

いうゲージ場(創発磁場)として感じとります。言い換えるとスピン構造は実効的な磁場の源とも考えられ、多種多様なスピン配列を設計できれば物質中に思い通りの強度や分布の磁場を描きだすことができるようになります。そしてMnGeに現れるヘッジホッグ・反ヘッジホッグ構造が発生する創発磁場分布は、磁束量子 $\phi_0 = h/e$ の湧出し・吸込みとなる磁気モノポールのものとなっているという訳です(図2)。

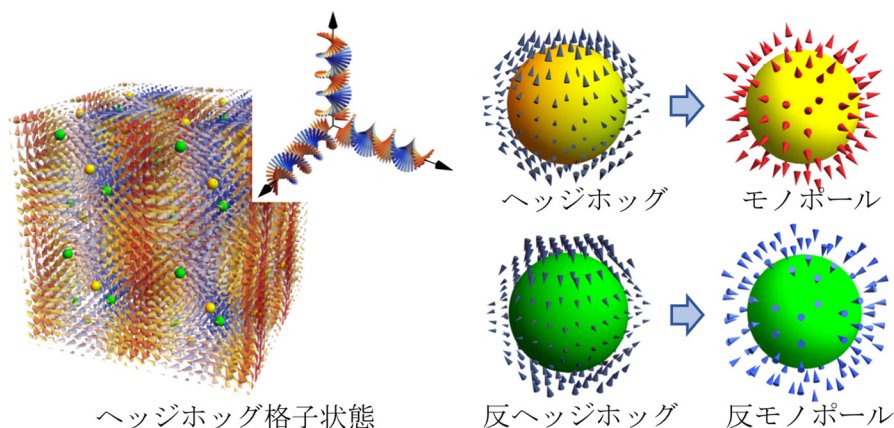


図2: 3つのらせん構造の重ね合わせで表されるヘッジホッグ格子状態(左)とそれに現れるヘッジホッグ(黄色)・反ヘッジホッグ(緑)スピン構造と対応する創発磁場分布(右)。

磁場印加によってヘッジホッグ格子が強磁性状態に転移する場合をトポロジーの観点から考えると、スピン配列を表すトポロジカル数(上記の通りスピンの向きが球面を覆う回数)に不連続変化が必ず生じることがわかります。この場合では、磁場によってヘッジホッグ(トポロジカル数+1)と反ヘッジホッグ(-1)の位置が変位し、最終的に対消滅することで非トポロジカル状態である強磁性状態(0)へと転移します。この磁場印加過程において、ヘッジホッグ・反ヘッジホッグ構造が対消滅直前で大きなゆらぎを示し、それに伴い創発磁場ダイナミクスが誘起されることが理論的に明らかとなり、実験的には数十%にのぼる大きな正の磁気抵抗効果として観測されました[5]。本実験では、

パルス強磁場下(約30 T, 10 ミリ秒幅)における高速かつ高精度抵抗測定によって、創発磁気モノポールゆらぎが低温(10 K以上)かつ強磁場(20 T以上)の極限環境においても存在し、高効率な熱-電気変換効果といった創発電磁機能の堅牢性に寄与していることを明らかにしました[9]。

ゼロ磁場の値で規格化した磁気抵抗効果の測定結果を図3に示します。カラーで示したデータは測定した抵抗率、黒い太線で示したデータは磁化(黒い細線)から見積もった

磁化が揃うことによる従来型の負の磁気抵抗効果をそれぞれ表しています。そして創発磁気モノポールのゆらぎが引き起こす電子散乱、すなわち正の磁気抵抗効果はそれら2つの差分として見積ることができます。その結果、10 K以上の温度では、強磁性転移と考えられる磁場(破線で表した磁化曲線に折れ曲がりに対応する磁場)以上の強磁場においても正の磁気抵抗効果が見られ、温度減少に伴いその効果が急激に抑制されていることがわかりました。これは、強磁場下においても、一部のヘッジホッグ構造が対消滅せず準安定状態として存在している可能性やヘッジホッグ構造といった非共線的なスピン構造が熱的に励起されていることを示唆しています。

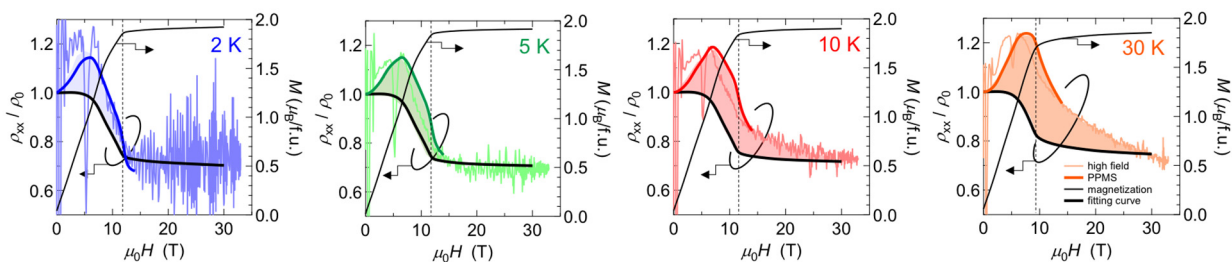


図3: 様々な温度での規格化した磁気抵抗。測定した磁気抵抗(カラー)、磁化(黒細線)、磁化から見積もった従来型の負の磁気抵抗(黒太線)、創発磁気モノポールのゆらぎがもたらす正の磁気抵抗効果(カラー網掛け)。

まとめ・展望

強磁場下での高精度抵抗測定によって、キラル磁性体 MnGe のヘッジホッグ格子状態が生み出す創発磁気モノポール物性が、磁場に対して強く保護されていることを明らかにできました。またこの堅牢性にはヘッジホッグ構造の有するトポロジーの性質が重要な役割を果たしていることがわかりました。現在ではフライホイールを用いた非破壊型長時間パルス(ロングパルス)を用いることで、測定精度を数 $\mu\Omega$ の高分解能まで向上することに成功しており、低抵抗の金属物質中を創発磁場の効果で非散逸的に流れるホール電流も高精度で測定することが可能になりました。この手法を用いることによって、強磁場まで安定なトポロジカル磁気構造がもたらす創発物性の今後の開拓が期待されます。

謝辞

本研究における磁化、磁気抵抗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] C. Castelnovo, R. Moessner and S. L. Sondhi, *Nature* **451**, 42-45 (2008).
- [2] D. I. Khomskii, *Nature Commun.* **5**, 4793 (2014).
- [3] G. Volovik, *J. Phys. C Solid State Phys.* **20**, L83 (1987).
- [4] N. Kanazawa *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 156603 (2011).
- [5] N. Kanazawa *et al.*, *Nature Commun.* **5**, 4793 (2014).
- [6] S. Mühlbauer *et al.*, *Science* **323**, 915-919 (2009).
- [7] X. Z. Yu *et al.*, *Nature* **465**, 901-904 (2010).
- [8] T. Tanigaki *et al.*, *Nano Lett.* **15**, 5438 (2015).
- [9] Y. Fujishiro *et al.*, *Nature Commun.* **9**, 408 (2018).