

変形された2次元トポロジカル系のエッジ状態

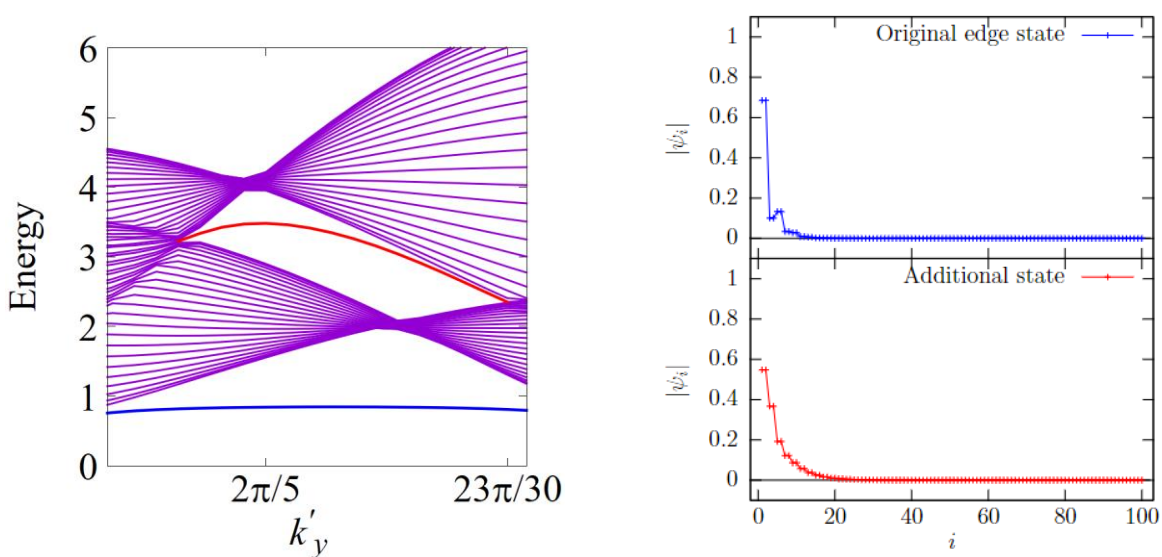
早川 浩平 (物性理論教室)

通常の超伝導状態は、ある種の物質が極低温で電気抵抗がゼロになる現象で、超伝導状態では電気がエネルギーを失わずに物質中を流れる。トポロジカル超伝導体では、物質内部（バルク）では超伝導状態特有のギャップが開いているが、バルクに非自明なトポロジカル不変量を持ち、系の境界（端、表面）にトポロジカルな状態（エッジ状態）が現れる。これはバルクエッジ対応と呼ばれる。現在、トポロジカル超伝導体は、低エネルギーロスの電力素子の開発や量子コンピュータへの応用が期待されている。

近年、ディラックコーンを傾けるようなハミルトニアンの変形的変形が研究されている。カイラル対称性を破るが、一般化されたカイラル対称性と呼ばれているものを保つという特徴をもつ。この変形でトポロジカルな性質は基本的に不変であるが、対称性の破れに対しては非自明な結果が証明されている。

本研究では、空間的に異方性を持つ2次元の $d_{x^2-y^2}$ 波超伝導体模型のトポロジカルな性質について調べる。この模型はカイラル対称性により、摂動などに強いエッジ状態が存在することが知られている。特に、質量項 (staggered potential) を加えた場合や副格子間ではなくスピン自由度を利用してハミルトニアンの変形的変形により、どのような性質が現れるか数値的に解析した。

単に模型にオンサイトにポテンシャルを与えた場合では、エッジ状態が安定に存在する波数領域が狭まることがわかった。スピン自由度で変形をした後に staggered potential を加えた系を調べると、単にゼロエネルギーエッジ状態が staggered potential 項の値だけ上下にシフトする。一方で、質量項 (staggered potential) を加えてからスピン自由度で変形すると、興味深いことに、ゼロエネルギー付近の元々のエッジ状態に加えて、縮退が解けた2つのバンドギャップの隙間に新たに上下1本ずつの新しいエッジ状態が現れた。これらの新たなエッジ状態の局在長は、バルクのバンドに近づくにつれて増大し、バルクのバンドに吸収される点で発散しているように見えることがわかった。



図：(左) 2次元 $d_{x^2-y^2}$ 波超伝導体模型を変形した場合のエネルギースペクトル。(右) 系の端に局在する元々存在するエッジ状態(左図の青)及び新たに現れたエッジ状態(赤)の波動関数。

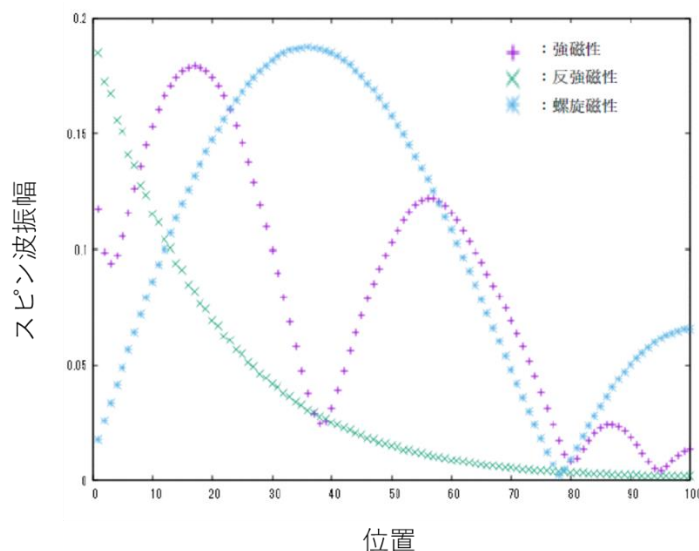
空間反転対称性の破れた磁性体における磁化ダイナミクス

橋本 隆裕 (物性理論研究室)

磁性体中を一方向に伝わるスピン波は、新規マグノニック回路中の情報伝達などの応用が期待されている。しかしながら、電流と異なり、スピン波はフォノンや電子との結合で緩和してしまうため、緩和距離の長いスピン波が求められている。先行研究により、反強磁性対中を伝わるスピン波が、ネール温度付近で非常に長い緩和長を持つことが報告されている [1]。

本研究では、空間反転対称性の破れた相互作用を有する磁性体中の磁化ダイナミクスについて数値計算を用いた解析を行った。結晶構造に空間反転対称性がない磁性物質中では、隣り合う磁化はねじれた磁化構造を取り、ジャロシンスキー・守谷相互作用 (DM) と呼ばれている。DM 相互作用と強磁性結合が共存するような系では、らせん磁化構造が現れる。らせん磁化構造は右巻き・左巻きの 2 種類を区別することができる。通常の強磁性結合と DM 相互作用が競合する磁性体中の磁化ダイナミクスを計算した。計算は、磁化の運動方程式である Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式を 4 次の Runge-Kutta 法を用いて計算した。計算によって、DM 相互作用の正負によって、らせん磁化構造の右巻き、左巻きが決まることが分かった。さらに電流印加の影響を表すスピントルク項を導入することで、電流誘起のらせん磁化構造の平行移動が起こることがわかった。この平行移動の速度は、電流の強さに比例することが分かった。スピン波伝播にたいする計算では、1次元上に並んだスピンの端を人工的に歳差運動させることでスピン波を励起し、系を伝わる際の緩和長を計算した。緩和長を比較する系として、強磁性状態、反強磁性体、らせん磁性体を考えた。計算の結果、らせん磁性体中のスピン波が最も緩和長が長くなった。

[1] M. Dabrowski et al, Phys. Rev. Lett. **124**, 217201 (2020)



図：スピン波振幅。左端のスピンを歳差運動させることで、右方向にスピン波が伝わっている。

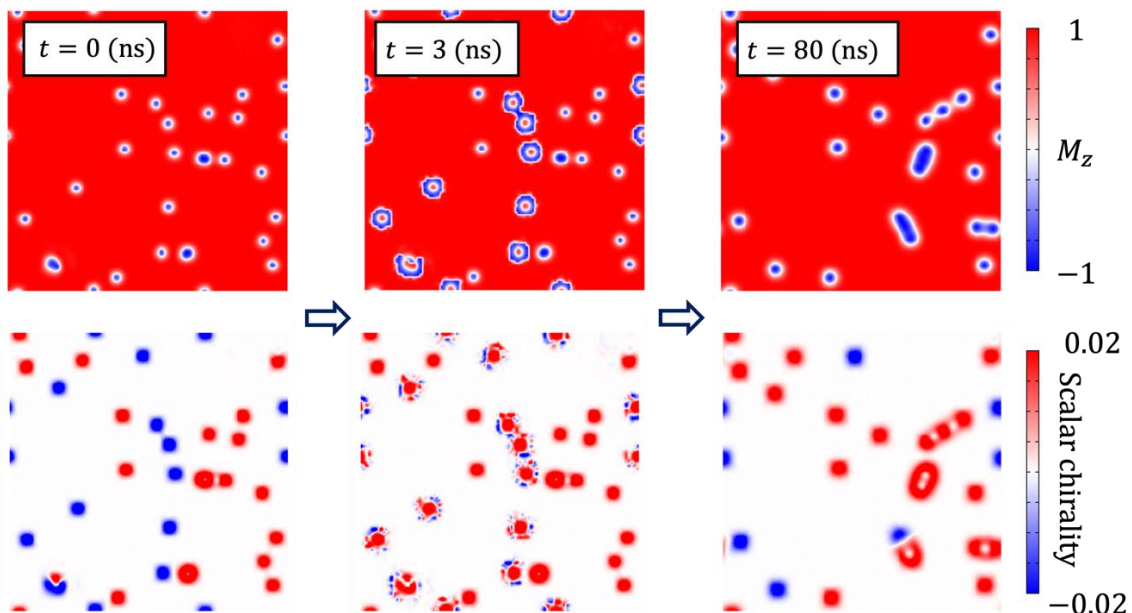
円偏光によるフラストレート磁性体中のトポロジカル量制御

宮田麻那（物性理論研究室）

円偏光を利用したフラストレート磁性体のトポロジカルチャージの制御に対して、数値的研究を行なった。磁気スカーミオン構造は、一般にジャロシンスキー・守谷相互作用によって形成されるが、他にもフラストレーション系の J_1 - J_2 - J_3 相互作用を持つ古典ハイゼンベルク模型でも報告されている[1]。フラストレーション系における磁気スカーミオンでは、磁化構造の特徴量であるトポロジカルチャージが正負の場合で縮退している。そのため、ランダム状態からの緩和によってスカーミオン構造を作成すると、系の中に正負のトポロジカルチャージがランダムに分布する。先行研究により、光の有効ゲージ場と伝導電子と局所スピンのs-d相互作用を考慮することで、円偏光がトポロジカルチャージと結合することがわかっている[2]。この効果をトポロジカル逆ファラデー効果と呼ぶ。トポロジカル逆ファラデー効果を有効磁場として取り入れ、Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) 方程式を計算することによって、スピンドYNAMICSを解明した。本研究では、円偏光によるフラストレート磁性体中のトポロジカルチャージの制御に対する数値的研究を行なった。

LLG方程式を数値的に解くために4次のRunge-Kutta法を用いた。基底状態は磁化のランダム状態からの緩和過程を利用して得た。トポロジカル逆ファラデー効果を有効磁場として取り入れ、磁化ダイナミクスを表すLLG方程式を数値的に解いた。円偏光の向きによって正あるいは負のトポロジカルチャージの制御をすることができる。実際にトポロジカルチャージがランダムに分布したスカーミオン構造に右向き円偏光を照射すると、一部の負のトポロジカルチャージを持つスカーミオンだけが円偏光によって正のトポロジカルチャージにスイッチングすることがわかった[3]。

また、トポロジカル逆ファラデー効果の温度依存性を調べた。フラストレーション系での磁気スカーミオンは30(K)未満で出現する。偏光の強度を $L=0.4 \times 10^{-8}$ (Tm²)としたときの照射時間と温度の依存性を調べた。スカーミオンが温度によって変更をうける領域でもトポロジカルチャージを制御でき、さらにスカーミオン構造が壊れる領域でも、トポロジカルチャージ自体は系全体で制御できることが明らかになった。



- [1] T. Okubo, S. Chung, and H. Kawamura, Phys. Rev. Lett. **108**, 017206 (2012)
 [2] K. Taguchi, J. Ohe, and G. Tatara, Phys. Rev. Lett. **109**, 127204 (2012)
 [3] M. Miyata, J. Ohe, and G. Tatara, Phys. Rev. Appl. **18**, 014075 (2022)