

報道機関 各位

国立大学法人東北大学

ナノメートルスケールの磁気渦「スキルミオン」の 新たな特性を発見し制御技術を確認 — 革新的省エネデバイスの実現に期待 —

【発表のポイント】

- 磁気スキルミオン^(注1)と呼ばれるナノ(10億分の1)メートルスケールで形成される磁気渦は、室温無磁場下で安定に存在できることから、従来の電子素子に比べて極めて高密度で桁違いに消費電力の低い革新的情報処理技術への応用に向けた研究が進められています。
- 磁気スキルミオンでは、コロイドのような一般的な粒子とは質的に異なるブラウン運動^(注2)を示すことを観測。磁気渦のよじれ(トポロジー^(注3))が拡散性に強く影響することを明らかにし、かつそれを制御する方法を確認しました。
- 磁気スキルミオンの拡散運動を用いた革新的省エネデバイスの実現に向け、重要な知見となる成果です。

【概要】

社会がますますコンピューターに依存するにつれ、情報処理の高速化と素子のさらなる低消費電力化が求められています。近年、ナノメートルスケールで実現する磁気渦の一種である磁気スキルミオンが、高い安定性、電氣的制御の容易性の観点から革新的情報処理技術への応用に向けた研究が進められています。磁気スキルミオンの運動は、その渦構造のトポロジーに強く影響されると予測されますが、ブラウン運動に代表されるような拡散運動におけるトポロジーの役割は、これまで明らかにされていませんでした。

今回、東北大学電気通信研究所の土肥昂堯助教、独ウプサラ大学の Markus Weißenhofer (マーカス ワイゼンホファ) 研究員、独コンスタンツ大学の Ulrich Nowak (ウリ ノワク) 教授、独マインツ大学ヨハネスゲーテンベルグ校の Mathias Kläui (マティアス クラウイ) 教授からなる日独共同研究チームは、逆向きの二つの磁気スキルミオンを人工的に結合させた反強磁性スキルミオン^(注1, 図1b)を用いてスキルミオンの拡散運動を詳細に調べることで、一般的な粒子とは質的に全く異なるブラウン運動を示すことを発見しました。

その拡散性は、アインシュタインによるブラウン運動の記述で良く知られた拡散と摩擦の関係に加え、トポロジーも密接に関連していることを実験及び理論から明らかにしました。更に人工反強磁性結合したスキルミオンでは、トポロジーに起因する力を通して、この拡散性を制御できることを実証しました。

今回得られた知見を土台にして、スキルミオンを用いる究極的な省エネデバイスの実現に向けた研究開発が進展することが期待されます。

本研究成果は、2023年9月11日（英国時間）に学術誌 Nature Communications に掲載されました。

【詳細な説明】

研究の背景

近年、物性物理学の分野において連続変形の過程で保たれる物体のカタチに着目するトポロジーと呼ばれる概念が注目されています。磁性体においてトポロジーで記述される微細な磁気構造に磁気スキルミオン（図1a）があります。磁気スキルミオンは球面上の全方向の磁気モーメントを有しており、連続変形によって消失することができないため、「トポロジカルに保護されている」と言われ、安定に存在できると考えられています。

コロイドのような一般的な粒子と違い、磁気スキルミオンは運動する際にそのトポロジーの影響を強く受けます。例えば、磁気スキルミオンが時間的に一方向性の外力を受け、ドリフト運動する際には、その磁気構造の渦に起因して直進できないことが良く知られています。これは、スキルミオンホール効果と呼ばれ、回転するボールが真っすぐ進むことができないことと同様に理解されます。これまでの多くの研究によって、磁気スキルミオンのドリフト運動下のトポロジーの役割は、良く知られていました。

物体は、ドリフト運動に加え、熱揺らぎに起因するランダムな拡散運動をすることが良く知られています。近年になって実は、熱揺らぎによって磁気スキルミオンも通常のコロイド粒子のように、ブラウン運動に代表される拡散運動を示すことが確認されており、これを用いた確率論的演算、ブラウンアン計算機、乱数発生器など様々なデバイス応用が期待されています。しかしながらトポロジーが磁気スキルミオンの拡散性においてどのような役割を果たしているのかこれまで明らかにされておらず、拡散性を向上させる設計指針も不明であり、詳細に調べることが求められていました。

今回の取り組み

今回、東北大学電気通信研究所の土肥昂堯助教、独ウプサラ大学 Markus Weißenhofer 研究員、独コンスタンツ大学 Ulrich Nowak 教授、独マインツ大学ヨハネスグーテンベルグ校の Mathias Kläui 教授からなる共同研究チームは、強磁性層/非磁性/強磁性層の積層構造によって二枚の強磁性層を人工的に反強磁性的に結合させた人工反強磁性体を作製し、そこで実現する二つの磁気スキルミオンを逆方向に結合させた”人工反強磁性結合スキルミオン”（図1b）を用いてこの課題に取り組みました。人工反強磁性結合した磁気スキルミオンでは、上部のスキルミオンと下部のスキルミオンが、逆方向に渦巻いているため、それぞれの磁化の強さ（矢印の大きさ）の比を調節することで、正味の渦巻きの強さを容易に制御することができます。こ

のようにして渦の強さを制御しながら磁気スキルミオンの拡散運動を詳細に調べました。

図 2 に実験結果と、明らかになった描像をまとめた模式図が示されています。実験結果は、磁化補償比(上部の磁化の強さ/下部の磁化の強さ)が 100 %になる時、つまり正味の渦巻きがゼロに近づくにつれ、拡散性が著しく向上することがわかりました。点線は、理論計算を示しており、よく一致することがわかります。これは、磁気スキルミオンでは、熱揺らぎによってミクروسケールで常に旋回運動を引き起こすような力が働いているということを意味しており、人工反強磁性結合スキルミオンでは、熱揺らぎによる旋回力が相殺されるため、正味の拡散性が向上するということを示しています。アインシュタインによるブラウン運動の記述では、コロイド粒子のような一般的な粒子の拡散と摩擦の関係が示されていますが、磁気スキルミオンでは、これらに加え拡散とトポロジーが密接に関連するという新たな側面が、実験及び理論から明らかになりました。

今後の展開

これまで磁気スキルミオンの確率論的運動を用いた様々なデバイス応用が提案されていますが、磁気スキルミオンのトポロジーがどのような影響を及ぼしているか、また制御可能か、明らかにされていませんでした。本研究では、磁気スキルミオンの拡散性とトポロジーの関係を明らかにし、その制御を実証しました。今後、今回確立した知見を用いて、拡散性を更に向上させることにより、確率素子の実現へと繋がり、同時に物性物理学におけるトポロジーの理解を発展させる上での一助となることも期待されます。

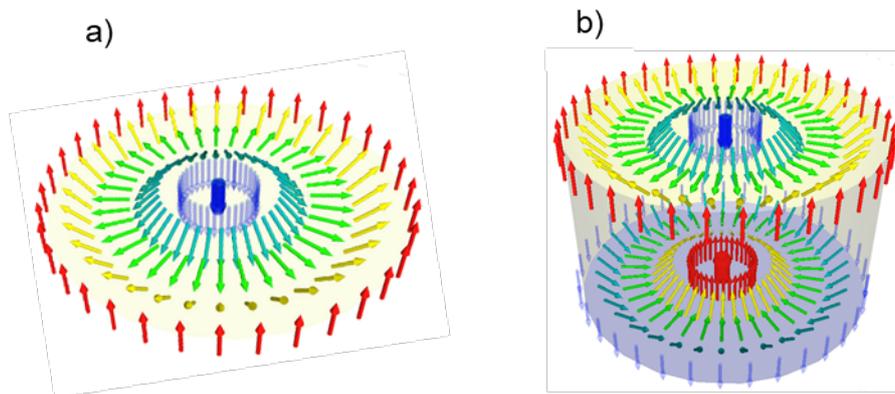


図 1. a)磁気スキルミオンと b)人工反強磁性スキルミオン。人工反強磁性スキルミオンでは、お互い逆方向に結合しているため、それらの磁化の大きさ(矢印の大きさ)を制御することによって正味の渦の強さを制御できる。

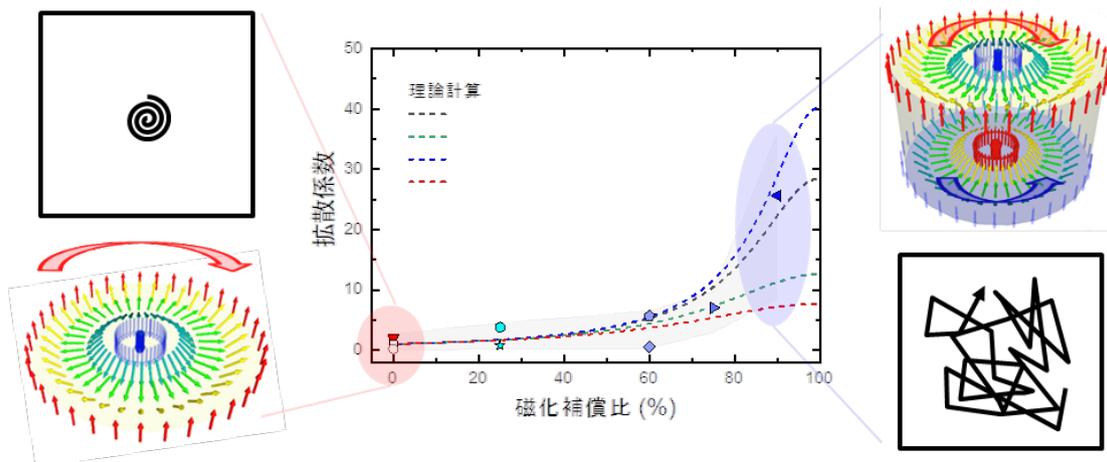


図 2.磁気スキルミオンの磁化補償比と拡散係数の関係及び拡散運動におけるトポロジーの役割に関する模式図。磁気スキルミオンは、熱揺らぎによって旋回力が働くために、任意の箇所にも局在するような運動が生じる(磁化補償比 0%, 左図)。一方、人工反強磁性スキルミオンでは、熱揺らぎによる旋回力も相殺するため、熱揺らぎによる拡散性が向上する(右図)。点線は、磁気特性の誤差を含む理論計算。

【謝辞】

本研究はヨーロッパキヤノン財団、日本学術振興会科学研究費助成事業 (JP23K13655)などの支援の下で行われたものです。

【用語説明】

注1. 磁気スキルミオン

磁性体中で実現するナノスケールで安定可能な磁気渦 (図 1 a)。磁気構造の立体角でトポロジーが規定され、磁気スキルミオンは有限の値 (1) を持つ。このためナノスケールにおいてさえも極めて安定であり、不純物等の外乱に対して堅牢な構造であると考えられている。図 1 b) で示すような、二つの磁気スキルミオンが逆方向に結合したスキルミオンを人工反強磁性結合スキルミオンと呼ぶ。逆方向に結合しているため、お互いの磁化強さの比によって、正味の渦の強さを制御できる。

注2. ドリフト運動、拡散運動(ブラウン運動)

物体の運動は、二つに大別される。一つは、指向性を持つ外力によって駆動されるドリフト運動。もう一つは、熱揺らぎのような時間的、方向的なランダム性を持つ外力による確率的な運動である拡散運動である。拡散運動の代表例として、粒子のブラウン運動が良く知られており、アインシュタインによって拡散 (揺動) と摩擦 (散逸) の関係が明らかにされた。揺動散逸定理の一種として良く知られている。

注3. トポロジー

何らかの系のカタチを連続変形の観点から分類する幾何学。良く知られた例としてドーナツとコップの例が挙げられる。ドーナツとコップは同じ穴の数を有しており、連続変形によってお互いに移ることができるが、球のような穴の数が異なる物体には移り変わることができない。ここで、穴の数はトポロジカル数と呼ばれ、この数が異なる系には、移り変わることができないため、ある種の安定性を意味している。磁性体では、磁気モーメント（図1におけるそれぞれの矢印）が球を何回覆うかという指標がトポロジカル数であり、磁気スキルミオンは1という有限の値をとる。

【論文情報】

タイトル：“Enhanced thermally-activated skyrmion diffusion with tunable effective gyrotropic force”

著者：*Takaaki Dohi, *Markus Weißhofer, Nico Kerber, Fabian Kammerbauer, Yuqing Ge, Klaus Raab, Jakub Zázvorka, Maria-Andromachi Syskaki, AgaShahee, Moritz Ruhwedel, Tobias Böttcher, Philipp Pirro, Gerhard Jakob, Ulrich Nowak, and *Mathias Kläui

*責任著者：東北大学電気通信研究所・助教・土肥 昂堯

掲載誌：Nature Communications

DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-40720-0>

URL: <http://www.spin.riec.tohoku.ac.jp/>

【問い合わせ先】

(研究に関すること)

東北大学電気通信研究所

助教 土肥 昂堯

TEL: 022-217-5555

E-mail: tdohi@tohoku.ac.jp

(報道に関すること)

東北大学電気通信研究所 総務係

TEL: 022-217-5420

E-mail: riec-somu@grp.tohoku.ac.jp