

カイラル磁性体中のスピン波伝播に対する数値的研究

杉下将哉（物性理論教室）

CrNb₃S₆ に代表される単軸のカイラル磁性体中では、Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用と Heisenberg 型の強磁性交換相互作用が競合し、数十 nm 程度の周期で磁化がらせん状に配置されたカイラルらせん磁気構造 (Chiral HeliMagnet, CHM) が実現する。この状態に、らせん軸に垂直な方向に磁場を印加することによって、らせん構造が周期的にほどけ、カイラルソリトン格子 (Chiral Soliton Lattice, CSL) と呼ばれる特異な磁気構造に変化する。CSL の存在は 2012 年戸川らによって、単軸のカイラル磁性体 CrNb₃S₆ で、ローレンツ透過型電子顕微鏡での観測により証明された [1]。このような磁化構造は、外場に対して非常に安定であり、マグノンデバイスに適しているため、近年注目されている。CSL は系の両端を固定することでソリトンを閉じ込めることができる [2]。その状態に交流磁場を印加すると、ソリトンが連成振動子のよように振舞うことが数値計算でわかっている [3]。

本研究では CSL 中の集団励起状態によるスピン波伝播に対する数値的研究を行った。計算手法としては、磁化の運動方程式を表す Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式を 4 次 Runge-Kutta 法で解いた。初期状態としてソリトンが 11 個入る系を用意し、一端にある 1 つのソリトンに局所的に交流磁場を印加することで、スピン波伝播の様子を調べた。印加する周波数は、この系で求めた CSL の共鳴周波数とした。共鳴周波数で交流磁場を印加したところ、どの共鳴周波数でも強制強磁性の場合より大きなスピン波を伝播していることがわかった。また共鳴周波数が高くなるとソリトン同士の斥力で大きなスピン波を伝播するが、最大共鳴周波数では、安定したソリトンの振動が損なわれスピン波の減衰が大きくなった。これは集団励起されたソリトンが、ソリトン同士ペアを作りスピン波を伝播していたが、振動数が早くなることでソリトンのペアが生じづらくなり、ソリトン単独の振動が増えるためであると考えられる。スピン波振幅の距離的な損失率は CSL では最小で約 53.14%、強制強磁性では約 99.93% となるので、減衰の少ないスピン波伝播が明らかになった。

[1] Y. Togawa et al. Phys. Rev. Lett. **108**, 107202 (2012).

[2] Y. Togawa, et al. Phys. Rev. B **92**, 220412 (2015).

[3] 小野寺純一，東邦大学，卒業論文 (2018).

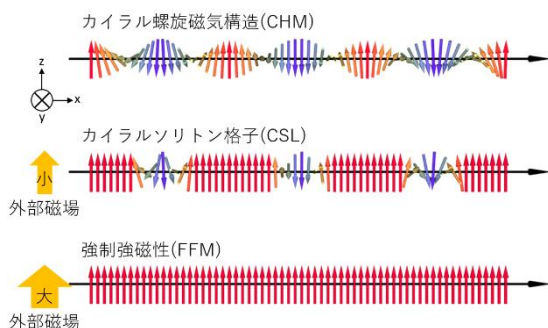


図 1: CSL のイメージ。周期的な螺旋構造を持つ CHM に外部磁場を印加することで実現される。さらに大きな外部磁場を加えると FFM となる。

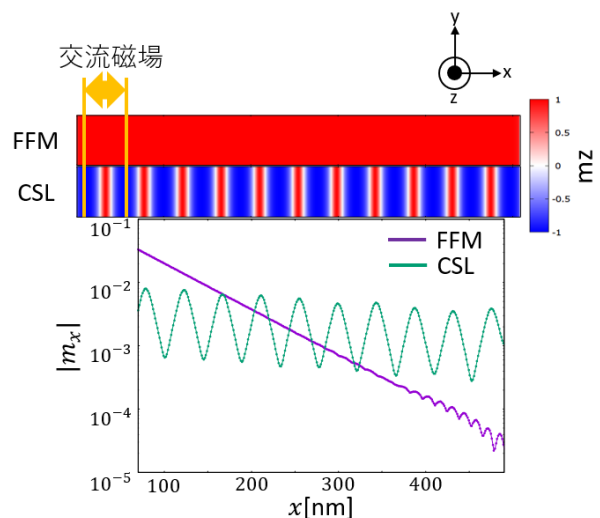


図 2: CSL と FFM のスピン波伝播の違い。系の一端に交流磁場を印加し、スピン波伝播の大きさを計算した。スピン波減衰率に大きな差が見られた。

カイラル磁性体中に形成される 非対称スカーミオンと磁化ダイナミクスに対する理論的研究

室岡玲美（物性理論学教室）

カイラル磁性体は Dzyaloshinskii-Moriya (DM) 相互作用、強磁性相互作用および外部磁場によるゼーマン効果によって、スカーミオンと呼ばれる渦状の磁化構造を形成する。スカーミオンはトポロジカルに安定した構造で、壊れにくく準粒子のようにふるまい、磁壁よりも小さい電流で駆動する。これらの性質から、磁気記憶の情報担体への応用が期待されている。近年、カイラル磁性体に強い磁気異方性効果を加えることで、非対称な内部構造をもつスカーミオンが形成されることが報告された[1]。非対称スカーミオンは図 1 のように、三日月形の反ボルテックス部分と円形のボルテックス部分から成り、中心の磁化は外部磁場に対してそれぞれ平行および反平行を向く。さらに周囲の磁化は面直方向に磁化困難軸をとる磁気異方性効果によって、面内に寝るような構造である。本研究は非対称スカーミオンの電流駆動および振動磁場応答について調べ、新しいスカーミオンダイナミクスの発見を目的とした。Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式を 4 次の Runge-Kutta 法を用いて計算を行った。

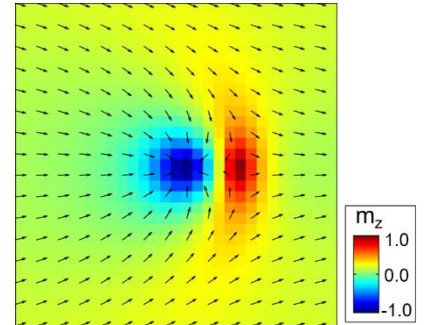


図 1 非対称スカーミオン

1. 非対称スカーミオンの電流駆動

非対称スカーミオンは電流に対して回転を伴う並進運動を行うことがわかった[2]。対称なスカーミオンは電流によって並進運動のみをするが、非対称スカーミオンの場合、三日月形部分が円形部分より先行するように回転しながら移動する。回転運動が生じる原因が、非対称スカーミオンの内部構造では、三日月形部分が電流駆動による散逸力を強く受けるためであることを明らかにした。

2. 非対称スカーミオンの振動磁場応答

対称な構造をもつスカーミオンは振動磁場によって回転するモードが励起される[3]。さらに集団励起したスカーミオン格子の磁化ダイナミクスからスピン起電力を計算すると、各スカーミオンで生じた電圧が直列につながるカスケード効果が現れる[4]。これに対して非対称スカーミオンに振動磁場を印加した場合には、内部構造が近づいたり離れたりを繰り返すモードが生じることがわかった。このモードから計算されるスピン起電力は、スカーミオン内部の三日月形部分と円形部分の起電力がそれぞれ反対方向に向くために打ち消しあい、対称スカーミオンと比較して小さい電圧を得た。

[1] A. O. Leonov and I. Kézsmárki, Phys. Rev. B, 96(014423), 2017.

[2] R. Murooka, A. O. Leonov, K. Inoue and J. Ohe, Sci. Rep., 10(396), 2020.

[3] Y. Onose, Y. Okamura, S. Seki, S. Ishiwata, and Y. Tokura, Phys. Rev. Lett., 109(03763), 2012.

[4] Y. Shimada and J. Ohe, Phys. Rev. B, 91(174437), 2015.

量子モンテカルロシミュレーションによるカゴメ磁性体上のベリ一位相の研究

石井航太（物性理論教室）

カゴメ格子上の反強磁性体において、特に平均磁化が全磁化の $1/3$ の場合の量子相については、これまで盛んに研究が行われてきたが、最近、異方的な場合^[1]について、**tripartite entangled plaquette** 相の存在が議論されている。この相では基底状態が断熱的に 3 量子ビット W 状態^[2]につながり、ハミルトニアンの特称性が完全に保たれている。このような相は古典的な秩序変数によって特徴づけることができず、トポロジカル変数のような新しい秩序変数による特徴づけが期待されている。

本論文ではこの異方的なスピン系において Z_3 ベリ一位相^[3]を 27 スピンまでの系について Lanczos 法による近似を用いた厳密対角化法によって計算し、この系では異方性が強くなると Z_3 ベリ一位相が 0 から $2\pi/3$ へ転移することを示した^[4]。そして、より定量的な分析を行うため、量子モンテカルロ法^[5]によって 1728 スピンのまでの系について計算した。その結果、強磁性相が予想される領域と Z_3 ベリ一位相が量子化しない領域の一致、**tripartite entangled plaquette** 相が現れる領域と Z_3 ベリ一位相が $2\pi/3$ に量子化する領域の一致をそれぞれ定量的に確認した。これにより、 Z_3 ベリ一位相が **tripartite entangled plaquette** 相を特徴づけるのに有効なトポロジカル変数であることを示した。

[1] J. Carrasquilla, G. Chen, and R. G. Melko, Phys. Rev. B 96, 054405 (2017).

[2] W. Gü r et al., Phys. Rev. A 62, 062314 (2000).

[3] Y. Hatsugai, and I. Maruyama, EPL 95, 20003 (2011).

[4] T. Kawarabayashi, K. Ishii, and Y. Hatsugai, J. Phys. Soc. Jpn. 88, 045001 (2019).

[5] Y. Motoyama, and S. Todo, Phys. Rev. E 87, 021301(R) (2013).

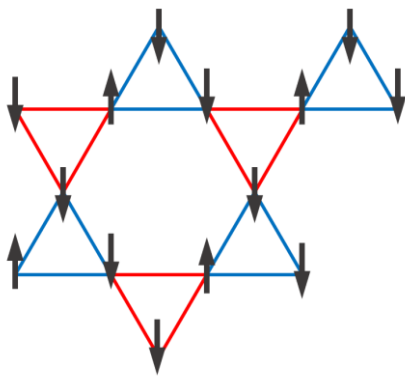


図 1. カゴメ格子。異方的な場合のハミルトニアンは

$$\mathcal{H} = \sum_{\langle i,j \rangle} [J_{b(i,j)} S_i^z S_j^z + J_0 (S_i^+ S_j^- + S_i^- S_j^+)]$$

と表される。ここで、ボンド $\langle i,j \rangle$ が上（下）向き
の三角形に属するとき $b(i,j) = 1(2)$ となる。

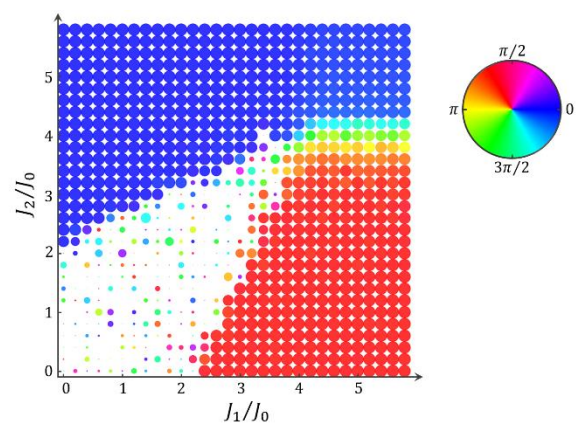


図 2. 異方性の強さと Z_3 ベリ一位相の関係。それぞれの円の色は右上の色相環に従って、 Z_3 ベリ一位相 $\gamma \pmod{2\pi}$ の値を表す。また、円の半径は $\exp(-\delta\gamma)$ に比例する。