

磁気スキルミオンの 1 次元・2 次元ブラウン運動と永久回転

[1] 要旨：磁気スキルミオンはスキルミオン数で特徴づけられるトポロジカルな粒子である(図 1(a))。これまでに磁界や電流による駆動においては、マグナス力の影響が明らかにされてきたが、ブラウン運動におけるマグナス力の役割は明らかになっていなかった。ここで紹介する論文では 1 次元的な拡散と 2 次元的な拡散の実験的な比較から、2 次元的な拡散においてはマグナス力により拡散が抑制されていることを明らかにしている。さらに速度位置相関の観測からスキルミオンが見かけ上、自発的な永久回転運動をしていること、その回転方向がマグナス力による回転の方向と逆であることを報告している。

[2] 本文

近年、磁気スキルミオン(図 1(a))を対象とした研究において、トポロジカルなスピン構造に由来した新奇な物理現象が数多く報告されている。特にダイナミクスに関しては、トポロジカルな量であるスキルミオン数に比例したマグナス力により、スキルミオンが運動方向を変えることが知られている。スキルミオンを電流で駆動させた場合、駆動力は電流に平行だが、マグナス力により軌道が曲げられスキルミオンホール効果を示す。またスキルミオン格子に電子線を照射することで放射状の熱流を作ると、電子を照射した点を中心としてスキルミオン格子が一方向に回転することが報告されている。これらのマグナス力に起因するスキルミオンの一方向性の回転(カイラルな回転)を伴う運動はいずれも駆動力の存在下で観測されている(ここで定義するカイラリティはスキルミオン自体のカイラリティではないことに注意)。しかしながら、熱平衡状態での運動、すなわちスキルミオンのブラウン運動においては、カイラルな特性を有するかどうかは明らかではなかった。

最近、大阪大学基礎工学研究科物質創成専攻、東北大学工学研究科応用物理学専攻及びアルバック未来技術協働研究所による研究グループは、強磁性体薄膜中に発現するスキルミオンのブラウン運動を観察し、以下に述べる 2 つの実験からカイラルな特性が拡散運動においても重要な役割を演じていることを報告した。(1)幅の狭いリボン状の領域(チャンネルと呼ぶ)にスキルミオンを閉じ込めると(図 1(b))、マグナス力による運動が不可能となるために拡散係数が増大する。(2) マグナス力による回転運動(ここではジャイロ運動と呼ぶ)が可能な 2 次元的な薄膜においてスキルミオンのブラウン運動を観察するとスキルミオンは膜の原点(時刻ゼロにおけるスキルミオンの位置)に対して見かけ上、有限な角運動量を示す。この成果は、Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)の 2021 年 8 月号に掲載された。論文では上記の(1),(2)に関して以下の詳しい報告がなされた。

(1) 1 次元、2 次元チャンネル中のスキルミオンの拡散

幅の異なるチャンネル中の拡散係数を平均二乗変位の観測から求め、チャンネル幅に対してプロットしたものを図 1(c)に示した。チャンネルの長手方向の拡散係数はチャンネル幅が小さくなると 1.3 から 1.9 倍程度大きくなる。幅の狭いチャンネル中のスキルミオンは 1 次元的に運動することを強いられるためにマグナス力の影響を受けない。これに対して幅の広いチャンネルでは 2 次元的な運動が可能となるためスキルミオンはマグナス力によるジャイロ運動を示す。このことにより 2 次元では拡散が抑制されていることが筆者たちにより初めて実験的に示された。この実験では磁性薄膜を加工することなく、僅かなキャップ層の膜厚の違いにより作られたスキルミオンの閉じ込めポテンシャルを利用することにより閉じ込めが実現した点も注目値する。

(2) 2 次元拡散における自発角運動量の観察

拡散係数 D は通常、平均二乗変位 $\langle x^2 + y^2 \rangle = \langle \mathbf{x}(t) \cdot \mathbf{x}(t) \rangle = 4Dt$ から求められるが、2 次元の回転対

称性から $\langle xy-yx \rangle = \langle \mathbf{x}(t) \times \mathbf{x}(t) \rangle_z$ は0となり、位置の相関ではブラウン運動のカイラルな性質を評価できない。そこで、この研究では速度-位置相関関数 $\langle \mathbf{v}(t) \cdot \mathbf{x}(t) \rangle$ 、および $\langle \mathbf{v}(t) \times \mathbf{x}(t) \rangle_z$ を用いて解析を行った[1]。その結果、有限の $\langle \mathbf{v}(t) \times \mathbf{x}(t) \rangle_z$ が熱平均値として得られた。このことはスキルミオンの拡散係数がテンソルで表されるべきであることを示唆している。

興味深いことに、観測された $\langle \mathbf{v}(t) \times \mathbf{x}(t) \rangle_z$ の符号は、スキルミオン数の符号から期待されるものと逆だった。すなわち単純な理論予想に対して反対方向の回転を示した。このことを理解するために、実際の薄膜に存在するであろうポテンシャルの揺らぎを周期ポテンシャルで模してブラウン運動のシミュレーション(図 2)を行った。この結果を注意深く見るとポテンシャルにとらえられたスキルミオンの軌道は二つの円運動の組み合わせた hypotrochoid(図 2 挿入図)とその周りの揺らぎであることがわかる。半径が小さく周波数の高い円運動はスキルミオン固有のジャイロ運動である。これに対して、大きくポテンシャルのふちを周回する周波数の低い軌道はジャイロ運動と逆回転を示す。計算によると、熱平衡状態ではスキルミオンが一つのポテンシャルポケットから脱出しない限りこれら二つの寄与が打ち消しあい $\langle \mathbf{v}(t) \times \mathbf{x}(t) \rangle_z$ がゼロであることが示せる。このことは古典的な系では自発的な角運動量は0である(磁性が発現しない)という Bohr-van Leeuwen の定理が満たされる結果といえる。この論文で見いだされている有限の $\langle \mathbf{v}(t) \times \mathbf{x}(t) \rangle_z$ はカメラのフレームレートが $30[\text{ms}^{-1}]$ と遅かったために後者のポテンシャルを周回する軌道の寄与のみが観測されたと理解され、そのため逆符号の $\langle \mathbf{v}(t) \times \mathbf{x}(t) \rangle_z$ が観測されたと結論されている。この運動 hypotrochoid は量子ホール効果におけるエッジ状態と似ているが角運動量がゼロになる軌道である点に特徴的な差異がある。

今回、スキルミオンのブラウン運動にカイラル性が存在することを明らかにされたが、ジャイロ運動の直接観測や質量[2]の同定などについて課題が残っており、今後の進展が期待される。

[1] Y. Suzuki, S. Miki et al., Phys. Lett. A, <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2021.127603> and references there in.

[2] I. Makhfudz, B. Krüger, and O. Tchernyshyov, Phys. Rev. Lett. **109**, 217201 (2012).

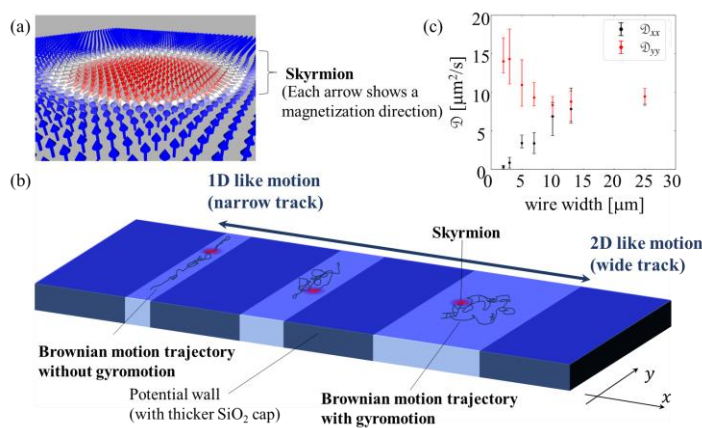


図 1 1次元と2次元中のスキルミオンの拡散(a)スキルミオンの概念図。(b)拡散係数 D のチャンネル幅依存性の実験の概念図。(c)実験結果。

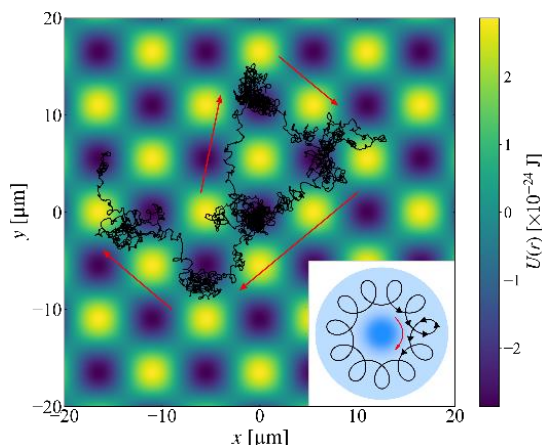


図 2 周期ポテンシャル中のスキルミオンの拡散のシミュレーション結果。挿入図は調和ポテンシャル中のスキルミオンの軌跡。

原論文 (7月14日オンライン公開済)

[Brownian Motion of Magnetic Skyrmions in One- and Two-Dimensional Systems](#)

S. Miki, Y. Jibiki, E. Tamura, M. Goto, M. Oogane, J. Cho, R. Ishikawa, H. Nomura, and Y. Suzuki, *J. Phys. Soc. Jpn.* **90**, 083601 (2021).

<情報提供：三木颯馬（大阪大学基礎工学研究科）>