した遠赤外領域の測定系を用いることで、他の物質系における磁気光学効果の研究も行った。

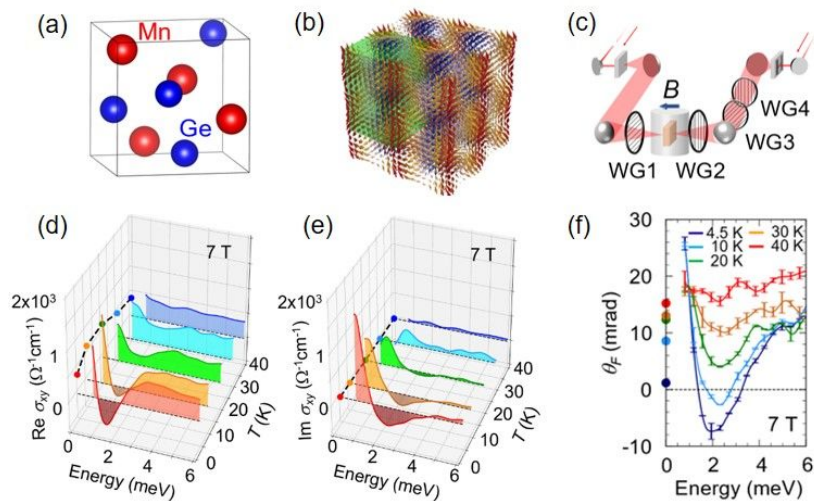


図 2 : (a)MnGe の結晶構造。(b) 3次元スキルミオンの概念図。(c)テラヘルツ時間領域分光法の概念図。(d,e)7 T 印加時におけるホール伝導度スペクトルの実部(d)と虚部(e)の温度依存性。(f)磁気光学ファラデー回転スペクトル。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Seki S., Garst M., Waizner J., Takagi R., Khanh N. D., Okamura Y., Kondou K., Kagawa F., Otani Y., Tokura Y.	4. 巻 11
2. 論文標題 Propagation dynamics of spin excitations along skyrmion strings	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-019-14095-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Okamura Y., Minami S., Kato Y., Fujishiro Y., Kaneko Y., Ikeda J., Muramoto J., Kaneko R., Ueda K., Kocsis V., Kanazawa N., Taguchi Y., Koretsune T., Fujiwara K., Tsukazaki A., Arita R., Tokura Y., Takahashi Y.	4. 巻 11
2. 論文標題 Giant magneto-optical responses in magnetic Weyl semimetal Co ₃ Sn ₂ S ₂	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-020-18470-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 茂木将孝, 岡村嘉大, 川村稔, 吉見龍太郎, 安田憲司, 森本高裕, 塚崎敦, 高橋圭, 高橋陽太郎, 永長直人, 川崎雅司, 十倉好紀
2. 発表標題 トポロジカル絶縁体表面における半整数量子ホール伝導度の検出
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 肉倉洋恵, 井口照悟, 岡村嘉大, 荻野慎子, 石渡晋太郎, 徳永祐介, 田口康二郎, 金子良夫, 十倉好紀, 高橋陽太郎
2. 発表標題 ヘキサフェライトにおけるエレクトロマグノンのテラヘルツ強励起効果
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加藤喜大, 岡村嘉大, 茂木将孝, 吉見龍太郎, 塚崎敦, 高橋圭, 川崎雅司, 十倉好紀, 高橋陽太郎
2. 発表標題 磁性トポロジカル絶縁体薄膜における量子異常ホール状態の赤外磁気光学分光
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 林悠大, 岡村嘉大, 金澤直也, 塚崎敦, 川崎雅司, 市川昌和, 十倉好紀, 高橋陽太郎
2. 発表標題 MnGe薄膜におけるテラヘルツ異常ホール効果の膜厚依存性
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡村嘉大, 村本丈, 加藤喜大, 金子竜馬, 藤代有絵子, 金子良夫, 上田健太郎, 金澤直也, 十倉好紀, 高橋陽太郎
2. 発表標題 磁性ワイル半金属Co ₃ Sn ₂ S ₂ における巨大磁気光学効果の観測
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加藤喜大, 岡村嘉大, 見波将, 藤村怜香, 茂木将孝, 吉見龍太郎, 塚崎敦, 高橋圭, 川崎雅司, 有田亮太郎, 十倉好紀, 高橋陽太郎
2. 発表標題 強磁性ラインノード半金属Fe ₃ GeTe ₂ 薄膜における異常ホール効果の分光研究
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 林悠大、岡村嘉大、カーンヌイエン、関真一郎、十倉好紀、高橋陽太郎
2. 発表標題 カイラル反強磁性体CoNb3S6における巨大磁気光学効果
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関