

高いトポロジカル数をもつ磁気スキルミオンを発見
— 磁場によるトポロジーの多段スイッチングが可能に —

1. 発表者：

求 幸年（東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 教授）

速水 賢（北海道大学大学院理学研究院物理学部門 助教）

小澤 遼（東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 博士課程3年）

2. 発表のポイント：

- ◆磁性金属に対する大規模数値計算により、高いトポロジカル数（注1）をもつ磁気スキルミオン結晶（注2）と、磁場によるトポロジーの多段階変化を発見しました。
- ◆磁場中で現れるトポロジカル数1の従来型とは起源を全く異にする、トポロジカル数2の磁気スキルミオンが磁場のない状態でも安定に存在することを発見しました。
- ◆磁場によるトポロジーの多段スイッチング（注3）は、情報素子への応用に新しい可能性をもたらすことが期待されます。

3. 発表概要：

東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻の小澤遼大学院生、北海道大学大学院理学研究院物理学部門の速水賢助教、東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻の求幸年教授らは、磁性金属中において、トポロジカル数が2の新しい磁気スキルミオン結晶が現れ、磁場に応じてトポロジカル数が多段階に変化する現象を理論的に発見しました。

物質中の電子スピンの作るミクロな磁気渦の一種である磁気スキルミオンは、そのトポロジカルな性質に守られた堅牢さや、磁場・電場に対する応答の多様性などから、新しい磁気デバイスへの応用が期待されています。これまで、磁場中で安定なトポロジカル数1の磁気スキルミオンが精力的に調べられてきましたが、応用の可能性を広げる上で、新しいタイプの磁気スキルミオンの開拓が望まれていました。

本研究グループは、磁性金属に対する理論モデルの性質を大規模数値シミュレーションによって調べることで、これまで知られていなかったトポロジカル数が2の磁気スキルミオンが、磁場のない状態でも安定に存在することを見出しました。さらに、従来より高いトポロジカル数を反映して、磁場によるトポロジーの多段スイッチングが可能なることも明らかにしました。本研究の結果は、微小磁場による多値メモリ動作といった新しい応用へ向けた学理の確立につながると期待できます。

4. 発表内容：

固体中の電子がもつスピンと、電子自身の流れである電気伝導の関係を理解することは、磁気伝導現象に関する基礎学理の解明だけでなく、スピントロニクス（注4）といった次世代の電子デバイスを視野に入れた応用の観点からも重要な課題です。スピンの特徴的な空間配列によって電気伝導を制御できることは古くから知られていることですが、近年、とりわけ大きな興味を集めているスピン配列に磁気スキルミオンと呼ばれるものがあります。磁気スキルミオンは、スピンの渦状に配列した構造体で、各スピンの向きを矢印で表してそれらの矢尻を束ねると球面全体を覆うような特徴的なテクスチャーをもちます（図1）。このことから、例えば

トポロジカルホール効果と呼ばれる非従来型の異常ホール効果といった、数学のトポロジー(位相幾何学)と密接に関連した興味深い物理現象が現れることが知られています。

これまで、主に空間反転対称性をもたない物質中で、トポロジカル数が1(球面をちょうど1回覆うスピン配列)をもつ磁気スキルミオン結晶が磁場中で見出されてきました。こうした磁気スキルミオンは、スピンの向きを揃えようとする強磁性的な相互作用と、それをひねろうとするジャロシンスキー-守谷相互作用(注5)、および外部磁場といった要素が協調的に働くことによって安定化することが知られています。ところが最近になって、空間反転対称な物質や理論モデルにおいても磁気スキルミオン結晶が見出され、その起源が議論的になっています。こうした磁気スキルミオンには従来型と異なる性質も見られることから、さらなる応用の幅を広げるためにも、新しいタイプの磁気スキルミオンの探索が世界的な研究の潮流となっています。

本研究グループでは、磁性金属に対する基本的な理論モデルの一つである近藤格子模型(注6)に対して、近年開発された新しい大規模数値シミュレーション手法を適用し、安定なスピン配列と電子状態を調べました。モデルは空間反転対称な三角格子のものを考え、多項式展開法(注7)とランジュバンダイナミクス(注8)に基づいた新しいアルゴリズムを用いた数値計算を、GPGPU(注9)による超並列スーパーコンピュータを駆使して実行しました。これにより、従来のシミュレーションを大きく超える10,000個以上のスピンを含む大きな系の性質を明らかにすることに成功しました。

その結果、通常はらせん型の磁気構造が現れると考えられていた無磁場の状態において、トポロジカル数が2の磁気スキルミオン結晶(図2)が現れることを見出しました。これは、これまでの磁気スキルミオンには見られないスピン配列をもっていること、また、空間反転対称性の破れや外部磁場を必要としないことから、全く新しい磁気スキルミオン結晶といえます。その安定化のメカニズムを詳細に調べることにより、磁性金属がもつフェルミ面(注10)の効果と、格子構造の回転対称性という2つの基本的な性質が重要な役割を果たしていることを明らかにしました。

さらに、外部磁場を導入することによって、トポロジカル数2の磁気スキルミオン結晶から、トポロジカル数1の別の磁気スキルミオン結晶、トポロジカル数0の磁気渦状態へと多段階の変化が生じることを見出しました(図3)。この中間状態であるトポロジカル数1の磁気スキルミオン結晶は、空間反転対称性のない系で見出されてきたものと類似したスピン配列をもちます。数学的なトポロジーの議論から予想される通り、各状態でトポロジカル数は磁場の変化に対して整数値を保ちますが、磁場の強さがある臨界値に達すると不連続に変化します。トポロジカル数が $2 \rightarrow 1 \rightarrow 0$ と多段階に変化する振る舞いは、従来のトポロジカル数1の磁気スキルミオンでは見られない全く新しいものです。

本研究の結果から、磁性金属には全く新しい磁気スキルミオンが潜んでいること、磁場によるトポロジカル数の多値スイッチングが可能であることが明らかとなりました。これらのことは、空間反転対称な格子構造をもつありふれた磁性金属にも、未踏の可能性が残されていることを示しており、今後の磁気スキルミオンの物質探索と設計指針に大きな影響を与える結果です。特にトポロジーの多段スイッチングの発見は、多値メモリといった新たな応用を見据えた基礎学理の確立へ向けた足がかりとなることが期待できます。

5. 発表雑誌:

雑誌名: 「Physical Review Letters」 (4月3日オンライン版出版予定)

論文タイトル: Zero-Field Skyrmions with a High Topological Number in Itinerant Magnets

著者 : Ryo Ozawa*, Satoru Hayami, and Yukitoshi Motome*

6. 問い合わせ先 :

東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻
教授 求 幸年 (もとめ ゆきとし)

7. 用語解説 :

(注1) トポロジカル数

数学のトポロジー (位相幾何学) と呼ばれる分野で取り扱われる変数で、立体の穴やひねりの数に対応した離散的な値をとります。磁気スキルミオンの場合には、スピンの向きを表す矢印が球面を覆う回数に対応します。

(注2) 磁気スキルミオン結晶

磁気スキルミオンとは、スピンの向きが一種の渦状をなすマイクロな磁気構造体を指します。スピンの向きが球面を覆う回数に応じたトポロジカル数によって特徴付けられる粒子とみなすことができます。この粒子を規則的に並べたものを磁気スキルミオン結晶と呼びます。

(注3) 磁場によるトポロジーの多段スイッチング

磁場の変化によってトポロジカル数を多段階に制御できることを指します。磁気スキルミオンの場合には、トポロジカル数はスピンのテクスチャーと1対1の関係をもつため、磁場によってスピンのテクスチャーを多段階に制御できることを意味します。

(注4) スピントロニクス

電子のもつスピンの自由度を積極的に用いるエレクトロニクスを指します。

(注5) ジャロシンスキー-守谷相互作用

空間反転対称性をもたない磁性体において、相対論的な効果からスピンの間に働く相互作用の一種です。スピンの向きをひねるように働くことから、らせん磁性や寄生強磁性の原因として、ジャロシンスキーと守谷によって独立に見出されました。

(注6) 近藤格子模型

伝導電子と局在磁気モーメントからなる磁性金属に対する基本的なモデルの一つです。伝導電子の運動エネルギーと、伝導電子のスピンの局在した磁気モーメントの間に働く磁気的な相互作用エネルギーからなります。

(注7) 多項式展開法

ある関数を一連の多項式を用いて近似的に表す数学的な手法です。例えば、フーリエ展開は三角関数を用いた多項式展開の一つです。

(注8) ランジュバンダイナミクス

多粒子系の動的な性質を数学的にモデル化する手法の一つで、多自由度系のダイナミクスをある種の確率微分方程式を用いて記述します。

(注9) GPGPU

General-Purpose computing on Graphic Processing Units の略語で、GPU の高速な演算性能を画像処理以外の目的に利用した計算技術のことです。

(注10) フェルミ面

物質中の電子状態から決まる運動量空間上の曲面のことを指し、2次元の場合には曲線になります。金属のさまざまな性質はフェルミ面近傍の電子によって決まることが知られています。

8. 添付資料：

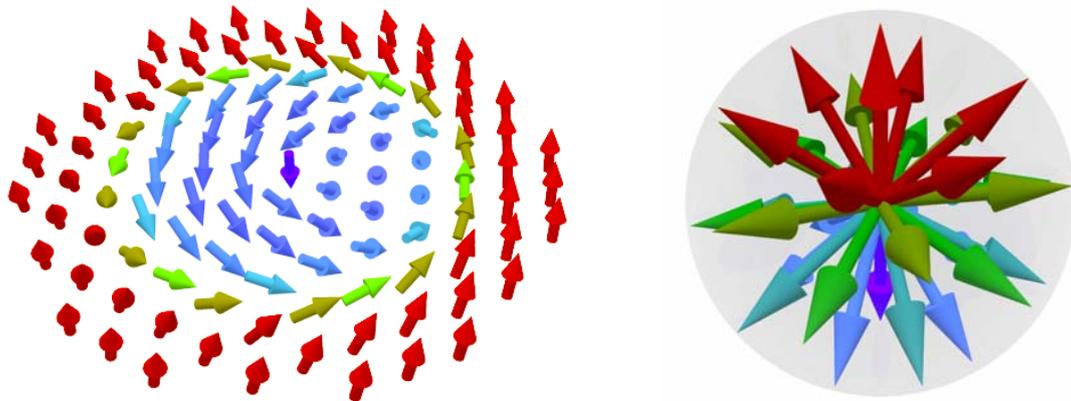


図1：磁気スキルミオンの概念図

各矢印は電子がもつスピンの向きを表し、矢印の色はスピンが並んでいる面に垂直な成分に対応します（面直上向きが赤系、下向きは青系）。左は2次元平面状に並んだスピンが磁気スキルミオンを構成する様子を表し、右はスピンの矢尻を仮想的に束ねた図に対応します。右図から、全てのスピンを束ねると、球面全体をちょうど一回覆うことがわかります。このことは、左図の磁気スキルミオンのトポロジカル数が1であることを示しています。

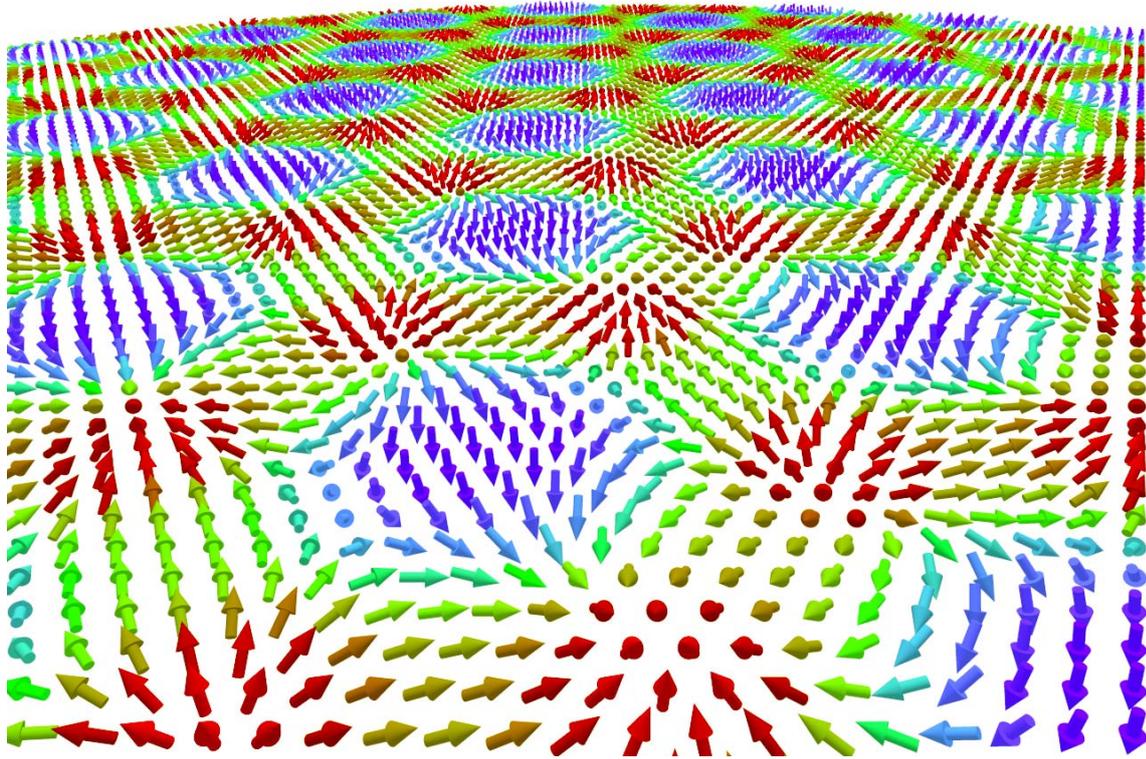


図2：トポロジカル数2の磁気スキルミオン結晶の模式図

各矢印は図1と同様に電子がもつスピンの向きを表します。スピン配列は周期的な構造をもち、周期構造の1単位に含まれるスピンを集めてそれらの矢尻を束ねると、球面をちょうど2回覆う構造となっています。このことから、この磁気スキルミオン結晶は、トポロジカル数が2の磁気スキルミオンを周期的に並べた構造をしていることがわかります。

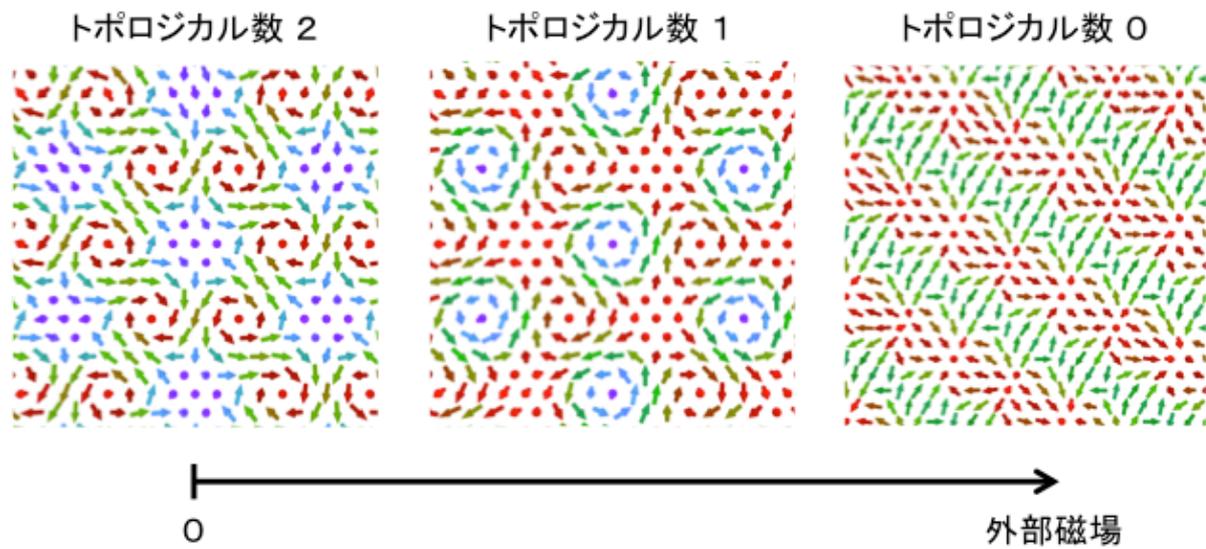


図 3：磁場によるトポロジカル数の多段階変化

左から、トポロジカル数が 2 の磁気スキルミオン結晶、1 の磁気スキルミオン結晶、0 の磁気渦状態のスピンの配列の様子を示します。