

Frustrated magnetic skyrmions: from two dimensions to three dimensions

X. Zhang¹, J. Xia¹, O. A. Tretiakov², H. T. Diep³, J. Yang⁴, G. P. Zhao⁵, M. Ezawa⁶, Y. Zhou⁷ and X. Liu¹

¹ Department of Electrical and Computer Engineering, Shinshu University, Nagano, Japan

² School of Physics, The University of New South Wales, Australia

³ Laboratoire de Physique Théorique et Modélisation, CY Cergy Paris Université, France

⁴ State Key Laboratory for Mesoscopic Physics, School of Physics, Peking University, China

⁵ College of Physics and Electronic Engineering, Sichuan Normal University, China

⁶ Department of Applied Physics, The University of Tokyo, Tokyo, Japan

⁷ School of Science and Engineering, The Chinese University of Hong Kong (Shenzhen), China

Skyrmions are typical topological spin textures that can be stabilized in frustrated magnetic systems with competing exchange interactions [1-3]. They have multiple degrees of freedom, which could be manipulated by external driving forces and thus, may lead to novel applications, such as the helicity-based information processing. Therefore, it is important to understand the fundamental physical properties of frustrated skyrmions and to explore their potential applications. In this talk, I will first briefly introduce topological spin textures in magnetic systems [4]. I will then talk about the static and dynamic properties of isolated skyrmions in a magnetic monolayer with frustrated exchange interactions [3]. I will focus on the discussion of the dynamic behaviors of isolated skyrmions driven by spin torques, including linear motion and circular motion. Besides, I will discuss the current-induced bifurcation of a three-dimensional skyrmion string in a frustrated multilayer system [5]. I will show that three types of bifurcations could be realized by applying different current injection geometries, which lead to the transformation from I-shaped topological skyrmion strings to Y-, X-, and O-shaped ones. Finally, at the end of the talk, I will share some views on possible future directions for the study of topological spin textures, which are not limited to the frustrated magnetic systems.

References

- 1) A. O. Leonov and M. Mostovoy, Nat. Commun. **6**, 8275 (2015).
- 2) S.-Z. Lin and S. Hayami, Phys. Rev. B **93**, 064430 (2016).
- 3) X. Zhang *et al.*, Nat. Commun. **8**, 1717 (2017).
- 4) X. Zhang *et al.*, J. Phys. Condens. Matter **32**, 143001 (2020).
- 5) J. Xia *et al.*, Phys. Rev. B **105**, 214402 (2022).

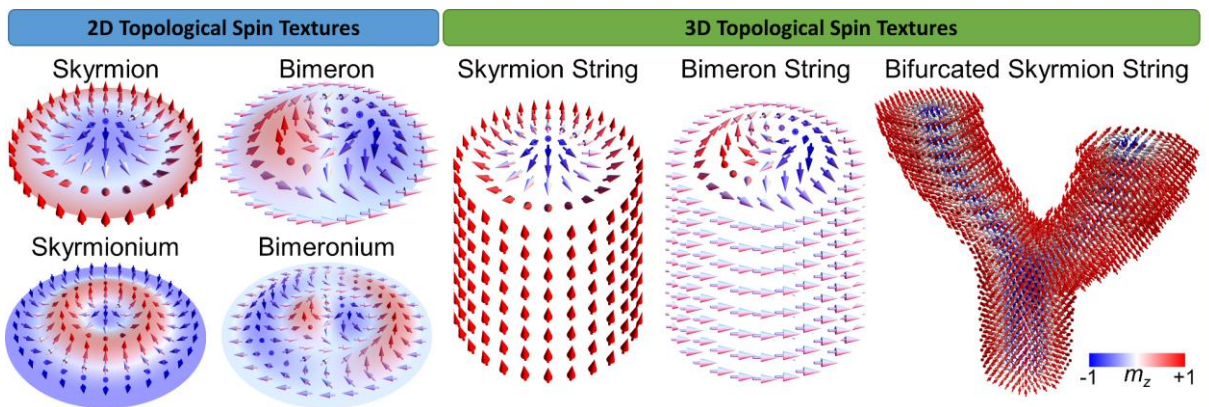


Fig. 1: Different types of two-dimensional (2D) and three-dimensional (3D) topological spin textures, including skyrmion, bimeron, skyrmionium, bimeronium, skyrmion string, bimeron string, and bifurcated skyrmion string.

磁気フラストレーション系における螺旋磁化構造の磁気特性

金田純、大江純一郎

(東邦大)

Numerical study on the helical magnetic structure in frustrate magnets

J. Kaneta, J. Ohe

(Toho Univ.)

はじめに

強磁性結合と1軸 Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用が共存する磁性体中では、螺旋磁化構造が形成される。さらに、螺旋軸に垂直な磁場を印加することによって、カイラルソリトン格子と呼ばれる磁化構造ができる。そこでは、ねじれた磁化構造がソリトンとしてふるまいトポロジカルに安定のため、磁化曲線はヒステリシスを示す。微少薄膜試料を用いた実験ではヒステリシスが観測されているが、バルク試料ではヒステリシスは観測されていない[1]。この違いを明らかにするため、今回は磁気フラストレーション系における螺旋磁化構造に注目し、その磁化構造の磁場による変化を数値シミュレーションを用いて解析した。

解析方法

J_1 - J_2 の古典ハイゼンベルグ模型を用いて、磁化のダイナミクスを表す Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式を数値的に解いた。最近接相互作用の強さ J_1 を強磁性、1次元方向の次近接相互作用の強さ J_2 を反強磁性にし、螺旋軸に対して垂直方向に磁場を印加することで、磁化曲線の計算を行った。有限温度の効果として、揺動散逸定理から求められるランダム磁場を印加した。

解析結果

Fig.1 に Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用がある場合の、螺旋磁化構造の磁化曲線を示す。増磁過程において、トポロジカルに安定なねじれた磁化構造は解消されず、ある閾磁場において、強制強磁性状態になる。減磁過程においては、ねじれた磁化構造は系の端からしか生成することができず、ゼロ磁場近くの閾磁場において螺旋磁化構造になる。一方、磁気フラストレーション系に現れる螺旋磁化構造での磁化曲線を Fig.2 に示す。Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用による螺旋磁化構造の場合とは異なり、ヒステリシス構造は現れない。フラストレーション系では、ねじれた磁化構造は安定ではなく、増磁過程において連続的に解消されてしまう。減磁過程においても、ねじれた磁化構造は個々のソリトンとして生成されず、系全体に連続的に生成される。この違いは薄膜とバルク結晶を用いた実験結果の違いを説明できる可能性がある。発表では、別のフラストレーション系として、Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用の向きが試料内で変化するような場合についての計算結果を報告する。

参考文献

1) M. Mito et al., Phys. Rev. B 97, 024408 (2018).

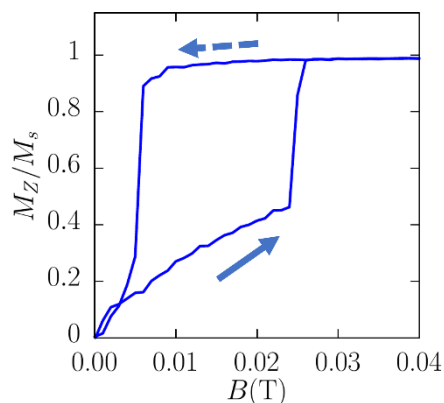


Fig.1 Magnetization curves of helical magnetization structures due to Dzyaloshinskii-Moriya interaction with temperature effect

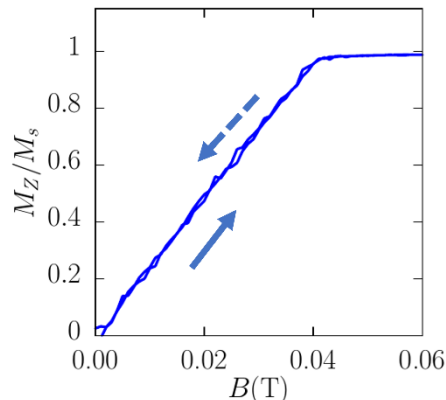


Fig.2 Magnetization curves of helical magnetization structures due to magnetic frustration.

円偏光によるフラストレート磁性体の磁化構造制御

宮田 麻那, 多々良 源*, 大江 純一郎
東邦大学, 理研 CEMS*

Topological charge control of structure in frustrated magnets

M. Miyata, G. Tatara* and J. Ohe
(Toho Univ., *RIKEN CEMS)

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。 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は、トポロジカルチャージが量子化された磁気スカーミオンが形成される[1]。フラストレーション系での磁気スカーミオンはトポロジカルチャージが逆の構造が縮退していて、系の中に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カップル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。本研究では、トポロジカル逆ファラデー効果の有効磁場の存在下で Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式を計算することによって、スピンドYNAMICS を解明した。特に、有限温度において、スカーミオン構造が点対称にならない系や、スカーミオン構造が壊れてしまう系における円偏光の効果を調べた。

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。トポロジカルチャージが系の中にランダムに分布した基底状態のスカーミオン構造に円偏光を照射したときに、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トポロジカル逆ファラデー効果の影響を受け、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。

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 30K 未満で出現する (Fig.1)。偏光の強度を $L=0.4 \times 10^{-8} \text{ Tm}^2$ としたときの照射時間と温度の依存性を Fig.2 に示した。 C/C_0 は初期状態と照射後のスカーミオンのトポロジカルチャージの比率を表している。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。

計算や結果、本研究の応用先の詳細については講演にて報告する。

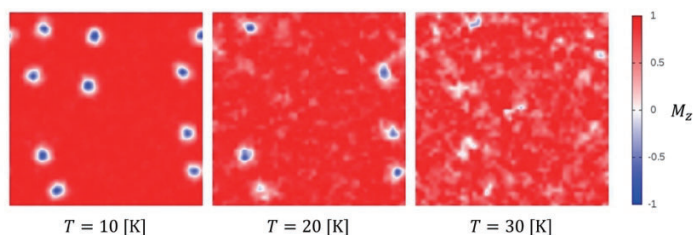


Fig.1 Temperature dependence of the skyrmion structure.

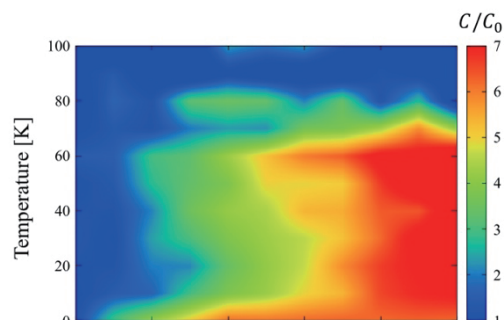


Fig.2 Temperature dependence of the control of the topological charge by using the light intensity ($L=0.4 \times 10^{-18} \text{ Tm}^2$). C/C_0 represents the ratio of the topological charge between $t=0$ and after the pulse field is applied.

[1] T. Okubo, S. Chung, and H. Kawarura, Phys. Rev. Lett. **108**, 017206 (2012)

[2] K. Taguchi, J. Ohe, and G. Tatara Phys. Rev. Lett. **109**, 127204 (2012)

ストレイントロニクスのための非対称形状セルラ・オートマトン

若林大河、後藤穰*、鈴木義茂*、野村光*
(大阪大学基礎工学研究科、*大阪大学 CSRN)

Asymmetric cellular-automaton for straintronics

T. Wakabayashi, M. Goto*, Y. Suzuki*, and H. Nomura*
(Osaka Univ., *CSRN Osaka)

MQCA (magnetic quantum cellular automata)とは、磁氣的に相互作用しているナノドットの配列を用いて情報の記憶・伝搬や論理演算を行う素子である。省エネルギー性の観点から注目されており、NAND/NOR 論理ゲートやシフトレジスタなどが提案されている¹⁾。近年、このMQCAに歪みを印加することで駆動するストレイントロニクスという手法が注目を集めている²⁾。この手法を応用することで更なる省エネルギー化や、歪みに応答するデバイスの開発が可能となる。しかし、MQCAを歪みにより駆動する場合、従来の外部磁場駆動のMQCAと比較して情報の伝搬方向制御が難しくなるという問題がある。そこで我々は、非対称形状のナノドットを用いることで、情報の伝搬方向の制御を試みた。これまでにナノドット端部の形状に依存し磁化反転挙動が変化することが明らかとなっている³⁾。そこで本研究は、マイクロマグネティックシミュレータ (MuMax3⁴⁾)を用い、非対称形状のナノドットを用いたストレイントロニクスデバイスにより情報の伝搬方向が制御可能な素子を提案することを目的とした。

図1(a)にシミュレーションに用いたナノドットの形状を、図1(b)にこのナノドットを3つ用いた情報伝搬素子の概要図を示す。また図2(a), (b)に2つの異なる初期磁化状態を示す。図2(c), (d)に、図2(a), (b)のそれぞれの初期磁化状態に対して、x軸から50度の向きに57 mTの一樣な補助磁場を印加し、45度の向きに歪みをかけた際の磁化状態を示す。ここで、ナノドットの磁化のx成分の平均値が0よりも大きい場合1、それ以外を0とする。右向きこの結果から、非対称形状のナノドットを持つ事で、一方向からの情報の影響を受けやすくなっていることが明らかとなった。本手法を用いることで、ストレイントロニクスデバイスにおいても情報の伝搬方向を制御可能となる。

本研究は JST, CREST Grant Number JPMJCR20C6 の助成を受けて行われました。

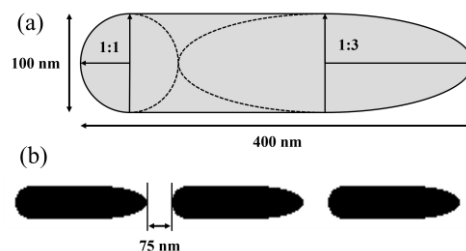


Fig.1 Schematic illustrations of (a) asymmetric nanomagnet and (b) MQCA wire with asymmetric nanomagnets.

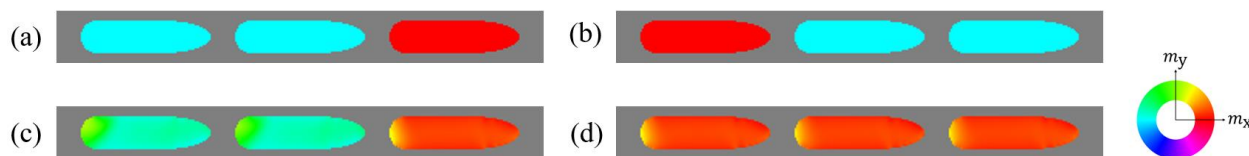


Fig.2 Magnetization state of initial state with binary state of (a) (0, 0, 1) and (b) (1, 0, 0). Simulation results. (c), (d) Relaxed magnetization state under an uniform magnetic field and strain with initial state of (a) and (b), respectively.

参考文献

- 1) H. Nomura et al., Appl. Phys. Express 10, 123004 (2017).
- 2) N. D'Souza et al., Nano letters 16, 1069 (2016).
- 3) J. Li et al. AIP Advances 11, 045010 (2021).
- 4) Vansteenkiste et al., AIP Adv. 4, 107133 (2014).