

強磁場で解き明かすトポロジカル磁気相転移

—スキルミオン格子から創発磁気モノポール格子へ—

東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻 金澤 直也、藤代 有絵子、十倉 好紀
物性研究所 国際超強磁場科学研究施設 三田村 裕幸、三宅 厚志、松尾 晶、金道 浩一、徳永 将史

スキルミオン格子と創発磁気モノポール格子

量子ホール効果の発見を契機として、物質中のトポロジカルな構造に由来した実効的な電磁場(創発電磁場)が量子物性に大きな影響を与えていることが認識されるようになりました[1]。スピン構造のトポロジーに目を向けると、実空間のスピン配列やその時間変化で決まる創発電磁場分布が現れるため、スピン構造の制御により多種多様な創発電磁場物性を実現できる可能性を秘めています。特にナノメートルスケールの2次元渦状磁気構造であるスキルミオン(図1上段右)は、外部刺激による生成や消去、そして創発磁場を用いた高効率な検出や駆動といった制御が可能であるため、スキルミオンを情報ビットとする磁気メモリデバイス開発といった応用も期待されています[2]。

スキルミオンは MnSi や $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$ といった B20 型遷移金属化合物で観測されてきましたが[3,4]、同じ結晶構造を持つ MnGe ではヘッジホッグとよばれる3次元の特異なトポロジカルスピン構造が存在することが明らかになりました(図1下段右下)[5]。B20型化合物はキラルな結晶構造であるため、反対称的スピン間相互作用(Dzyaloshinskii-守谷相互作用、 $\propto \mathbf{S}_i \times \mathbf{S}_j$)が強磁性相互作用($\propto \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j$)と競合し、強磁性構造が捻られた状態が現れます。その捻り方向が複数ある場合、すなわち複数の磁気変調にモード間結合がある場合、トポロジカルな磁気構造が周期的に並んだ格子状態が実現します。例えば平面上の3方向の磁気変調(q_1, q_2, q_3)が重なり合うと、スキルミオンが三角格子を組んだスキルミオン格子状態が現れ(図1上段)、互いに垂直に重なり合うとヘッジホッグ格子(3q-ヘッジホッグ格子、図1下段)が形成します。ここでヘッジホッグがもたらす創発磁場分布は中心から湧き出すまたは中心に吸い込まれるような構造であるため、ヘッジホッグ格子は創発磁気モノポール格子のように振舞います。

同じ結晶構造を持つ MnSi と MnGe において全く異なるスピン構造のトポロジーが現れることから、それらの固溶体である $\text{MnSi}_{1-x}\text{Ge}_x$ の特定の組成において劇的なトポロジカル磁気転移が生じることが期待できます。本研究で

は Si と Ge の組成比を変化した一連の $\text{MnSi}_{1-x}\text{Ge}_x$ を合成することにより、スキルミオン格子から創発磁気モノポール格子へと変形する過程を明らかにしました。特に、中間組成($x=0.3-0.6$)においてヘッジホッグ(創発磁気モノポール)と反ヘッジホッグ(反モノポール)が面心立方格子状に配列した新しいトポロジカル磁気構造が現れ、スキルミオン格子とも MnGe のヘッジホッグ格子とも異なる強磁場物性を示すことがわかりました。以下では、強磁場測定によって明らかにできた B20 型化合物 $\text{MnSi}_{1-x}\text{Ge}_x$ におけるトポロジカル磁気構造の変遷と創発磁場応答(トポロジカルホール効果)について紹介したいと思います。

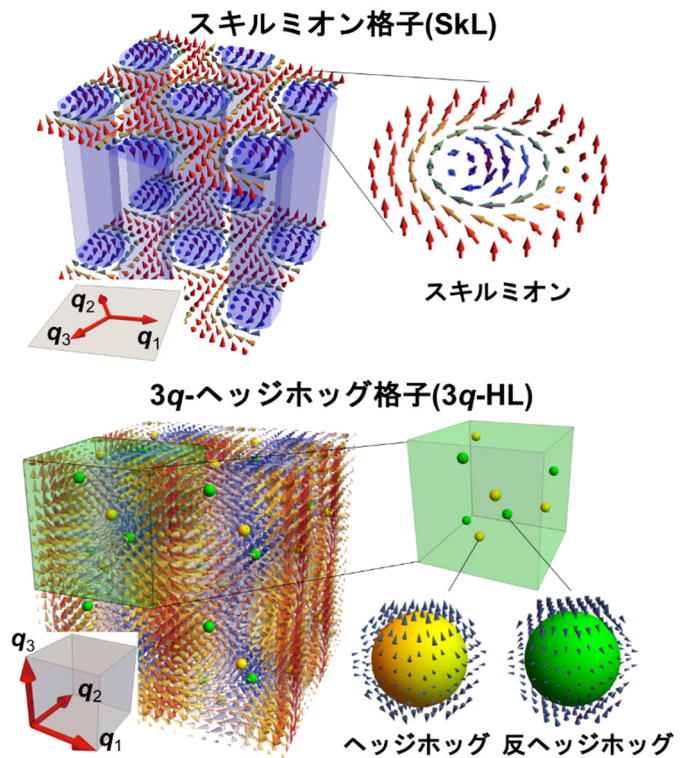


図1: スキルミオン格子(SkL, 上段)と MnGe に現れるヘッジホッグ格子(3q-HL 下段)。共に3つの磁気変調の重ね合わせ状態で記述できるが、それぞれ磁気変調方向が同一平面上であるか(SkL)、互いに直交するか(3q-HL)でスピン構造のトポロジーが異なってくる。

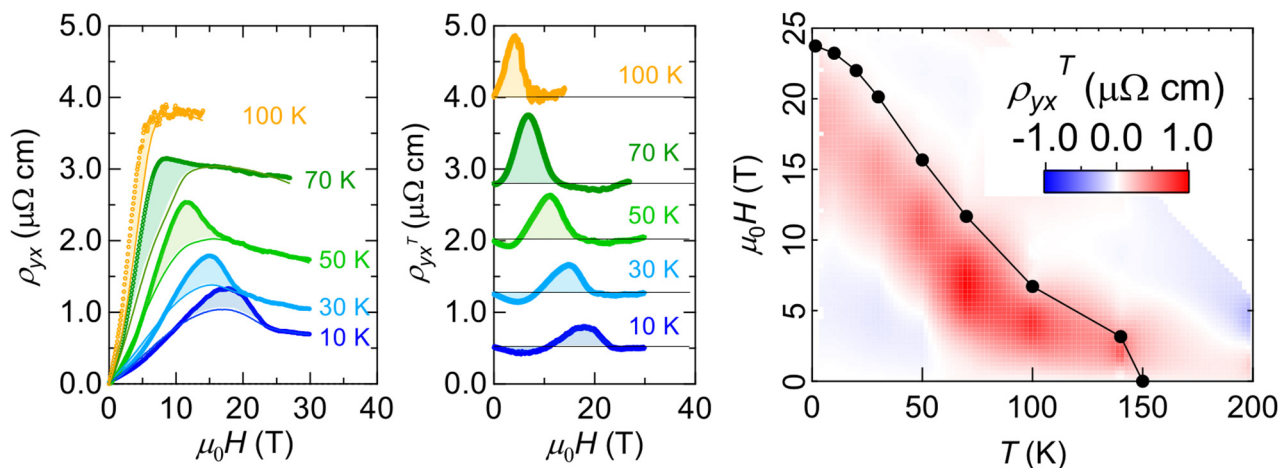


図 3: $\text{MnSi}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x = 0.8$)におけるホール抵抗率(左)、見積もったトポジカルホール抵抗率(中央)、トポジカルホール抵抗率の温度・磁場依存性(右)。100 K以上の温度ではPPMSを用いて測定している。微小なホール抵抗率も高精度で測定できていることを強調したい。

図3左に示した各温度におけるホール抵抗率の磁場依存性を見ると、強磁性転移磁場以下の領域でホール抵抗率が非単調に変化していることが分かり、複雑な創発磁場分布によるトポジカルホール効果の存在が示唆されます。実際に正常・異常ホール効果の寄与を見積もると強磁性状態でホール抵抗率を再現するような曲線となり(図3左の細線)、有限のトポジカルホール効果が観測できました(図3左網掛け、網掛け部分を抜き出した図3中央)。見積もったトポジカル抵抗率を温度-磁場平面にプロットすると、低温低磁場では負の寄与となっているが、常磁性・強磁性転移に近づく高温高磁場において正の寄与へと符号変化しています。この符号変化は磁場や温度によって誘起されたスピン構造のダイナミクス(とそれに伴う創発電磁場)と関連している可能性があり、今後詳細な機構解明が望まれています。

まとめ・展望

キラル磁性体 $\text{MnSi}_{1-x}\text{Ge}_x$ において、スキルミオン格子から異なる2つのヘッジホッグ格子へと多段階に転移する様子を解明しました。SiとGeの組成比制御は格子定数の変化に対応するため、同様に格子定数を変化させる外部圧力によってもスピン構造のトポロジー自体を制御できるかも知れません。一方で磁場によってもスピン構造を解く、すなわちトポジカル磁気転移を引き起こすことが可能で、密に配列したヘッジホッグ格子状態をはじめとして複雑に絡み合った様々なトポジカル磁気構造[7]に対して多角的な強磁場測定の威力が発揮されると期待されます。

謝辞

本研究における強磁場測定は物性研究所国際超強磁場科学研究施設共同利用による成果です。またJSPS 科研費(15H05456, 18K13497)ならびにJST 戦略的創造研究推進事業CREST(JPMJCR16F1)の助成を受けて行われました。

- [1] K. v. Klitzing, G. Dorda, and M. Pepper, *Phys. Rev. Lett.* **45**, 494 (1980).
- [2] 金澤直也, 于秀珍, 賀川史敬, 十倉好紀, 固体物理 **50**, 721 (2015).
- [3] S. Mühlbauer, B. Binz, F. Jonietz, C. Pfleiderer, A. Rosch, A. Neubauer, R. Georgii, and P. Böni, *Science* **323**, 915 (2009).
- [4] X. Z. Yu, Y. Onose, N. Kanazawa, J. H. Park, J. H. Han, Y. Matsui, N. Nagaosa, and Y. Tokura, *Nature* **465**, 901 (2010).
- [5] N. Kanazawa, Y. Nii, X.-X. Zhang, A. S. Mishchenko, G. De Filippis, F. Kagawa, Y. Iwasa, N. Nagaosa, and Y. Tokura, *Nature Commun.* **7**, 11622 (2016).
- [6] Y. Fujishiro, N. Kanazawa, T. Nakajima, X. Z. Yu, K. Ohishi, Y. Kawamura, K. Kakurai, T. Arima, H. Mitamura, A. Miyake, K. Akiba, M. Tokunaga, A. Matsuo, K. Kindo, T. Koretsune, R. Arita, and Y. Tokura, *Nature Commun.* **7**, 11622 (2016).
- [7] P. Sutcliffe, *J. Phys. A: Math. Theor.* **51**, 375401 (2018).