

巨大創発電磁応答をもたらす 高密度磁気スキルミオン物質の設計

車地 崇 〈カリフォルニア工科大学 kurumaji@caltech.edu〉

十倉好紀 〈理化学研究所/東京大学 tokura@riken.jp〉

磁気スキルミオンとは固体中のスピンの渦を巻くように配列した状態である。連続体極限においてスピンの向き連続変形では壊せない磁気構造であり、零でないトポロジカル量子数で特徴づけられる。このトポロジカルな安定性や、まるで粒子のように電流によって渦の位置を操作できることなどが注目されており、新規磁気メモリや論理素子への応用に期待が持たれている。

また磁気スキルミオンはその特殊なスピンの配列と伝導電子との結合により、顕著な電磁気応答を生み出すことが最近の研究で分かってきた。それらは**創発電磁応答**と呼ばれ、例えばホール効果、磁気熱電効果、光を反射させたときの磁気旋光などの物性として現れる。応答をさらに拡張するための理論的な提案や実験による検証および新規物質開発による機能性の向上が試みられている。

物質中で磁気スキルミオンを安定化するためには結晶構造に特殊な条件が必要であると考えられている。その一つが結晶の空間反転対称性の破れである。対称性が破れた固体中では相対論的效果であるスピン軌道相互作用が電子スピンの向きに影響を与える。これによりスピンの配列がねじれることが原因となって磁気スキルミオンが現れると考えられている。実際カイラルな格子構造をもつ磁性体や磁性薄膜の表面や界面などの非反転対称系を中心に磁気スキルミオンが観測され集中的に研究されているが、研究対象になりうる物質はまだ数が少ないのが現状である。

結晶構造の対称性の制約を受けずにトポロジカルなスピン構造を作る新機構はないだろうか？ これを実際の物質で実証し、候補物質を設計・選択する有効な指針を確立できれば、これまで注目されてこなかった物質群を切り開くことにもつながり、そ

こから思いがけない新奇な電子状態や物性の発見につながることを期待できる。このことは新規物質開発の醍醐味であり、物性物理学の発展においても意義深い。

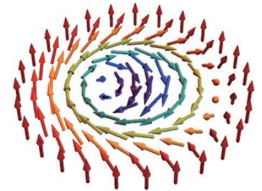
われわれは**磁気フラストレーション**の効果を利用して、反転対称性のある物質においても磁気スキルミオンを安定化させる物質設計方法を開発した。特にガドリニウム原子 (Gd) が三角格子を形成するように配列した結晶構造をとる金属間化合物 Gd_2PdSi_3 において、単結晶を使ったX線回折実験による磁気構造解析と電気輸送特性の詳細な測定により、Gdスピンによる磁気スキルミオンの三角格子配列を発見した。磁気スキルミオンのサイズはこれまでの典型的なサイズ10-100ナノメートルより小さい2.5ナノメートルであり、高密度に磁気スキルミオンが格子配列した状態を実現することができるようになった。このことにより創発電磁応答の一つであるトポロジカルホール効果を従来より一桁以上大きな応答として検出することに成功した。これは磁気スキルミオンから伝導電子が感じる仮想的な磁場（創発磁場）が密度の向上により大きく増幅されていることを意味している。

この発見を端緒として、同様の設計指針をもとに反転対称性を持つ物質における磁気スキルミオン探索が加速度的に進んでいる。三角格子以外にもブリーディングカゴメ格子、正方格子、ダイヤモンド格子などといった様々なフラストレートした結晶格子において磁気スキルミオンが安定化することが続々と発見されており、物質開拓の発展性の高さを物語っている。これまでの反転対称性の破れた磁性体のスキルミオンとは質的に異なる格子状態や電気磁気応答も議論されており、今後のトポロジカル磁性体開発の進展が期待される。

用語解説

磁気スキルミオン：

電子スピンの2次元平面上で渦を巻くように配列した磁気構造。中心から外周にかけて特異点を持つことなく連続的にスピンの向きが変わる。もともとは π 中間子に関する場の理論の文脈で導入されたが、磁性体をはじめ強誘電体、冷却原子、液晶など様々な物質に概念が拡張されている。



創発電磁応答：

固体中の特異なバンド構造や磁気構造によって発現した仮想的な電磁場を伝導電子などの準粒子がうけることで生じる電磁気的な応答。例えば磁気スキルミオンのようなスピン配列を背景に伝導電子が進むと仮想磁場の影響で運動が曲げられ、ホール効果（トポロジカルホール効果）として検出される。

磁気フラストレーション：

三角格子などのような幾何学的条件により電子スピン間の交換相互作用が競合して不安定になっている状態のこと。例えば三角形の頂点に局在スピンがあり隣接スピン間で反平行に配列しようとしている場合、3つのスピンをすべて最安定な状態にはできない。このような場合、様々なスピン配列がわずかなエネルギー差で縮退するため新奇な電子相が現れやすくなる。