

フラストレーションが創るスピントクスチャ

Frustration-induced spin textures

課題番号：17H06137

川村 光 (KAWAMURA, HIKARU)

大阪大学・大学院理学研究科・教授



研究の概要（4行以内）

相互作用が競合するフラストレート磁性体を舞台にフラストレーションが導くナノスケールのスピントクスチャは、基礎・応用の双方の面から大変興味深いターゲットであり、縮重したカイラリティ自由度に伴う新奇な相構造やダイナミクス・輸送現象が期待される。本研究では理論と実験の密接な連携により、スピントクスチャ起源の新奇な磁気現象の創出と解明を目指す。

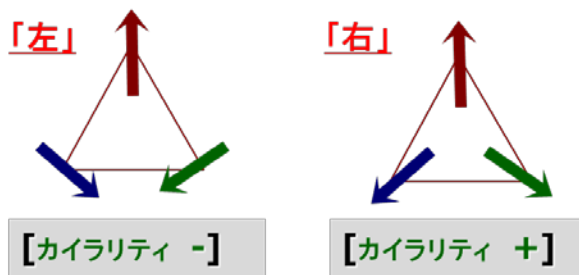
研究分野：数物系科学

キーワード：磁性、フラストレーション、スピントクスチャ、 Z_2 渦、スカーミオン

1. 研究開始当初の背景

「フラストレーション」という語は、物理学分野では、様々な最適化条件が互いに競合し系がそれらを同時に満たすことが出来ないような状況を指して使われる。フラストレート系は自明な安定状態を取りにくいので、大きな揺らぎを発現したり、非フラストレート系では見られない新しいタイプの秩序や熱力学相、巨大応答を示す。

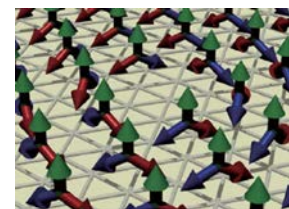
本研究では、磁性体をターゲットとする。磁性体をミクロに見ると、原子分子レベルの小さな磁石—「スピン」—が莫大な数集まって出来ている。通常なら、低温ではスピンは互いに同じ向きを向くか（強磁性体）、あるいは互いに逆向きを向く（反強磁性体）。



しかし、3角形の頂点に反強磁性的なスピンが位置する場合には、スピンが互いに逆向きに向うとしても不可能である。このような「フラストレート磁性体」では、しばしば、スピンは平行でも反平行でもなく、互いに傾いた、いわば「曲がった」構造を取る（上図）。このようなフラストレーション誘起の曲がったスピン構造の特徴として、スピン配置に

「右回り」か「左回り」の区別が生じるという点があり、このような右・左の自由度は、「カイラリティ」と呼ばれる。フラストレート磁性体では、このような「右」と「左」の状態が、お互い同じエネルギーを持っている。

本基盤S研究では、このうち、「 Z_2 渦」と「スカーミオン」と呼ばれる2つのスピン構造体を取り上げる。どちらもトポロジカル安定なナノスケールの「スピントクスチャ」で、カイラリティ自由度を内包している。図に示した Z_2 渦は今から



30年以上前に研究代表者らの理論研究によってフラストレート磁性体においてその存在が初めて理論的に指摘されたものである。スカーミオンは近年極めて活発な研究が展開されているが、これら従来型のは右・左がエネルギー的に非等価な「反対称的スカーミオン」である。

2. 研究の目的

本基盤S研究では、フラストレート磁性体を舞台に、右・左のカイラリティ自由度をキープした、豊富な内部自由度を持つフラストレーション誘起のスピントクスチャに着目し、それらが織り成す新奇な相構造やダイナミクス、輸送現象を、理論と実験の密接な連携によって明らかにする。本研究で着目するスカーミオンは右と左がエネルギー的に等価で「カイラル活性な対称的」スカーミオン

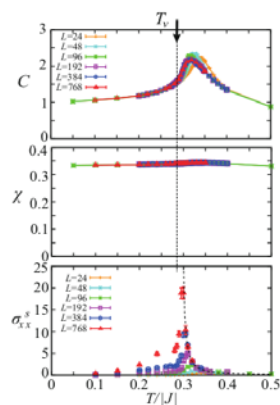
で、従来型とは異なった性質を持つと期待され、例えば、その電磁応答が互いに逆になるスカーミオンと反スカーミオンが共に出現するといった興味深い性質が期待される。とりわけ、 Z_2 渦や対称的スカーミオンが誘起する新奇輸送現象、電磁応答までを、理論と実験な緊密な連携を通して明らかにしたい。

3. 研究の方法

研究代表者らの理論予想をベースに、まずは一連の3角格子絶縁体候補物質を対象に、零磁場下および高磁場下の弾性・非弾性中性子散乱、X線散乱、帯磁率・比熱などのバルク物性測定を行う。主として局在スピンモデルを対象とした数値シミュレーション結果を参照しつつ、 Z_2 渦や対称的スカーミオンの存在を確立し、その相構造を明らかにする。合わせて、フラストレーション誘起の他のスピントクスチャ、多重Q秩序も探査する。さらには、金属磁性体も含めた新物質探査と試料合成を行い、輸送測定や電磁応答測定等も併用して、フラストレーション誘起のスピントクスチャが織りなす新奇物性の全貌を明らかにする。

4. これまでの成果

ターゲットしているスピントクスチャのうち、 Z_2 渦に関しては、一連の3角格子絶縁体候補物質に対し、粉末試料に対する高エネルギー分解の非偏極中性子散乱と単結晶試料に対する偏極中性子散乱測定を行い、過去の実験から推定されていた Z_2 渦転移温度近傍で、理論と整合的な特徴を持つ極めてシャープなセントラルピークや、実効的な磁気異方性の増強の観測に成功した。さらに、スピントクスチャが導く新奇輸送現象の典型例として、 Z_2 渦が輸送現象に及ぼす効果の理論的探求を進めた。その結果、スピン伝導度が Z_2 渦転移温度で発散的異常を示すことを初めて理論的に見出した(図)。静的な物理量には極めて弱い異常しか与えない Z_2 渦が、系の輸送性質には極めて強い異常を与えることを見出したことは重要な進展であると考えられる。



対称的スカーミオンに関しては、3角格子絶縁体磁性体に加えて、RKKY相互作用でフラストレートした一連の金属磁性体にまで対象を拡げて、試料作製と物性探査を進めている。その結果、未だ対称的スカーミオンの完全な同定にまでは至っていないものの、金属

系を中心に顕著なトポロジカルホール効果の検出や、スカーミオン格子相の可能性を有するポケット状の磁場中秩序相の観測といった有望なデータが得られている。

Z_2 渦と対称的スカーミオン以外のスピントクスチャについても、3角格子以外の格子系を対象に研究を進めている。例えば2次元ハニカム格子や3次元ダイヤモンド格子、パイロクロア格子を舞台に、波紋 (ripple) 状態やメロン格子といった新奇な多重Q秩序を新たに見出した。

5. 今後の計画

理論的に見出され Z_2 渦転移温度でのスピン伝導度の発散的異常の実験的検出を目指す一方、理論的には、輸送現象の解析をこれまでの Z_2 渦からスカーミオン系へと展開し、カイラル対称なスピントクスチャが担う輸送現象の全貌を明らかにしたい。対称的スカーミオンに関しては、これまでの候補物質を中心に、ホール測定などの輸送測定、中性子散乱を駆使して、スカーミオン格子と反スカーミオン格子の混合ドメイン相であるZ相や、エネルギー的に縮重したスカーミオン格子状態と反スカーミオン格子状態の相互転換・制御を目指したい。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

- “Spin Current as a Probe of the Z_2 -Vortex Topological Transition in the Classical Heisenberg Antiferromagnet on the Triangular Lattice”, K. Aoyama and H. Kawamura, Phys. Rev. Letters, **124**, 047202-(1-6) (2020).

- “Ripple state in the frustrated honeycomb-lattice antiferromagnet”, T. Shimokawa and H. Kawamura, Phys. Rev. Letters, **123**, 057202-(1-6) (2019).

- “Realization of interlayer ferromagnetic interaction in $MnSb_2Te_4$ toward the magnetic Weyl semimetal state”, T. Murakami, Y. Nambu, et al., Phys. Rev. B, **100**, 195103-0 (2019).

- “A new mathematical approach to finding global solutions of the magnetic structure determination problem”, K. Tomiyasu, et al., Sci. Rep., **8** 16228 (2018).

など。

7. ホームページ等

<http://thmat8.ess.sci.osaka-u.ac.jp/fstex>