

変形された Su-Schrieffer-Heeger 模型におけるトポロジカル励起の研究

金丸 将之（物性理論教室）

トポロジカル物質の中には、対称性に護られたトポロジカル状態を持つ物質が存在する。例として、カイラル対称性をもち、端が存在する 1 次元の Su-Schrieffer-Heeger (SSH) 模型においては、ゼロエネルギーの固有値をもつエッジ状態が見られる。この模型を代数的に変形することで、従来のカイラル対称性が破れ、一般化カイラル対称性を保存する模型が得られる。そうした系での「バルク・エッジ対応」やエッジ状態の安定性については文献[1,2]より調べられている。本研究では、エッジ状態と同様に、ゼロエネルギー固有状態として現れるトポロジカル励起の一種であるソリトン解が、一般化カイラル対称性を満たす系ではどのように振る舞うのか、また、その系における時間発展についても数値計算を行った。

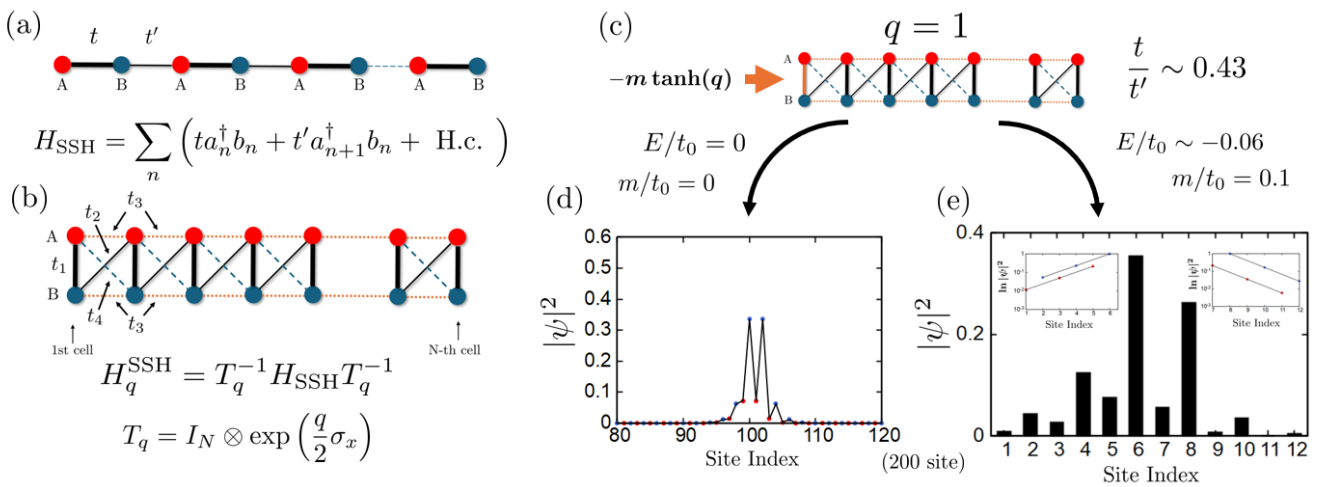
具体的な計算方法として、ソリトン解が存在する SSH 模型のハミルトニアンに対して一般化カイラル対称性を満たすように変形を行い、スタaggerドポテンシャルが存在する系での安定性や小さな系での振る舞いを調べる際には、数値的厳密対角化法を用いた。また、電子格子相互作用が存在する系では反復法を、電場を印加した際の変形した系での時間発展では、文献[3]をもとに反復法と厳密対角化法を合わせて用いた。

結果として、変形を行った系では、ソリトン解は方向によって異なる指数関数的な減衰をしていることが分かった。また、スタaggerドポテンシャルがある値を超えると、波動関数が局在しなくなり、ソリトン解が形成されないことが分かった。小さな系でも、無限系と同様の局在長をもつ非対称なソリトン解をエッジ状態の議論[2]をもとに厳密な固有状態として再現することができた。電子格子相互作用をもつ系では、電子数が半充填からさらに 2 つ多い場合を考え、変形前は 2 つの分離されたソリトン解が安定となるのに対し、変形された系では 2 つのソリトン解が合体しバイポーラロンとなるときのエネルギー的に安定となることを示した。また、変形された SSH 模型における波動関数の時間発展を計算するための自己無撞着方程式を導出し、この式を用いて、電場を印加した際のバイポーラロンの動的な振る舞いを数値計算によって定量的に調べた。

[1] Tohru Kawarabayashi and Yasuhiro Hatsugai, Phys. Rev. B **103**, 205306 (2021).

[2] Tohru Kawarabayashi and Yasuhiro Hatsugai, JPS Conf. Proc. **38**, 011173 (2023).

[3] Yoshiyuki Ono and Akira Terai, J. Phys. Soc. Jpn. **59**, 2893 (1990).



(a) SSH模型。(b) 代数的変形を施したSSH模型。 q は変形の強さ、 σ_x はパウリ行列の x 成分を表す。(c) 境界でのホッピングを調節した (b) の系。(d) (c) の200 siteの系での0エネルギー固有状態であるソリトン解。(e) (c) の12 siteの系で質量項を導入したときのソリトン解。左右で異なる指数関数的な減衰をしている。ここで、 $t_0 = (t + t')/2$ であり、ホッピング積分の平均値を表す。

磁性多層膜における温度勾配下で励起されるスピン波に関する数値的研究

庄子瑛章 (物性理論教室)

エレクトロニクスとマグネティクス融合分野であるスピントロニクスにおいて、スピン流と熱流の相互作用が注目され、スピントロニクスと呼ばれている。中でも、スピン流と熱流の相関を扱うスピнкаロリトロニクスと呼ばれている。スピнкаロリトロニクス分野では、温度勾配下の強磁性体に対して、熱流と垂直方向に電圧が生じる異常ネルンスト効果に注目が集まっており、磁性体由来の横型熱電効果として研究がおこなわれている。[1]磁性体中の熱電効果では、通常の電子系の温度勾配方向の熱起電力である Seebeck 効果に加えて、スピン波によって伝導電子が運ばれ、温度勾配方向の起電力を生む効果である（マグノンドラッグ効果）も重要な役割を果たしており、実験と理論の両面から調べられている。[2, 3]電子系の熱起電力を増強する方法はバンドエンジニアリングなどによって提案されているが、マグノンドラッグ効果を増強する方法については明らかになっていない。

本研究では、このマグノンドラッグ効果を増強する系として、GMR で用いられている系として知られている磁性多層膜に注目した。[4]磁性多層膜の層間結合によるマグノン-マグノン散乱により、強磁性層中の指向性スピン波に現れる影響について数値的な解析を行った。計算によって、強磁性体に温度勾配を印加することで勾配方向に進行するスピン波の振幅の増大を確認した。また、磁性多層膜の層間結合によってスピン波バンドの分裂が起こった。(図 1)磁性多層膜の層間に反強磁性結合があるときに、指向性スピン波が増強され、マグノンドラッグ効果がより大きくなることが明らかになった。(図 2)これは反強磁性結合によるスピン波振幅の増大を意味しているものであった。また、異なる磁性材料を用いた多層膜において、磁性層間に反強磁性結合があるときは、下層の強磁性体の交換相互作用が弱いほど上層でのマグノンドラッグ効果が大きくなることが明らかとなった。一方、磁性層間に強磁性結合があるときは、下層内の強磁性交換相互作用が強いほど上層でのマグノンドラッグ効果が大きくなることが明らかとなった。

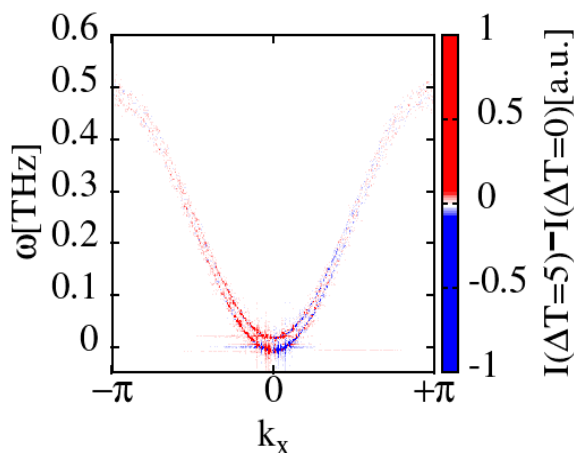
したがって、磁性多層膜を用いることで、指向性スピン波を増大できることから、マグノンドラッグ効果を増強しうることが明らかとなった。

[1] W. Nernst. Ann. Phys, **267**, 760(1887).

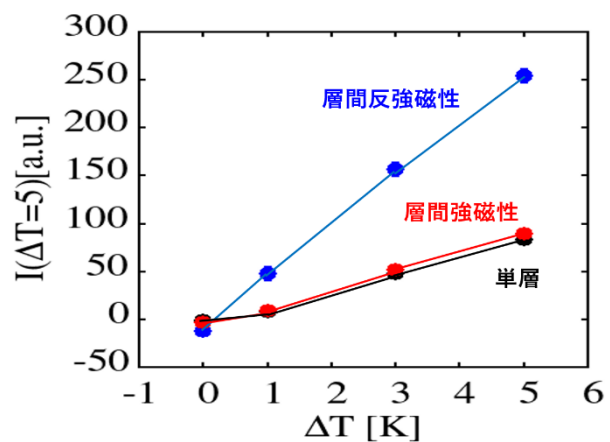
[2] F. J. Blatt, D. J. Flood, V. Rowe, P. A. Schroeder, and J. E. Cox. Phys. Rev. Lett, **18**, 395 (1967).

[3] T. Yamaguchi, H. Kohno, and R. A. Duine. Phys. Rev. B, **99**, 094425 (2019).

[4] P.Grunberg, R.Schreiber, Y.Pang, M. B. Brodsky, and H. Sowers. Phys. Rev. Lett.,**57**, 2442 (1986).



(図 1)磁性多層膜におけるスピン波バンド



(図 2)層間相互作用の違いにおける温度勾配と指向性スピン波の関係

円偏光照射によるフラストレート磁性体中の単スカーミオンのトポロジカル量制御

米澤拓磨 (物性理論教室)

本研究では、円偏光を用いたフラストレート磁性体中の磁気スカーミオン構造のトポロジカル量制御に対する数値解析を行った。先行研究[1]の課題であった、単体のスカーミオンのトポロジカルチャージ制御と制御に必要な条件を明らかにすることを研究目的としている。最近接および次近接相互作用を考慮した磁気フラストレーション系を用い、単スカーミオンを生成した。スカーミオン構造に対する円偏光照射によるトポロジカル逆ファラデー効果 (TIFE) の影響を調べ、円偏光の強度と照射時間においてトポロジカルチャージが反転しやすい条件を示した。また、スカーミオンの反転確率の温度依存性を解析し、トポロジカルチャージが反転する可能性の高い温度域と磁化構造が崩れやすい温度領域を特定した。これらの結果は、スカーミオンを用いたデバイス設計や応用において、トポロジカルチャージ制御の条件を理解するために重要である。

[1] M. Miyata, J. Ohe, and G. Tatara, Physical Review Applied **18**, 014075 (2022).

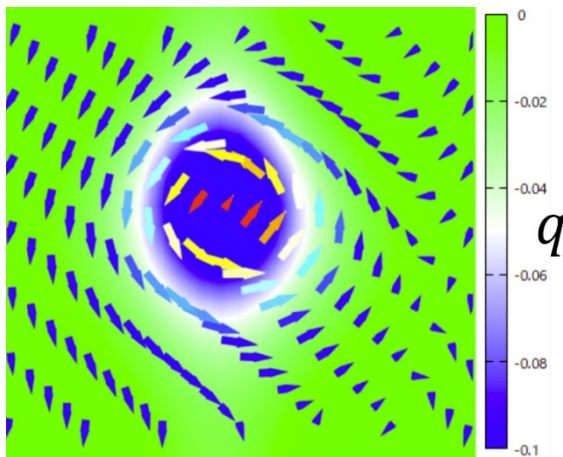


図 1: フラストレート系において生成されたスカーミオンのカラープロット。矢印は磁化ベクトルを表しており、カラーマップはスカラーカイラリティの大きさを示したものの。

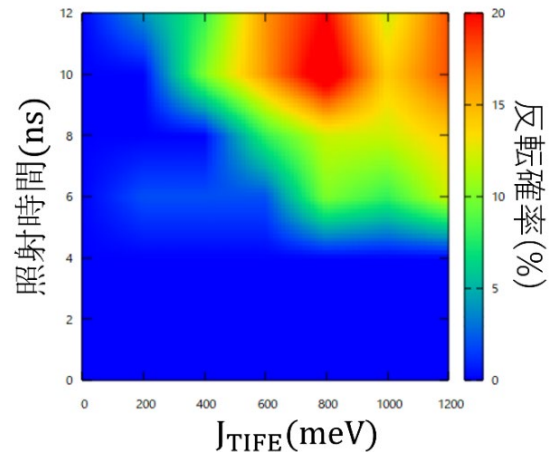


図 2: 単体の磁気スカーミオンに対して円偏光を照射し、トポロジカル逆ファラデー効果 (TIFE) によるトポロジカルチャージが反転した領域を図示した。縦軸は円偏光の照射時間、横軸は円偏光によって加えられたエネルギーである。