

## 磁性絶縁体中に創発する非可換ゲージ場と熱ホール効果

川野 雅 敬 (東京大学大学院総合文化研究科 masatakakawano@g.ecc.u-tokyo.ac.jp)

ホール効果は、高校の教科書にも記載されている基本的な現象である。金属や半導体に電流を流し、電流と垂直方向に磁場を印加すると、電子がローレンツ力を受け、電流と直交する方向にも電圧が発生する。この一見単純な現象は、基礎面では電子の密度や有効質量を調べる強力な手法を与え、応用面ではセンサーとして多くの電子機器に組み込まれるなど、物質科学や電子工学の基礎を支える重要な概念となっている。

2010年代以降、このホール効果の概念を磁性絶縁体中の**マグノン**にも拡張する研究が盛んに行われている。マグノンとは、スピンの集団的な歳差運動を記述する準粒子であり、電子の代わりに熱やスピンを運ぶ。マグノンは電荷を持たないためジュール熱によるエネルギー損失がなく、省電力デバイスへの応用が期待されている。しかし、電荷を持たないという性質は同時に制約でもあり、磁場を印加してもローレンツ力を受けない。ではマグノンはホール効果を示さないのかというと、実はそうではない。仮想的な磁場—創発磁場—がマグノンの運動を曲げ、**熱ホール効果**をもたらす。

この創発磁場の起源は何であろうか？磁性絶縁体では、スピン間相互作用や磁性スピンの配置に依存して、マグノンが系を伝搬する際に波動関数がしばしば位相を獲得する。電子が磁場中を伝搬する際に位相を獲得するアハラノフ-ボーム効果を思い出すと、これはマグノンに作用する仮想的な磁場が生じているとみなすことができる。

しかし、創発磁場の存在が直ちにマグノン熱ホール効果をもたらすわけではない。波動関数の獲得する位相が複素数の因子で表される従来の枠組みでは、マグノン熱ホール効果の発現は格子構造により強く制限される。特に正方格子や三角格子といった**辺共有格子**では、格子の対称性により創発磁場の効果が打ち消し合ってしまう、マグノン熱ホール効果が禁止される、いわゆる

no-go 条件が存在する。この no-go 条件はマグノン熱ホール効果探索の大きな障壁となっており、これまでの多くの実験的観測はカゴメ格子やパイロクロア格子などの**角共有格子**に限られてきた。

我々はこの no-go 条件を迂回する新たな機構として、マグノンの内部自由度に由来する非可換ゲージ場描像を提案した。マグノンの内部自由度は、典型的には反強磁性絶縁体の副格子自由度から生じる。そこでマグノンの波動関数が獲得する位相は、従来の複素数(可換ゲージ場)ではなく、内部自由度を反映して行列(非可換ゲージ場)で表される。行列同士は一般に非可換であるため、例えば  $x$  方向に進んで  $y$  方向に進む経路と、 $y$  方向に進んで  $x$  方向に進む経路で獲得する位相が異なる状況が実現する。我々はこの経路依存の位相が付加的な創発磁場をもたらす、no-go 条件の対象であった**辺共有格子**においてもマグノン熱ホール効果をもたらすことを明らかにした。

我々は具体例として、スピネル化合物  $\text{MnSc}_2\text{S}_4$  の低温磁場中に現れる**反強磁性スカーミオン結晶**相を取り上げた。この物質では、[111]面において磁性イオンが三角格子を組むため、no-go 条件により従来の描像による熱ホール効果は期待できない。我々は、三角格子上の反強磁性スカーミオン結晶相における低エネルギー励起が  $\text{SU}(3)$  ゲージ場 ( $3 \times 3$  行列) と結合するマグノンで実効的に記述されること、そしてトポロジカルに非自明なスピン構造により  $\text{SU}(3)$  ゲージ場が実際に非可換となり、マグノン熱ホール効果が生じることを示した。我々の理論は  $\text{MnSc}_2\text{S}_4$  で観測された熱ホール効果の起源をよく説明する。

この成果は、これまでマグノン熱ホール効果が期待されてこなかった格子系にも光をあて、今後の省電力デバイスの設計指針やスピン流制御技術のさらなる開拓に向けた重要な一歩となると期待される。

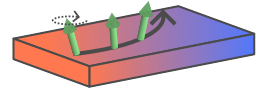
## 用語解説

## マグノン：

磁性絶縁体において、スピンの歳差運動が波として伝搬する励起状態を量子化した準粒子。熱やスピンは運ぶが、電荷は運ばない。

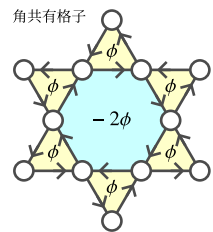
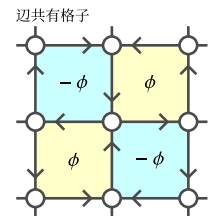
## 熱ホール効果：

温度勾配を加えたとき、それと垂直方向にも熱流が生じる現象。特にマグノンなどの電荷中性準粒子が熱を運ぶ場合、準粒子に作用する創発磁場がその起源となる。



## 辺共有(角共有)格子：

三角形、四角形などの基本ユニットが辺(角)を共有する格子構造。辺共有格子においては、従来の機構で生じた創発磁場の効果は対称性により相殺され、熱ホール効果に寄与しない。



## 反強磁性スカーミオン結晶：

三角格子反強磁性体などで安定化するトポロジカルに非自明なスピン配列。三つある各々の副格子上で強磁性スカーミオン結晶(渦状のスピン構造)を形成し、それらが局所的に反強磁性結合している。