

カイラル磁性体におけるスキルミオンクラスタの 熱揺らぎ誘起自発ラチェット回転の理論

東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 望月維人, 永長直人

Thermally-Driven Ratchet Motion of Skyrmion Microcrystal in Chiral Magnets
Dept. of Applied Physics, Univ. of Tokyo, Masahito Mochizuki, Naoto Nagaosa

MnSi や $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$, Cu_2OSeO_3 などの空間反転対称性の破れた**カイラル磁性体**において、強磁性交換相互作用と Dzyaloshinskii-守谷相互作用、そして面直磁場のゼーマン相互作用の拮抗により実現する**スキルミオン**と呼ばれる渦状のトポロジカルなスピネクスタチャーや、それが三角格子状に結晶化した**スキルミオン結晶**が興味を集めている。

スキルミオンは、磁気バブルよりはるかに小さいサイズ(10-100 ナノメートル)を持ち、室温でも安定して存在するのみならず、現代スピントロニクスの主要な研究対象である強磁性体磁壁の電流駆動より 5-6 桁も小さい電流で並進運動や回転運動が駆動できるなど、省電力高密度データデバイスへの応用に非常に有利な性質を持つ。そのため、その駆動ダイナミクスや動的相転移現象、非平衡現象が興味を集めている。

スキルミオンは、スピンが持つベリー位相のために、その重心座標の x 成分と y 成分がカノニカル共役であるという性質があり、「自然な回転の向き」を持った特異な運動を示す。本研究では、カイラル磁性体の微視的なモデルを用いた LLG 方程式の有限温度シミュレーションにより、ナノディスク中に閉じ込められたスキルミオンの三角格子マイクロ結晶が、**熱揺らぎだけで** (他の駆動力は一切なしで) 自発的な**ラチェット回転**を起こすという驚くべき現象を発見した。そして、重心座標の運動方程式に基づく現象論的な考察から、この運動が「スピンのベリー位相」と「スキルミオン間に働く非調和ポテンシャル」、さらに有限温度での「ボルツマン分布」の複合効果に由来することを明らかにした。

さらに、この現象論に基づき、今回発見された熱揺らぎ誘起ラチェット運動に特有の次のような性質を予言した。まず、ラチェット運動の回転方向は、磁場の印加方向の正負に依存し、スキルミオンのカイラリティには依存しない。具体的には、磁場を負の方向に印加すると時計回りに回転し、磁場を反転すると回転方向も反転する。さらに、回転速度は温度に対して非単調な振舞いを示し、中間温度領域で最大値を取る。このような予言は、共同研究をしている実験グループのローレンツ透過型電子顕微鏡の実空間観察によって実際に確認されつつある。

講演では、熱力学の基本法則や van Leeuwen の定理などとも絡んだ重要な問題と併せて、この驚異の現象を熱く議論する。