

磁気スキルミオンの誘電ダイナミクスに関する研究

Magnetolectric Dynamics of Skyrmions

H24助自29

代表研究者 関 真 一 郎 理化学研究所 創発物性科学研究センター ユニットリーダー
Shinichiro Seki Unit Leader, Center for Emergent Matter Science, RIKEN

共同研究者 高 橋 陽 太 郎 東京大学 大学院工学系研究科
量子相エレクトロニクス研究センター 特任准教授
Yotaro Takahashi Project associate professor, Quantum phase electronics center, University of Tokyo

Magnetic skyrmion is a topologically stable particle-like object, which appears as nanometer-scale vortex-like spin texture in a chiral-lattice magnet. In metallic materials (MnSi, FeGe, $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$ etc), electrons moving through skyrmion spin texture gain a nontrivial quantum Berry phase, which provides topological force to the underlying spin texture and enables the current-induced manipulation of magnetic skyrmions. Such electric controllability, in addition to the particle-like nature, is a promising advantage for potential spintronic device applications. Recently, we newly discovered that skyrmions appear also in an insulating chiral-lattice magnet Cu_2OSeO_3 . We find that the skyrmions in insulator can magnetically induce electric polarization through the relativistic spin-orbit interaction, which implies possible manipulation of the skyrmion by external electric field without loss of joule heating.

In this study, we have newly investigated the dynamical response of magnetic skyrmions against oscillating electric and magnetic fields (E^ω and H^ω). Magnetic skyrmions show coherent resonant oscillation in the rotating and breathing manners, depending on the geometrical relationship between light polarization and static magnetic field. Since such skyrmion resonance is often accompanied with the oscillation of macroscopic electric polarization, this mode can be excited not only by H^ω but also by E^ω . The strong interference between H^ω - and E^ω -induced excitations result in an unique optical phenomena called directional dichroism, where the reversal of light propagation direction gives different absorption spectrum (i.e. a kind of “one-way window” effect). We have successfully observed giant directional dichroism up to 3 % at the skyrmion resonance frequency, which demonstrates that the E -induced effective manipulation of skyrmions is indeed possible in the insulating materials and skyrmions may be useful as the potential building block for microwave diode device.

研究目的

近年、磁気スキルミオンと呼ばれる粒子性を伴った渦状のスピンテクスチャ (図1 (a)) が発見され、次世代の磁気記憶素子のための新

しい情報担体として大きな注目を集めている。スキルミオンは、右手系と左手系の区別のあるキラルな結晶構造を伴った強磁性体中で発現しやすいことが知られており、これまでにB20構造を伴った合金系の金属 (MnSi, FeGe, Fe_{1-x}

Co_xGeなど)と、絶縁体であるCu₂OSeO₃の2種類の物質群で実際に観測が報告されている。金属中のスキルミオンは外部からの電流によって駆動できることがわかっているが、金属中の電流は必ず電流の2乗に比例したジュール発熱を生じるため、エネルギー効率の観点からは必ずしも理想的な制御法とは言えない。一方、絶縁体中のスキルミオンは電気分極を生じることが我々の過去の研究からわかっており、このことは(電流ではなく)電場によって効率的にスキルミオンを制御できる可能性を強く示唆している。本研究では特に、絶縁体物質Cu₂OSeO₃中におけるスキルミオンの振動電場に対する応答を詳細に調べることで、ジュール損失を伴わない電場による磁気スキルミオンの制御を実証することを目指した。

概 要

スキルミオンとは、もともと素粒子物理の分野で特定の粒子を記述するために提案された概念であり、磁性体中では図1(a)に示すような渦状のスピントクスチャの形で発現する。こうした磁気スキルミオンは、特にキララな対称性の結晶構造を持った磁性体中で安定化しやすいことが知られており、その形成には反転対称性の破れた環境で発現するDzyaloshinskii-Moriya相互作用が大きな役割を果たしている

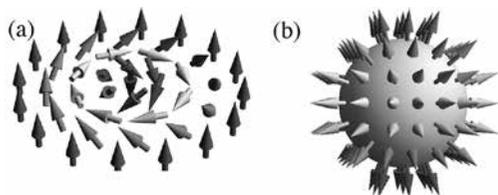


図1 (a) 磁気スキルミオンに相当するスピントクスチャの例。コア部分と辺縁部でスピンの方向が反転しており、その中間領域ではスピンの方向が渦を巻いたような構造になっている。1つのスキルミオン内のスピンを並べ替えると、(b)に示すようにちょうど球面状一周分覆うことができるという幾何学的な特徴がある。

とされている。磁気スキルミオンには、その構成要素となるスピンを並べ替えると、球の表面をちょうど一周分覆うことができるという特徴があり、こうしたトポロジカルな性質が外部からの摂動に対する安定性をもたらし、数えられる「粒子」としての振る舞いを与えている。磁性体中のスキルミオンの典型的な直径は5~20nm程度であり、今回の研究対象であるキララなフェリ磁性絶縁体Cu₂OSeO₃の場合には、50nm程度の直径のスキルミオンが生じる。特にこうした絶縁体中におけるスキルミオンは、スピントクスチャに由来した系の対称性の低下を通じて、電気分極を誘起できることが、我々の過去の研究からわかっている。このような絶縁体中における電気分極と強く結合したスキルミオンの発見は、外部からの電場によってスキルミオンのダイナミクスを自在に制御できる可能性を強く示唆している。

本研究では、上述の電場によるスキルミオンの制御を実証するための第一歩として、このCu₂OSeO₃に対して、GHz帯における振動電場・振動磁場に対する吸収スペクトルの磁場依存性を詳細に調べた。スキルミオンは、振動磁場と静磁場の相対的な配置に依存して、Breathingと回転の2種類の共鳴モードを生じることがわかっている。通常、こうした磁気共鳴は振動磁場によってのみ駆動できるとされているが、磁性と電気分極が強く結合したCu₂OSeO₃のような物質の場合には、振動磁場だけでなく振動電場によっても磁気共鳴を駆動できることが強く期待される。特に、こうした振動磁場・振動電場の両方で駆動できるような特殊な磁気共鳴モード(エレクトロマグノン)の場合には、双方の励起の効率的な干渉の結果、光の方向二色性と呼ばれる特殊な光学応答が観測できることがある。これは、一種の「マジックミラー効果」とも呼ぶべき現象であ

り、光の入射方向の反転に対して異なる吸収スペクトルを与える（つまり「表と裏で色が違う」）現象を指す。実際に、 Cu_2OSeO_3 のスキルミオン相におけるGHz帯の吸収スペクトルを観測してみると、マイクロ波の入射方向の反転に対して最大で3%程度の巨大な方向二色性を検出することに成功した。これは、GHz帯で過去に発見された方向二色性としては最大の値であり、実際にこの物質中で振動電場によるスキルミオンの共鳴駆動が可能であることを証明していると言える。

上記の結果は、磁気メモリへの応用上重要な、静電場によるスキルミオンの並進運動の駆動に強い期待を抱かせるものであり、特に金属中の電流では避けられなかったジュール発熱によるエネルギー損失を伴わない、新しい電気的なスキルミオン制御手法を提案していると考えられる。また、観測された方向二色性は、携帯電話の通信に利用されるGHz帯におけるアイソレータとしても応用可能な現象であり、それ自体非常に有用なものである。従来のアイソレータは、強磁性体中のファラデー効果を利用した円二色性によって実現されていたが、円偏光のマイクロ波にしかその機能を発揮できないという欠点があった。一方、今回観測された方向二色性は、原理的に光の偏光状態に依存せずに生じる現象であり、偏光を意識しない新しいアイソレータ素子の開発に繋がる可能性がある。現状で得られている整流効率は3%程度とまだ改善の余地はあるものの、より電気分極の大きな物質を開拓して振動電場への感受率を高めることで、整流効率は100%程度近くまで改善することも可能であると考えられ、今後の応用に向けた展開が期待される。

－以下割愛－