

磁場方向に敏感なナノスケール磁気スキルミオン結晶の機構解明

[1] 要旨

近年、磁性とトポロジーが有機的に絡み合うことによって生まれる特異なトポロジカル磁性相に関する研究が活発に行われている。その中でも本論文は、電子がもつ多様な内部自由度間の相関とトポロジーの協奏効果のもとで現れる磁気スキルミオン結晶の発現機構を報告している。理論モデルの構築・解析により得られた磁気スキルミオン結晶相は、ナノスケールの周期構造や磁場方向に敏感な性質を示しており、 f 電子系で初めてとなる磁気スキルミオン物質 EuPtSi の特徴を捉えたものになっている。本成果をもとにして、さらなる新奇なトポロジカル磁性相の物質探索が期待される。

[2] 本文

強相関電子系において、電子がもつ内部自由度の一つであるスピン自由度とトポロジーが有機的に絡み合うことで生まれる、幾何学的に特異なスピン構造をもつ磁性体(トポロジカル磁性体)および創発物性に対する研究が著しい進展を見せている。その中でも特に精力的に研究が行われている磁気スキルミオン結晶は、実空間における渦状の磁気構造(磁気渦)が周期的に配列した状態により特徴づけられており[図 1(a)], 量子力学的なベリー位相に由来した創発電磁場現象を示す。また、磁気スキルミオン結晶をはじめとするトポロジカル磁性体は、不純物や外部からの攪拌に対して堅牢であるため、安定な動作性能をもつ省エネルギー磁気デバイスとしての応用が期待されている。

磁気スキルミオン結晶は、2009年にカイラルな結晶構造をもつ磁性金属 MnSi で観測されて以来、同結晶構造をもつ $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$, FeGe や磁性絶縁体 Cu_2OSeO_3 , GaV_4S_8 などの様々な d 電子系物質群

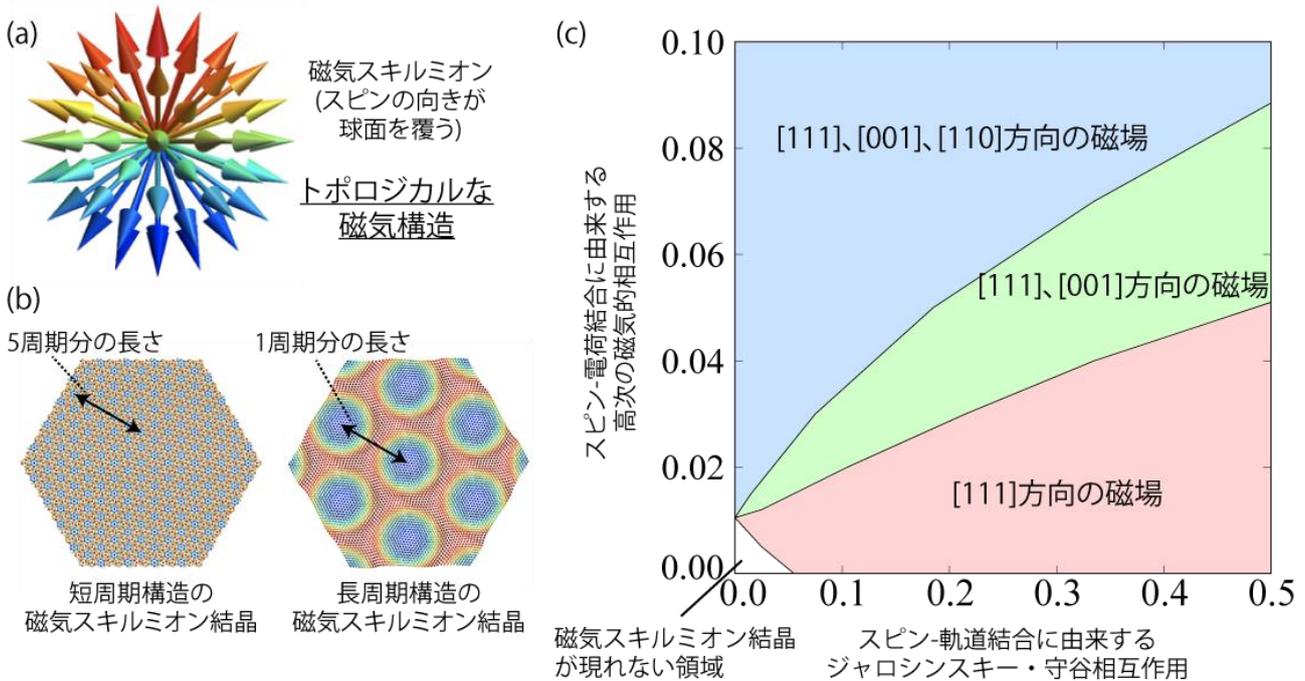


図 1. (a)磁気スキルミオン. 矢印はスピンの向きを表し、色はスピンの z 方向の大きさを表す. (b)異なる周期構造の磁気スキルミオン結晶. (c)スピン-軌道結合とスピン-電荷結合の大きさを変えた際に、磁気スキルミオン結晶相が発現する磁場の方向を表す相図.

に対して報告されてきた。一方、近年になり MnSi と同様の結晶構造を示す f 電子系物質 EuPtSi での磁気スキルミオン結晶の観測を皮切りにして、 Gd_2PdSi_3 , $\text{Gd}_3\text{Ru}_4\text{Al}_{12}$, GdRu_2Si_2 といった他の f 電子系物質群でも磁気スキルミオン結晶が見出された。これらの f 電子系物質における磁気スキルミオンは、従来の数十から数百ナノメートルのサイズよりもはるかに小さい数ナノメートルの長さスケールで特徴づけられることから、磁気渦の高集積化が可能となり、さらなる高効率な磁気メモリの実現が期待される[図 1(b)]。しかしながら、同じ結晶構造をもつ MnSi と EuPtSi において、なぜ磁気スキルミオンの性質や安定性に大きな違いが生じるのか、という点に関しては未解明であった。

最近、東京大学大学院工学研究科物理工学専攻の研究グループは、カイラルな結晶構造に由来するジャロシンスキー・守谷相互作用と遍歴電子系に由来するスピン-電荷相互作用の効果を取り込んだマイクロなモデルを構築し、数値シミュレーションによって解析を行うことにより、ナノメートルサイズの磁気スキルミオン結晶相が安定に存在できることを理論的に明らかにした。さらに、得られた磁気スキルミオン結晶が磁場方向に対して敏感であるという特異な振る舞いを見出した。この成果は Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ) の 2021 年 7 月号に掲載された。

カイラルな結晶構造に現れる従来の磁気スキルミオン結晶の安定化機構としては、スピンの向きを揃えようとする強磁性的な相互作用と、それを捻ろうとするジャロシンスキー・守谷(スピン-軌道)相互作用の競合効果が重要であると知られているが、その際実現する磁気スキルミオンのサイズは数十から数百ナノメートルのサイズになる。一方、 f 電子系では局在した磁気モーメントと結晶中を動き回る遍歴電子間に働くスピン-電荷結合に由来した高次の磁氣的相互作用が現れる。これらの相互作用が協奏的に働くとき、カイラルな結晶構造におけるナノメートルサイズの磁気スキルミオン結晶が可能になる。また上記の協奏効果に由来した機構では、相互作用が波数空間に対して強く異方的になることから、磁場方向に対して敏感な振る舞いが現れるようになる[図 1(c)]。

本研究による解析結果から、カイラルな結晶構造におけるナノメートルサイズの磁気スキルミオン結晶の安定化には、電子がもつ電荷・スピン・軌道といった内部自由度間の相関効果が重要な役割を果たすことが示された。上記の結果は、カイラルな結晶構造に限らず、様々な結晶構造に対しても適用できるため、新たなナノメートルサイズの磁気スキルミオン結晶物質を探索するための理論的基盤を与えることが期待される。さらには今回の研究で得られた設計指針を適用することにより、磁気スキルミオンの高集積化による巨大な創発磁場を用いたスピントロニクスデバイスへの応用が進展するものと思われる。

原論文(6月14日公開済)

Field-Direction Sensitive Skyrmion Crystals in Cubic Chiral Systems: Implication to 4f-Electron Compound EuPtSi

S. Hayami and R. Yambe, J. Phys. Soc. Jpn. **90**, 073705 (2021).

<情報提供：速水賢（東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻）>