

多彩なト
ートポロ

凝縮系物性研究部門 高木 里奈
 附属中性子科学研究施設 中島 多朗

電子スピンの作る渦構造である磁気スキルミオンは、磁気構造の特殊なトポロジーに由来した現象の起源として注目を集めています。スキルミオンは直径が数〜数百ナノメートルと非常に小さく、安定な粒子として振る舞う性質を有している上、低消費電力駆動が可能であるとされ、次世代の磁気記憶・演算素子のための情報担体の候補として脚光を浴びています。これまでスキルミオンの安定化には空間反転対称性の破れた結晶構造の下ではたらく、ジャロシンスキー・守谷相互作用が必要であると考えられてきました。しかし近年では、空間反転対称性の保たれた結晶構造の物質において、従来よりも直径の小さなスキルミオンの観測が報告されています。こうした物質では、伝導電子に媒介される局在スピン間の相互作用が、スキルミオンを安定化する鍵と考えられています。しかしながら、こうした非常に小さい直径のスキルミオンが報告されている物質は十分にわかっていないため、更なる物質探索が求められています。

本研究では、空間反転対称性の保たれた正方格子構造を有する金属間化合物 GdRu_2Ge_2 に着目しました(図 1 左)。この物質では、磁性を担う Gd の 3 価イオンによる二次元的な正方格子の層と、電気伝導を担う Ru と Ge による層が交互に積層する構造を有します。我々はまず、本物質に対して磁化、縦抵抗率、ホール抵抗率の磁場依存性を測定し、本物質の積層方向に外部磁場を印加していくと多段階の磁気相転移が生じることを明らかにしました。とりわけ、II 相と IV 相の 2 種類の磁気相においては、ホール抵抗率に非単調な増大が生じることを見出しました(図 1 右)。一般に、スキルミオン上を運動する電子は、スキルミオンの特異なトポロジを反映して、仮想的な磁場を感じ、伝導電子の進行方向が曲げられる、トポロジカルホール効果が生じることが知られています。本物質で見られたホール抵抗率の増大は、トポロジカルホール効果によるものと考えられ、本物質では 2 種類のスキルミオン相が生じていることが示唆されます。

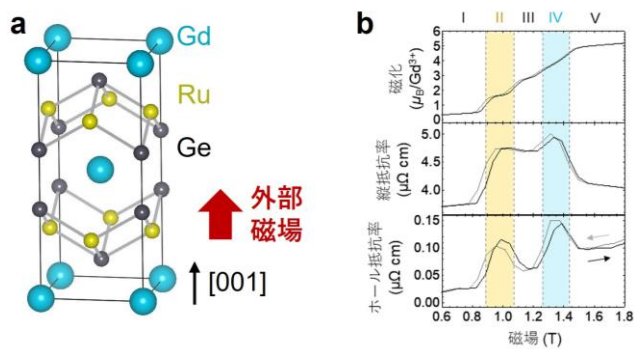


図 1: 本研究で着目した金属間化合物 GdRu_2Ge_2 の結晶構造(a) および、磁化、縦抵抗率、ホール抵抗率の磁場依存性(b)。II と IV の磁気相においてホール抵抗率に増大が見られた。

2 種類のスキルミオン相の実現を直接的に観測するため、大強度陽子加速器施設 J-PARC 物質・生命科学実験施設 (MLF) のビームライン 12 に設置された高分解能チョッパ一分光器 (HRC) において中性子散乱実験を、高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所のフォトンファクトリービームライン 3A において共鳴 X 線散乱実験をそれぞれ行いました。その結果、II 相および IV 相において、直径 2.7 ナノメートルのスキルミオンが格子を組んだ状態で安定化していることが分かりました。さらに、本物質では外部磁場の大きさに応じて多段階に磁気構造が変化し、特に II、III、IV の磁気相では、「楕円形スキルミオン」、「メロン-アンチメロン分子」、「円形スキルミオン」といった多彩なトポロジカルスピン構造が発現することを明らかにしました(図 2)。加えて、伝導電子が媒介する局在スピン間の磁気相互作用に基づく磁気構造の理論シミュレーション計算を行うことで、実験結果から得られた一連の磁気構造を非常に高い精度で再現することに成功しました。このことから、本物質で観測された多彩なトポロジカルスピン構造の安定化には、磁気感受率に存在する複数のピークの競合(伝導電子が媒介する磁気相互作用におけるフラストレーション)が重要な役割を果たしていることが強く示唆されます。

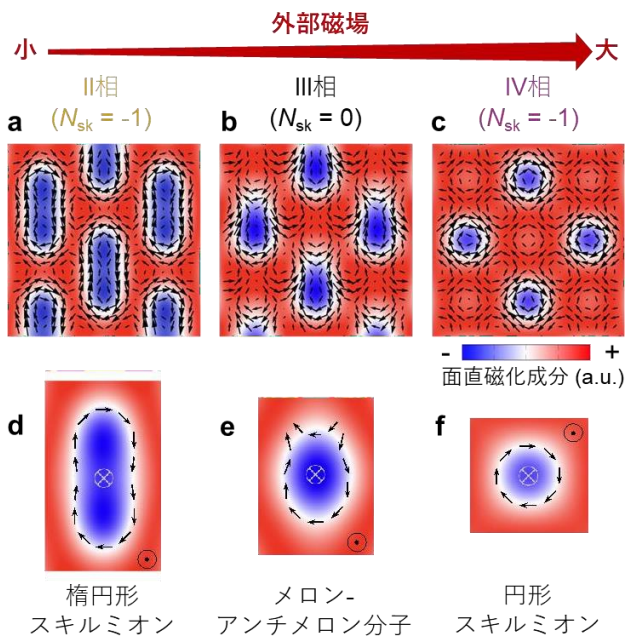


図2 : GdRu_2Ge_2 のII, III, IV 相における磁気構造(a-c)および、それぞれのスピン構造の概念図(d-f)。背景色は磁気モーメントの紙面直成分を表し、矢印は面内成分を示している。外部磁場を大きくしていくと、楕円形スキルミオン、メロン-アンチメロン分子、円形スキルミオンなどの異なるトポロジカル数 N_{sk} によって特徴付けられる多彩なスピン構造が発現している。

本研究成果は、ナノメートルサイズの多彩なトポロジカルスピン構造を実現するための新しい物質設計指針の確立に繋がることが期待されます。また、本物質で実証した、外部磁場による多彩なトポロジカルスピン構造間のスイッチングは、多値メモリ素子などの新しい応用可能性を秘めており、今後さらなる物質探索が進むことで次世代素子としての応用に貢献することが期待されます。

参考文献 : H. Yoshimochi *et al.*, Nat. Phys. 20, 1001–1008 (2024).