

電子の地図が決めていた、“渦”のサイズ ——世界最小スキルミオンの誕生メカニズムを解明——

(附属極限コヒーレント光科学研究センター) Yuyang Dong
(附属国際超強磁場科学研究施設) 木下 雄斗
(附属国際超強磁場科学研究施設) 徳永 将史
(附属極限コヒーレント光科学研究センター) 近藤 猛

〈概要〉

スピンの渦状に配列したナノスケールの磁気構造「スキルミオン」は、その高い安定性と制御性から、次世代の情報記録や低消費電力デバイスへの応用が期待されている。特にスキルミオンのサイズを自在に制御することは、デバイス実装に向けた鍵とされているが、その極小構造を決定づける物理的要因は長らく未解明であった。本研究では、電子一つ一つの運動量とエネルギーを直接観測できる角度分解光電子分光(ARPES)技術を用い、世界最小のスキルミオン(直径約 1.9 nm)が発現する磁性体 GdRu_2Si_2 の電子構造を精密に可視化した。その結果、電子がフェルミ面上で特定の運動量関係をもって整列する「ネスティング構造」が、磁気相互作用(RKKY 相互作用)を介してスキルミオン形成を駆動していることを明らかにした。この成果は、スキルミオンのサイズが結晶構造ではなく電子構造によって決定されることを初めて実証したものであり、電子の地図を基盤とした磁気トポロジカル物質の新しい設計指針を示すものである。

〈研究の背景〉

材料開発やデバイス技術は日々進化を続けており、エネルギー問題の解決や情報社会の発展に向けて、電気・熱・磁気を自在に操る新しい物質や原理の探索が進められている。その中でも、電子のスピン自由度を利用した「スピントロニクス」は、従来のエレクトロニクスを超える情報伝達技術として注目されている。スピンの向きを用いて情報を表現すれば、電荷の移動を伴わずに信号を伝達できるため、低消費電力化と高集積化の両立が可能となる。これを実現するためには、スピン流を効率的かつ安定に制御できる新しい磁性材料の発見が鍵となる。

このような文脈の中で、磁性体内部に自発的に生じるトポロジカルな磁気渦構造「スキルミオン」が大きな関心を集めている。スキルミオンは、ナノメートルスケールの渦状スピン構造であり、極めて安定かつ小さなエネルギーで

動かすことができるため、情報記録素子やスピン流生成源としての応用が期待されている。実際、スキルミオンを電子デバイスに組み込めば、1個のスキルミオンが1ビットの情報を担う“磁気渦メモリ”が実現すると考えられており、世界中でその微細化と制御法の研究が競われている。これまで、スキルミオンは主に結晶の反転対称性が破れた非中心対称物質で観測され、そこではスピンのねじれを生み出す Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用(DMI)がその起源とされてきた。しかし近年、結晶構造に反転対称性をもつ中心対称系でも、DMI を伴わずにスキルミオンが形成されることが報告され、スピン構造の安定化機構に新しい物理の存在が示唆されている。

中でも、希土類金属を含む層状物質 GdRu_2Si_2 は、直径約 1.9 ナノメートルという世界最小スキルミオンを示すことで注目を集めている[1]。このスキルミオンは、磁気モーメントの配置が電子の運動と密接に結びついた結果として実現しており、その背後には、電子がもつエネルギーと運動量の間を関係を表す電子構造が深く関係していると考えられてきた。電子構造は、物質の磁性や伝導性といった性質の設計図ともいえる。したがって、電子構造を直接観測することができれば、スキルミオン形成の根源的なメカニズムを明らかにする手がかりになる。

本研究では、放射光を用いた角度分解光電子分光(ARPES)により、 GdRu_2Si_2 の電子構造を高精度で観測し、スキルミオン形成と電子構造の関係を初めて明らかにした。電子がフェルミ面上で特定の運動量関係をもって整列する「フェルミ面ネスティング」が、磁気相互作用を通じてスキルミオンの周期とサイズを決定する主要因であることを突き止めた。これは、スキルミオンの安定性やサイズが結晶構造に由来するのではなく、電子構造によって決まることを意味している。この発見は、電子の地図をもとに磁気構造を設計できるという新しい物質設計の方向性を切り開くものであり、スピントロニクスや情報デバイスの革新につながる基盤物理の進展として大きな意義をもつ。



ている。その結果、フェルミ面は閉じた輪の形を保てず、途中で途切れたように見える「フェルミアーク」と呼ばれる状態を形成していた。こうしたネスティング、擬ギャップ、フェルミアークの一連の現象は、電子とスピンの強く結合した結果生じるらせんスピンの実験的証拠となる。特に、ネスティングの運動量ベクトルの長さが、これまで共鳴 X 線散乱(RXS)実験で報告されてきたスキルミオン格子の周期とほぼ完全に一致していることから、スキルミオンのサイズは電子構造に刻まれたネスティングの波長によって決定されていることが分かった。

この電子構造と磁気構造の対応は、スキルミオン形成の理解に新たな地平を開くものである。結晶構造のねじれ(Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用)ではなく、電子の運動そのものがスピン秩序を駆動していることを実験的に立証した初めての実験結果となった。さらに本研究では、磁場や温度といった外的条件に応じて、らせんスピン秩序が柔軟に変形・再構築される様子を磁気ドメイン観察によって明らかにした(図 3)。冷却後に自然形成されるドメイン構造は、パルス磁場の印加によって一度崩壊するが、その後の温度変化によって可逆的に元の状態へと再生する。この

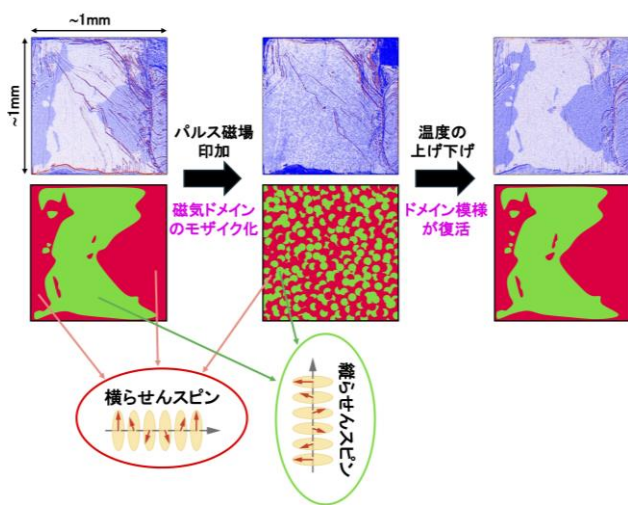


図 3：無磁場下で観測された、らせん状スピン秩序の磁気ドメイン構造とその柔軟な応答性

GdRu₂Si₂において、外部磁場が存在しない状態(無磁場下)で形成される磁気ドメイン構造の変化を示している。左図は、冷却後に自然に形成された磁気ドメイン構造である。パルス磁場の印加により、磁気ドメインは、中央図のようなモザイク状に細分化される。しかし、その後の温度制御によって右図のように元のドメイン構造が可逆的に復元されることが分かった。このドメイン構造は、横らせんスピン構造および縦らせんスピン構造がそれぞれ発達した領域に対応している。スキルミオンは通常、外部磁場下でこれら 2 種類のらせんスピンの重なり合うことにより発現するが、本図のような柔軟で可逆的ならせん磁性の挙動は、スキルミオン磁性体ならではの高い操作性と機能性を物語っている。

挙動は、スキルミオン磁性体特有のしなやかな磁気応答性を示しており、磁気構造の操作性と安定性を両立させる要因が電子構造に根ざしていることを強く示唆している。

以上の成果により、世界最小スキルミオンを生み出す磁性メカニズムとその大きさが、電子構造によって決定されることを明らかにした。本研究は、電子構造と磁気秩序の因果関係を直接描き出し、スキルミオンを電子構造の設計によって制御できる可能性を実験的に提示したものである[2]。

〈今後の展望〉

本研究は、「スキルミオンはなぜ生まれるのか?」という根本的な問いに対し、結晶の構造ではなく電子の動き、すなわち電子構造が決定的な役割を担うことを初めて明らかにした。これまでスキルミオン材料の開発は「結晶構造の工夫」に依存してきたが、今後は「電子構造をデザインする」という、より精密かつ戦略的なアプローチが主流になると考えられる。電子の運動量空間を読み解き、フェルミ面を自在に設計できれば、スキルミオンのサイズ・柔軟性・安定性までも意図的に制御することが可能となる。第一原理計算と光電子分光を組み合わせ、“ネスティングをもつフェルミ面”を備えた新たな磁性物質を発見することで、超高密度・超省エネのスキルミオンデバイス実現への道が大きく拓かれると期待される。さらに、電場や光でスキルミオンを自在に操作する技術が確立されれば、次世代スピントロニクス素子や量子情報処理デバイスの開発にもつながる。電子の地図を手には、スキルミオンが切り拓く物質科学の新たな未来が予想される。

謝辞：

本研究は、大阪大学の越智正之准教授、東京都立大学の松田達磨教授、北海道大学の速水賢教授、スタンフォード放射光施設の橋本信氏らとの共同研究として行われました。この場をお借りして御礼申し上げます。

〈参考文献〉

- [1] N. D. Khanh et al., *Nat. Nanotechnol.* **15**, 444-449 (2020).
- [2] Y. Dong et al., *Science* **388**, 624-630 (2025).