

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 22 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13531

研究課題名（和文）マグノン結晶の一般化固有値問題におけるバルク-エッジ対応のK理論による定式化

研究課題名（英文）Formulation of bulk-edge correspondence in magnonic systems

研究代表者

佐藤 浩司（Sato, Koji）

東北大学・金属材料研究所・助教

研究者番号：70708114

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,300,000円

研究成果の概要（和文）：ボゾン系におけるトポロジカル現象の理解を目的に、磁性体におけるマグノンに着目して研究を行った。双極子相互作用を含んだマグノンと伝導電子の相互作用により、伝導電子がスピン軌道相互作用を持たない場合でも、異常ホール効果が起こることを示した。また、マグノン系への応用を念頭に、ワイル半金属についての研究も行い、時間反転対称なワイル半金属の場合のトポロジカル不変量の構造を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：We theoretically investigated magnons for the purpose of understanding topological phenomena in bosonic systems. We found that conduction electrons coupled with magnons under dipolar interactions can exhibit anomalous Hall effect even in the absence of spin-orbit interactions. Moreover, we investigated Weyl semimetals motivated by a resemblance in a certain type of magnonic systems, and we clarified the structure of topological invariants in time-reversal symmetric Weyl semimetals.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：マグノン トポロジカル絶縁体 スピン波 ワイル半金属

1. 研究開始当初の背景

フェルミオン系におけるトポロジカル絶縁体は、理論と実験の両方で近年盛んに研究が行われてきた。このようなトポロジカル相では、バルクは絶縁体でありながらも、その境界上に金属的なエッジ状態がロバストに存在する特殊な構造を持つ。各種のトポロジカル絶縁体は対称性と空間次元によって、ベリー位相等のバルクのバンド構造の性質を反映したトポロジカル不変量によって特徴付けられる。また、このバルクに関する不変量に関連して出現するロバストなエッジ状態は、そのエッジ状態の個数などで表されるエッジに付随したトポロジカル不変量で特徴付けられる。このような物質のトポロジカル相に関する研究は、フェルミオン系だけに留まらず、フォトリック結晶やマグネティック結晶における光やスピン波などのボゾン系にも拡張され始めていた。例えば、マグネティック結晶におけるマグノンでも、整数量子ホール効果に類似して、バルク指数(チャーン数)が非自明な値をとり、また、それに付随したエッジ状態の存在も数値計算によって確認されていた。フェルミオン系のトポロジカル現象については、対称性や空間次元によって、その性質を特徴付けるトポロジカル不変量の構造はよく理解されている状況にあったが、ボゾン系の場合では、一般化固有値問題などに見られるようにフェルミオン系との相違点があり、そのトポロジカル不変量やバルク-エッジ対応などに対する理解を深めることが求められていた。

2. 研究の目的

本研究では主に磁性体における磁化の集団励起であるマグノンのトポロジカルな特性に着目した。このようなマグノンがもたらすロバストなエッジ状態の理解は、スピントロニクスデバイスやスピン輸送への応用の観点からも有用なものと思われるためである。マグノン系の具体的な例を解析することによって、ボゾン系におけるトポロジカル現象をより一般的に理解することを本研究の目的とした。また、研究を進めて行く過程において、磁気双極子相互作用がある場合によく知られている局在化した非相反的なスピン波とワイル半金属に類似性があることがわかり、その理解のためにワイル半金属のトポロジカル指数の数学的な構造の理解も目標とした。

3. 研究の方法

(1) 磁気双極子相互作用を含んだマグノンはベリー位相を持つことが知られている。その理解を深めるために、このベリー曲率を

持ったマグノンと伝導電子が相互作用する場合において、電子のベリー位相や輸送特性がどのような影響を受けるのかについて調べた。電子-マグノンの間の相互作用を sd 交換相互作用とし、電子の自己エネルギーや伝導率などの摂動計算を解析的に行った。さらに、それらの解析的な結果の評価を数値的に行った。

(2) 時間反転対称なワイル半金属において、そのトポロジカル指数の数学的構造を調べた。この系ではフェルミ・アークとディラック・コーンが共存することが理論的に指摘されている。3次元トポロジカル絶縁体のトポロジカル指数構造は strong と weak からなる不変量で与えられる。3次元トポロジカル絶縁体においてその指数をコホモロジーやホモロジー群を使って計算する方法を一般化することによって、ワイル半金属の場合にも適用できる方法を導いた。それによって、時間反転対称なワイル半金属のトポロジカル指数を数学的に導出した。さらに、ワイル点の存在によって指数がどのように変化するかについて、具体的な計算を行って、より物理的な描像を得た。

4. 研究成果

(1) 磁気双極子相互作用を含んだマグノンと伝導電子の相互作用に由来した異常ホール効果(文献)

磁気双極子相互作用を含んだマグノンはベリー位相を持つことが知られており、そのようなマグノンと伝導電子を sd 交換相互作用の形で相互作用させた。まず、電子のベリー曲率がこの状況下でどのような影響を受けるかを調べるために、電子の自己エネルギーを計算した。その結果、sd 交換相互作用型の相互作用ではスピンが保存することが原因となり、電子系におけるベリー曲率は発生しないことを示すことができた。

この結果、電子のベリー曲率に付随した内因性の異常ホール効果は発現しないことがわかるので、それ以外のホール効果の寄与を調べた。上記の sd 交換相互作用を摂動的に扱い、久保公式を使って有限温度でのホール伝導率を計算した。その結果、リーディングオーダーの寄与は3次の摂動によって与えられることがわかった。この量はスピнкаイラリティと電子部分のグリーン関数で表すことができる。マグノンからの寄与はこのスピнкаイラリティの部分に現れ、磁気双極子相互作用がある場合のみにこの寄与が効いてくる構造になっており、このホール伝導率は磁気双極子相互作用に由来することが明確にわかる。数値計算を行い、この3次のホール伝導率を評価し、温度依存性なども得ること

ができた。この結果は、双極子相互作用を持ったマグノンが熱励起され、電子がそれによって散乱されることによってホール効果が生じるという描像で理解することができる。磁気双極子相互作用はマグノンに関するスピン軌道相互作用と解釈することができ、もともとの電子にスピン軌道相互作用がない場合でも、このようなマグノンを通して異常ホール効果が起こることが可能であることを本研究の結果は示唆している。このタイプの異常ホール効果は他の内因性・外因性の異常ホール効果からの寄与をドーピングなどで抑えることができれば、磁性半導体などで観測されることが期待される。

(2) 時間反転対称なワイル半金属の不変量の構造

近年の研究で、時間反転対称なワイル半金属では、フェルミ・アークとディラック・コーンが共存し、ハミルトニアンのパラメータを変化させるとそれらの構造も変化することが理論的に示唆されていた。この場合のトポロジカル指数の構造を理解するために、まず時間反転対称な場合の3次元トポロジカル絶縁体のトポロジカル指数の一般化を行った。トポロジカル絶縁体の場合の strong と weak トポロジカル指数は、Fu-Kane-Mele 不変量として計算することができる。さらに、これらは3次元 Brillouin zone のトーラスにおけるコホモロジー群からも得ることができる。また、ポアンカレ双対性を使うことによって、ホモロジー群からも同じ情報を得ることができる。

ワイル半金属の場合は、ワイルチャージの和がゼロになる様なワイル点の配置があり、時間反転対称なワイル半金属の場合は、トポロジカル絶縁体の構造に加えて、これらのワイル点からの影響を考える必要がある。本研究では、この場合のトポロジカル指数の数学的な記述を考えた。結果として、3次元 Brillouin トーラスからワイル点を除いた空間における equivariant コホモロジー群を使って、時間反転対称なワイル半金属のトポロジカル指数構造を得ることができた。これらの指数は3次元トポロジカル絶縁体の場合に現れた strong と weak トポロジカル指数と、ワイルチャージに関連した指数のセットとして理解することができる。ワイルチャージがあることによって、そのチャージに関係して、これらの strong と weak 不変量はトポロジカル絶縁体の場合と比べて変更を受けることがわかった。また、複数あるワイル点において、どのワイル点をペアにするかによっても非自明な変更を受けることがわかった。トポロジカル絶縁体の場合と同様、ホモロジーの方法を使ってもこれらの不変量を計算することが可能である。この場合についても Brillouin zone 内のループの同値関係

から不変量を導出した。この様に、コホモロジー、またはホモロジーを使い、時間反転対称なワイル半金属のトポロジカル指数の一般的な構造を明らかにすることができた。

また、トポロジカル指数が異なった2種類の時間反転対称なワイル半金属を接合した際には、それぞれの指数の違いに応じて、界面にトポロジカルなモードが出現する可能性があることも期待される。本研究ではこのような指数の異なった2種類のワイル半金属のバルクを重ねて、その界面におけるスペクトル密度を数値計算によって求めた。これによって、界面に局在した状態が確認され、本研究で求めていたトポロジカル指数と整合性のある結果が示された。この結果は現在論文として投稿中であり、プレプリントは arXiv:1705.06657 で公開している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 3 件)

Dazhi Hou, and Zhiyong Qiu, Joseph Barker, Koji Sato, Kei Yamamoto, Saül Véllez, and Juan M. Gomez-Perez, Luis E. Hueso, and Félix Casanova, and Eiji Saitoh, “Tunable Sign Change of Spin Hall Magnetoresistance in Pt/NiO/YIG Structures”, Phys. Rev. Lett. 118, 147202 (2017), 査読有
DOI:10.1103/PhysRevLett.118.147202}

Koji Sato and Oleg. A. Tretiakov, “Electrically controlled pinning of Dzyaloshinskii-Moriya domain walls”, Appl. Phys. Lett. 108, 122403 (2016), 査読有
DOI: 10.1063/1.4944664

Kei Yamamoto, Koji Sato, Eiji Saitoh, and Hiroshi Kohno, “Anomalous Hall effect driven by dipolar spin waves in uniform ferromagnets”, Phys. Rev. B 92 140408(R) (2015), 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevB.92.140408

[学会発表](計 3 件)

Koji Sato, “Electrically controlled pinning of Dzyaloshinskii-Moriya domain walls”, Regensburg-Tohoku Workshop on Solid State Physics, 2017年3月28-30日, 山形市

Koji Sato, “Anomalous Hall effect driven by uniform ferromagnets”, APS March Meeting, 2016年3月14-18日, Baltimore, USA

Koji Sato, “Anomalous Hall effect driven by uniform ferromagnets”, Mathematical approach to Topological Phases in Spintronics, 2015年10月5-9日, 東北大学

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤浩司 (Sato, Koji)

東北大学・金属材料研究所・助教

研究者番号：70708114

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし

(4) 研究協力者 なし