

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).

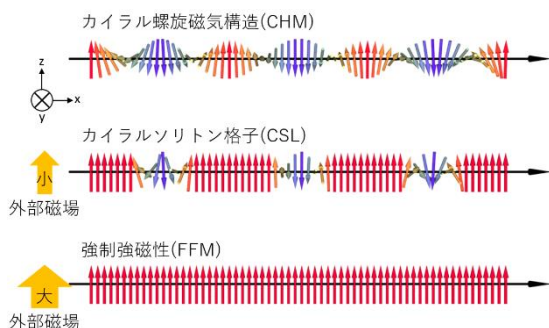


図 1: CSL のイメージ。周期的な螺旋構造を持つ CHM に外部磁場を印加することで実現される。さらに大きな外部磁場を加えると FFM となる。

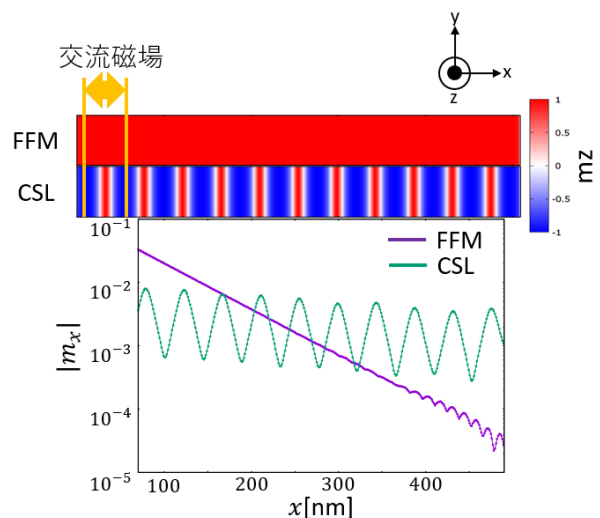


図 2: CSL と FFM のスピン波伝播の違い。系の一端に交流磁場を印加し、スピン波伝播の大きさを計算した。スピン波減衰率に大きな差が見られた。

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）

カゴメ格子上的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. G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).

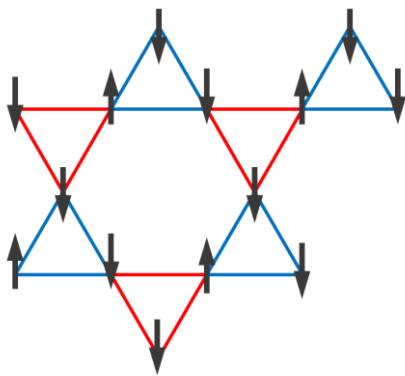


図 1. カゴメ格子。異方的な場合のハミルトニアンは

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

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。

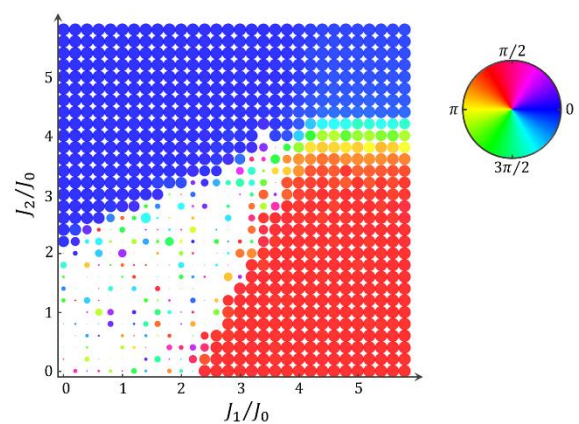


図 2. 異方性の強さと Z_3 ベリ一位相の関係。それぞれの円の色は右上の色相環に従って、 Z_3 ベリ一位相 $\gamma \pmod{2\pi}$ の値を表す。また、円の半径は $\exp(-\delta\gamma)$ に比例する。