

レーザー励起におけるトポロジカル磁気構造の eX-GL 機械学習解析

eX-GL ML analysis of topological magnetic structures under laser excitation

東理大先進工 〇(B)清水 直人, (M)長岡 竜之輔, (M)谷脇 三千輝, (M)西岡 宏祐,
(M)町田 陽太郎, Lira Foggianto Alexandre, 小飼 真人

Tokyo Univ. of Sci. 〇Naoto Shimizu, Ryunosuke Nagaoka, Michiki Taniwaki, Kosuke Nishioka,
Yotaro Machida, Alexandre Lira Foggianto, Masato Kotsugi

E-mail: 8221044@ed.tus.ac.jp

スキルミオンは渦状のトポロジカル磁気構造を持ち、近年ではメロン、アンチメロンと呼ばれるユニークなスピントクスチャーに注目が集まっている^[1]。特にレーザー励起によって、メロンとアンチメロンの非自明なトポロジカル磁気構造が発現するなど、興味深い結果が多く報告されている^[2]。このようなトポロジカル磁気構造の生成消滅メカニズムを理解することは、次世代磁気メモリの研究開発を進める上で極めて重要である。その一方で、ミクロな磁気構造とマクロな機能の関係性は定性的で、長らく属人的な解析が行われてきた。そこで本研究では、機械学習を用いた自由エネルギーフレームワーク (eX-GL) に基づき^[3]、トポロジカル磁気構造の変化とエネルギー障壁の関係性を構築した。特にレーザー照射量に対するスピントクスチャーの安定化条件を機械学習で解析した。

入力データは Vampire による Stochastic LLG シミュレーションを行って、CrCl₃ のトポロジカル磁気構造の形成過程を計算した。レーザー照射量は、0.075 mJ/cm² から 0.25 mJ/cm² までを 0.025 mJ/cm² ステップに設定し、トポロジカル磁気構造の時間発展及びその磁気エネルギーを網羅的に計算した。また取得した磁化の空間分布に対して Q 値を計算した。eX-GL 解析では、トポロジカル磁気構造と自由エネルギーの関係性を解析した。具体的には高速フーリエ変換 (FFT) を用いた構造解析と、解釈性の高い主成分分析 (PCA) を組み合わせて、構造とエネルギーと Q 値の関係性をホワイトボックス的に結び付けた。

生成したトポロジカル磁気構造 (Fig.1)を確認したところ、全ての条件においてメロン・アンチメロンを含んだトポロジカル構造の形成を確認できた。またトポロジカル構造の生成条件はキュリー温度が起因することを確認できた。そして、eX-GL フレームワークを用いてトポロジカル磁気構造の形成過程をデータ空間で描画した (Fig.2)。本図により、トポロジカル磁気構造の変化に必要なエネルギーコストが解析される。その結果、レーザー照射後にトポロジカル構造の形成に伴って全エネルギーが減少し続け、エネルギー安定領域を超えると構造が安定し始める振る舞いを捉えることができた。また特徴量の物理的解釈を行ったところ、PC1 はエネルギーの説明変数、PC2 は Q 値の説明変数であることが示唆された。これにより、トポロジカル磁気構造と Q 値とメカニズムの関係性を、データ空間を通じてロバストに接続することができた。本研究では、eX-GL フレームワークをトポロジカル磁気構造の形成過程に展開し、構造と自由エネルギーの関係を解析した。その結果、構造 (秩序因子) と物性 (Q 値) とエネルギーをデータ空間で接続することに成功した。

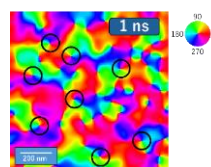


Fig.1 spin texture (0.1 mJ/cm²)

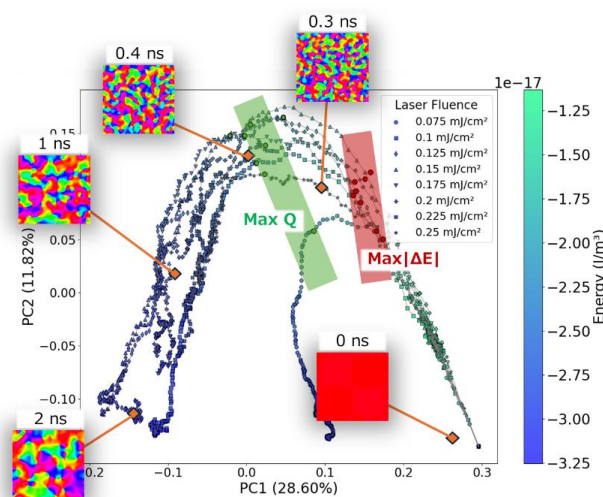


Fig.2 Total energy costs using eX-GL

[1]Y.Tokura, N.Kanazawa, *Chem. Rev.* **121**, 2857-2897, (2021)

[2]M.Strungaru, *et al.*, *npj Comput. Mater.* **8**, 169 (2022).

[3]S. Kunii, *et al.*, *Sci Rep*, **12**, 19892 (2022).