

磁気スキルミオン格子形成におけるらせん磁気ヘリシティの統合

[1] 要旨

磁性原子のスピンの渦巻き状に配列して磁気スキルミオン格子と呼ばれる特異な磁気構造を作ることがある。ここで重要な働きを担うと考えられてきたのが、結晶が反転対称性を持たないときに生じるスピン間の反対称交換相互作用である。ところが、今回発見された EuNiGe_3 の磁気スキルミオン格子では、反対称交換相互作用がもたらす本来のらせんヘリシティ (巻き方) を逆転させて、ヘリシティを一つに統合させていることがわかった。反対称交換相互作用を凌駕する安定機構が存在することを示すものであり、従来の考え方に変革を迫る重要な結果であるといえる。

[2] 本文

磁性原子のスピンの集団で渦巻き構造を作って粒子状になり、さらに格子を組んで配列することがある。磁気スキルミオン格子と呼ばれ、二次元の最密構造である三角格子を形成することが多い。最初に発見されたのは立方晶のカイラル磁性体 MnSi においてであり、2009年のことである。磁気スキルミオンは互いに 120° の角度をなす方向に伝播する3本のらせん磁気構造の重ね合わせで表され、Mühlbauer らによる *Science* 誌の有名な論文中では、"All three helices have the same chirality" と構造モデルの説明で述べられている。つまり、3本のらせん磁気フーリエ成分は同じヘリシティ (らせんの巻き方) を持っていなければならない。右巻きか左巻きかどちらか一方を選択したららせん磁

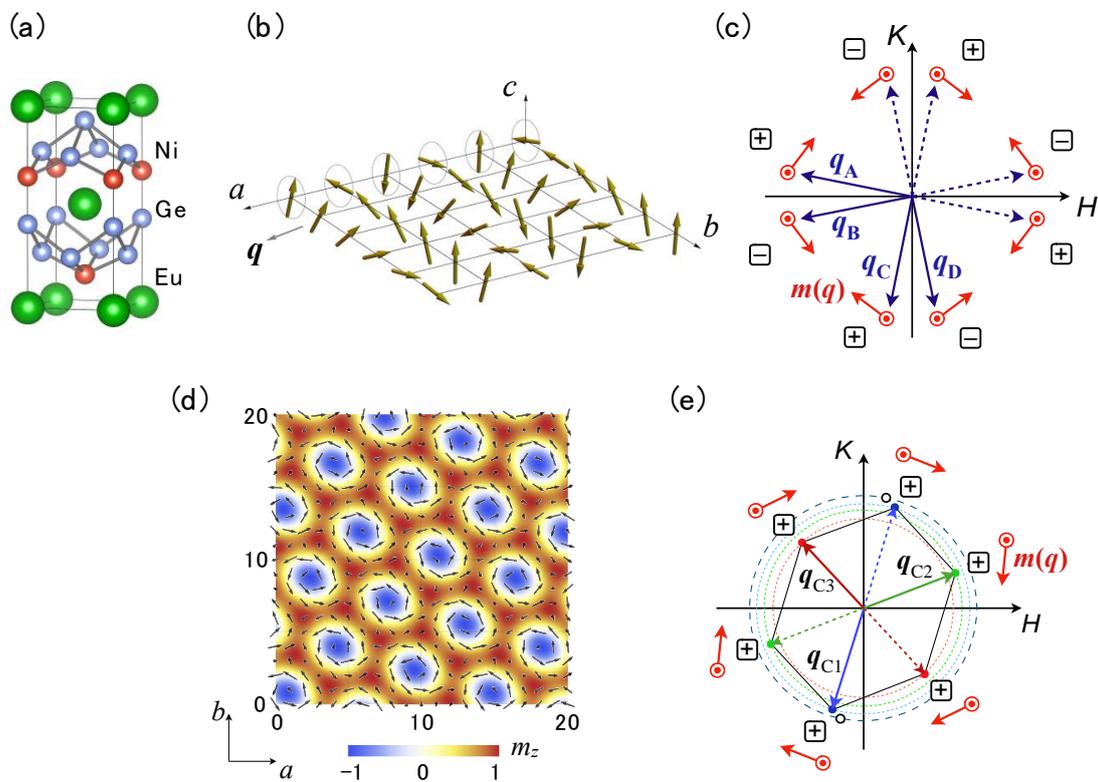


図 1. (a) EuNiGe_3 の結晶構造。(b) ゼロ磁場でのらせん磁気構造。(c) ゼロ磁場での 4 つの磁気ドメイン A, B, C, D に対応する磁気伝播ベクトル q と磁気フーリエ成分 $m(q)$ 。(d) 磁場中で実現する磁気スキルミオン三角格子 (ドメイン C)。(e) 磁気スキルミオン三角格子を作る 3 つの磁気伝播ベクトル q とその磁気フーリエ成分 $m(q)$ 。

気構造が基本要素になっていることから、これまで、磁気スキルミオン格子の形成にはヘリシティ選択をもたらすジャロシンスキー・守谷型の反対称相互作用が必要であると考えられてきた。実際、遷移金属化合物の MnSi をはじめとして、最近では希土類化合物の EuPtSi など、反転対称性も鏡映対称性ももたないカイラルな結晶構造をもつ磁性体で多くの磁気スキルミオン格子が観測されている。

磁気スキルミオンの研究が進むにつれ、 Gd_2PdSi_3 や $\text{Gd}_3\text{Ru}_4\text{Al}_{12}$ 、 GdRu_2Si_2 や EuAl_4 など、反転対称性をもつ物質でも磁気スキルミオン格子が見いだされている。この場合は反対称相互作用が存在しないので、磁気スキルミオン格子を安定化させる機構としては、伝導電子を媒介とした対称型の相互作用の高次項によって複数方向に伝播するらせんの波が結合しているためだと考えられている。ここで興味をもたれるのが反転対称性はないが鏡映面をもつ磁性体で、逆向きの反対称相互作用が共存する場合にどのような磁気スキルミオン格子が形成されるのかとすることである。

最近、広島大学大学院先進理工系科学研究科のメンバーを中心とする研究グループは、正方晶化合物 EuNiGe_3 の磁場中秩序相が磁気スキルミオン格子相ではないかと着目し、結合する3つの磁気伝播ベクトルの探索を行った。さらに、このグループがこれまで培ってきた円偏光共鳴 X 線回折を使って磁気ヘリシティを詳しく調べた結果、磁気スキルミオン格子を形成する3つのらせん磁気成分がすべて同一のらせんヘリシティであることを明らかにした。この成果は、JPSJ の 2024 年 7 月号に掲載された。

磁気スキルミオン格子相でらせん磁気ヘリシティが一つに揃う理由としては、 EuPtSi のようなカイラル磁性体の場合は、反対称相互作用によって一つのらせん磁気ヘリシティを選択する働きがもともと存在していることが挙げられる。一方、今回の正方晶 EuNiGe_3 は 4 回対称軸の c 軸を含んだ鏡映面を持つため、カイラルではない。ただし、反転中心がないので、反対称相互作用は存在する。そのため、ゼロ磁場でのらせん磁気構造では、4 つのドメインのうち 2 個がプラス、2 個がマイナスのヘリシティで秩序化しており、結晶の 4 回対称性と鏡映対称性をしっかりと反映している。ここで、磁場中で磁気スキルミオン格子が形成されるとき、3 方向に伝播するらせん磁気成分が結合するのだが、驚くべきことにそのうち一つはゼロ磁場でのヘリシティを逆転させている。もう一つは本来なら縦巻きサイクロイド構造になるべきなのだが、これが他と同じヘリシティのらせん構造になっている。つまり、結晶が本来持っている反対称相互作用を凌駕する力が働いてヘリシティが一つに統合され、磁気スキルミオン三角格子が実現していることになる。

本研究結果は、磁気スキルミオン格子形成に対するこれまでの考え方に変革を迫る実験結果として、多くの研究者の注目を集めている。また、もともと正方晶の結晶構造の枠の中で三角格子を作ろうとするため、安定構造を求めた結果、対称性を落として歪んだ三角格子になる点も興味深い。磁気スキルミオン格子形成の多様性としても注目され、今後の研究の展開が期待される。

原論文 (2024 年 6 月 17 日公開済)

Helicity Unification by Triangular Skyrmion Lattice Formation in the Noncentrosymmetric Tetragonal Magnet EuNiGe_3

T. Matsumura, K. Kurauchi, M. Tsukagoshi, N. Higa, H. Nakao, M. Kakihana, M. Hedo, T. Nakama, and Y. Ōnuki, *J. Phys. Soc. Jpn.* **93**, 074705 (2024).

< 情報提供 : 松村武 (広島大学大学院先進理工系科学研究科) >