

## 新型スキルミオン結晶が示す特異なスピン・電荷励起の性質を発見

～未知のデバイス機能の開拓や技術応用に期待～

### 発表のポイント

- 空間反転対称性のある系で発現する新しいタイプのスキルミオン結晶の低エネルギー励起の性質を調べるために、スーパーコンピュータを用いた大規模数値シミュレーションを行った。
- スキルミオン結晶は、2種類の低エネルギー励起のモードを持つことが明らかとなり、これらの励起はそれぞれ、物質の「磁気的な性質」と「電気的な性質」を担う電子の「スピン」と「電荷」の自由度に由来する励起で、両者が完全に分離・独立していることを発見した。
- この現象は、空間反転対称な磁性体において伝導電子の働きにより発現するスキルミオン結晶では「スピンと電荷のダイナミクスを個別かつ選択的に励起できる可能性」を示唆している。

早稲田大学理工学術院の望月 維人 (もちづき まさひと) 教授、同大学院先進理工学研究科修士課程2年の衛藤 倫太郎 (えとう りんたろう)、東京大学大学院工学系研究科のポーレ・リコ特任研究者らの研究グループは、磁性体中の磁気モーメントが作る磁気渦 (スキルミオン) の周期配列「スキルミオン結晶<sup>※1</sup>」において、電子が持つ「スピン」と「電荷」の低エネルギー励起が完全に分離・独立した「スピン-電荷デカップリング」が実現しており、それぞれを個別かつ選択的に励起できる可能性を理論的に発見しました。

本研究成果は、アメリカ物理学会発行の『Physical Review Letters』にて、2022年6月28日 (火) (現地時間) にオンラインで掲載されました。

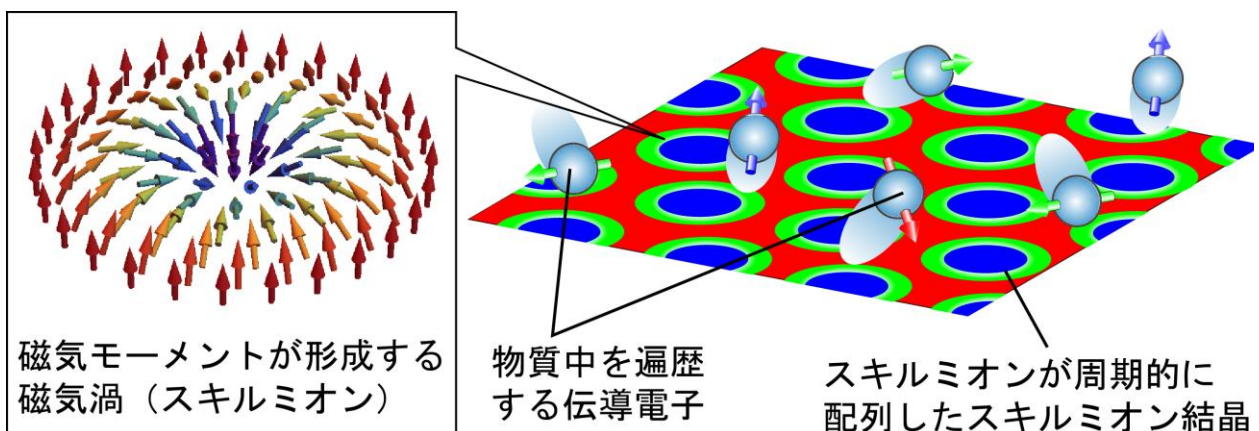


図1：磁性体中で磁気モーメントにより形成される磁気渦「スキルミオン」と、スキルミオンが周期的に配列した「スキルミオン結晶」。結晶構造が空間反転対称性を持つ磁性体中では、伝導電子が媒介する磁気モーメント間の有効相互作用がスキルミオン結晶形成のメカニズムになっている。

## (1) これまでの研究で分かっていたこと（科学的・歴史的な背景など）

「スキルミオン結晶」は、磁性体中で磁気モーメントにより形成される磁気渦（スキルミオン）が周期的に配列した磁気構造で、2009年に発見されて以来、世界中で精力的に研究されています。スキルミオン結晶は、位相幾何学的な特徴を持つために、熱揺らぎなどの外部擾乱に対して堅牢であるという性質や、通常の磁気構造よりも小さな外場刺激に対して大きな電磁応答を示すという性質を持ちます。そのため、安定かつ省電力なメモリ素子やコンピューティング素子を実現するための革新的な磁気構造として注目を集めています。また、スキルミオン結晶の低エネルギー励起は、マイクロ波整流効果や、マイクロ波-電圧変換、高感度磁場検出といった様々なデバイス機能を持つことが近年の研究で徐々に分かってきました。

磁性体の結晶構造が空間反転対称性<sup>※2</sup>を持たない場合、隣接する磁気モーメント間の相対角に「ひねり」を加える「ジャロシンスキー・守谷相互作用<sup>※3</sup>」が働きます。長い間、スキルミオン結晶の発現には、このジャロシンスキー・守谷相互作用が必須だと考えられてきました。ところが近年、ジャロシンスキー・守谷相互作用が働かないはずの「結晶構造が空間反転対称性を持つ磁性体」においても、スキルミオン結晶が相次いで発見されました。このような新しいタイプのスキルミオン結晶は、従来のようなジャロシンスキー・守谷相互作用ではなく、「伝導電子」と呼ばれる物質中を動き回る（遍歴する）電子が媒介する相互作用により安定化していることが近年の理論研究により明らかになっています。

## (2) 今回の研究で新たに実現しようとしたこと、明らかになったこと

このような新しい機構で発現しているスキルミオン結晶の低エネルギー励起の性質を調べるために、スーパーコンピュータを用いた大規模数値シミュレーションを行いました。その結果、このスキルミオン結晶は、2種類の低エネルギー励起のモードを持つことが明らかになりました。さらに詳しく調べると、これらの励起はそれぞれ、物質の「磁気的な性質」と「電気的な性質」を担う電子の「スピン」と「電荷」の自由度に由来する励起となっていて、両者が完全に分離・独立していることが分かりました。我々はこれを、励起に関する「スピンと電荷の分離現象」と呼んでいます。この現象は、空間反転対称な磁性体中に発現する新しいタイプのスキルミオン結晶において、「スピンと電荷のダイナミクスを個別かつ選択的に励起できる可能性」を示唆しています。

やや専門的な詳細を述べると、本研究では、局在電子スピン（磁気モーメント）と遍歴電子が相互作用する金属磁性体を記述する「近藤格子模型」と呼ばれる数理模型を用いて数値シミュレーションを行いました。その結果、系の対称性を反映した「ゴールドストーンモード<sup>※4</sup>」と呼ばれる低エネルギーの集団励起モードが2種類存在することを発見しました（図2）。これら2種類のゴールドストーンモードのうち、片方は逆格子空間<sup>※5</sup>において原点付近で直線状の分散関係<sup>※6</sup>を持ち、もう片方は放物線状の分散関係を持っています。外部磁場がない状態では、直線分散を持つゴールドストーンモードはスピンの励起が、放物線分散を持つゴールドストーンモードは電荷の励起が担っており、スピンと電荷の励起が完全に分離・独立していることが分かりました。

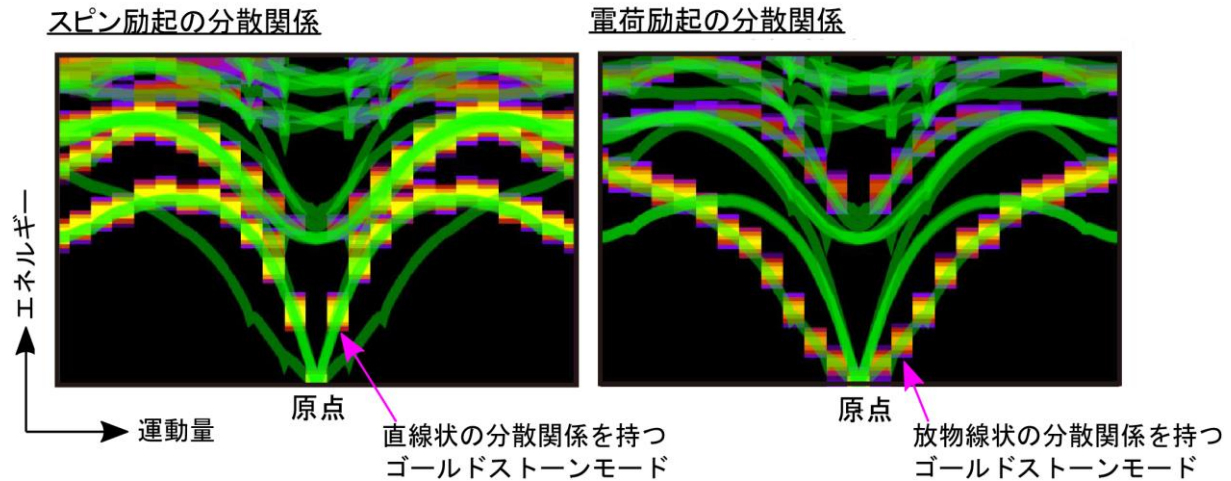


図2：本研究で明らかになった空間反転対称性のある磁性体で発現するスキルミオン結晶のスピン励起の分散関係（左）と電荷励起の分散関係（右）。

### （3）そのために新しく開発した手法

今回の研究対象である「スキルミオン結晶の励起現象」に、数値シミュレーションを用いてアプローチするためには、1万個以上の膨大な電子が持つスピンと電荷の自由度を、それらの量子力学的な性質まで考慮して理論的に取り扱う必要があります。このような極めて大規模な数値シミュレーションを実行するため、チェビシェフ多項式<sup>※7</sup>を用いた多項式展開法をベースに、いくつかの先進的な数値解析の手法を組み合わせた独自のプログラムコードを開発しました。さらにこのプログラムコードを、東京大学物性研究所のスーパーコンピュータ上で約2万個のCPUコアを用いて実行し、シミュレーションを行いました。

### （4）研究の波及効果や社会的影響

今回の研究で明らかになった、空間反転対称な磁性体中に現れる新しいタイプのスキルミオン結晶が示す「スピン励起と電荷励起のデカップリング」は、スキルミオン結晶において「スピンと電荷のダイナミクスを個別かつ選択的に励起できる可能性」を示唆しています。従来のスキルミオン結晶の低エネルギー励起は、マイクロ波整流効果や、マイクロ波-電圧変換、高感度磁場検出、円偏光マイクロ波によるスキルミオン生成など多様で有用なデバイス機能や物質現象の宝庫であることが明らかにされ、その知見は、これらの機能や現象の研究を支えてきました。今回の我々の発見は、スキルミオン結晶が秘める未知のデバイス機能や物質機能の開拓につながることを期待されます。

### （5）今後の課題

今回発見した「新しいタイプのスキルミオン結晶のスピン・電荷励起の特異な性質」を活用したデバイス機能を開拓していくことが、産業応用に向けた今後の主要課題です。また、今回発見した現象を記述する、基礎的かつ一般的な理論の枠組みを構築することが、今後の研究展開の観点から重要です。

## (6) 研究者のコメント

本研究の発見により、近年相次いで発見されている「空間反転対称な磁性体中に現れる新しいタイプのスキルミオン結晶」の基礎研究や、デバイス機能の開拓、技術応用に向けた開発が加速されることを期待しています。

## (7) 用語解説

### ※1 スキルミオン結晶

磁性体中の磁気モーメントが集団で形成する「スキルミオン」と呼ばれる磁気渦が、三角格子状や正方格子状など空間周期的に配列した磁気秩序状態。様々な物性現象や物質機能の宝庫になっていることが、近年の研究で明らかになってきている。

### ※2 空間反転対称性

空間内のある点を原点にとって空間座標の符号を反転させても、結晶構造が不変に保たれる対称性。

### ※3 ジャロシンスキー・守谷相互作用

電子の公転運動と自転運動を結びつける相対論的効果（スピン軌道相互作用）に由来する磁気モーメント間に働く有効的な相互作用。一般に、隣り合う磁気モーメント間の相対角に「ひねり」を与える。

### ※4 ゴールドストーンモード

対称性の自発的な破れにより現れる固有振動モード。励起振動が空間的にゆっくり変調する極限（長波長極限）においてエネルギーがゼロに近づく。

### ※5 逆格子空間

運動量ベクトルが張る空間。実空間とはフーリエ変換によって結び付けられ、逆格子空間上には、実空間上における周期性が反映される。

### ※6 分散関係

励起エネルギーの運動量依存性。その関数形から、励起モードの持つ物理的性質が推測できる。

### ※7 チェビシェフ多項式

三角関数の一種であるコサインの  $n$  倍角 ( $n$  は自然数) の定理に相当する多項式。チェビシェフ多項式において成り立つ漸化式や、そこから導かれる連鎖律は、量子性を考慮した系の電子状態を、計算コストを削減して高速にシミュレーションするのに使われる。

## (8) 論文情報

雑誌名：Physical Review Letters

論文名：Low-energy excitations of skyrmion crystals in a centrosymmetric Kondo-lattice magnet: Decoupled spin-charge excitations and nonreciprocity (空間反転対称な近藤格子磁性体中のスキルミオン結晶における低エネルギー励起: スピン-電荷励起の分離と非相反性)

執筆者名 (所属機関名)：衛藤 倫太郎 (早稲田大学大学院先進理工学研究科修士課程 2 年)

ポーレ・リコ (東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻特任研究員)

望月 維人 (早稲田大学理工学術院先進理工学部応用物理学科教授)

掲載日：2022年6月28日（火）

掲載 URL：https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.129.017201

DOI：https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.129.017201

### （9）研究助成

○研究費名：科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 CREST （課題番号：JPMJCR20T1）

研究課題名：Beyond Skyrmion を目指す新しいトポロジカル磁性科学の創出

研究代表者名（所属機関名）：于 秀珍（理化学研究所）

○研究費名：日本学術振興会 科学研究費助成事業 基盤研究(A)

研究課題名：スキルミオニクス創成に向けた基盤技術と材料の開拓 （課題番号：20H00337）

研究代表者名（所属機関名）：望月 維人（早稲田大学）

○研究費名：日本学術振興会 科学研究費助成事業 基盤研究(A)

研究課題名：金属酸化物スピン軌道エレクトロニクス （課題番号：19H00864）

研究代表者名（所属機関名）：安藤 和也（慶應義塾大学）

○研究費名：日本学術振興会 科学研究費助成事業 基盤研究(S) （課題番号：16H06345）

研究課題名：強相関物質設計と機能開拓 –非平衡系・非周期系への挑戦–

研究代表者名（所属機関名）：今田 正俊（早稲田大学）

### 【研究内容に関するお問い合わせ先】

早稲田大学 理工学術院 教授 望月 維人

Tel: 03-5286-3447 E-mail: masa\_mochizuki[at]waseda.jp

### 【本報道に関するお問い合わせ先】

早稲田大学 広報室広報課

Tel: 03-3202-5454 E-mail: koho[at]list.waseda.jp

科学技術振興機構 広報課

Tel : 03-5214-8404 E-mail : jstkoho[at]jst.go.jp

東京大学大学院工学系研究科 広報室

Tel: 03-5841-0235 E-mail: kouhou[at]pr.t.u-tokyo.ac.jp

### 【JST 事業に関するお問い合わせ先】

科学技術振興機構 戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ 嶋林 ゆう子

TEL: 03-3512-3531 E-mail: crest[at]jst.go.jp