

磁性ワイル半金属におけるカイラルゲージ場に起因したトポロジカル電磁応答

[1] 要旨

ワイル半金属は、古典電磁気学を超えた電磁応答を示すトポロジカル物質の一つであり、基礎研究のみならず、スピントロニクス機能性の観点からも注目されている。仮想的なゲージ場「カイラルゲージ場」を用いてワイル半金属の電磁応答を記述する試みがあるが、磁性ワイル半金属ではその構造に関する知見は限られていた。本論文は、巨大なスピン分極を持つ磁性ワイル半金属 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ に着目し、磁気構造とカイラルゲージ場描像の対応関係を有効模型に基づき示している。これにより、磁性ワイル半金属における磁気構造に関連した様々な電磁応答の探索が期待される。

[2] 本文

代表的なトポロジカル物質であるワイル半金属は、価電子帯と伝導帯が点状で接するワイル点を有し、その周囲で線形の分散関係を持つバンド構造によって特徴づけられる。ワイル点周囲の準粒子励起は質量を持たない相対論的粒子である「ワイル電子」として記述され、その性質に由来して古典電磁気学の枠組みでは記述できない異常ホール効果などのトポロジカル電磁応答が現れる。このような非自明な電磁応答を記述するための概念として、「カイラルゲージ場」が存在する。これは通常の電磁場に対応する $U(1)$ ゲージ場とは異なり、ワイル電子の種類 (カイラリティ：右巻き/左巻き) に応じて異なる符号で結合するゲージ場として導入される。カイラルゲージ場は元来、相対論的量子力学の枠組みで導入された仮想的なゲージ場であるが、ワイル半金属中では他自由度との相互作用によるワイル点位置の波数空間内のシフトをカイラルゲージ場に対応付けられる。例えば、格子歪み、化学置換、円偏光照射などの摂動がワイル点位置のシフトを生み出し、カイラルゲージ場を与えられている。カイラルゲージ場の概念を用いることにより、これらの摂動の効果をあたかも通常の電磁場のように取り扱うことが可能となり、ワイル電子の様々な電磁応答を統一的に理解することができる。

磁性を持つワイル半金属では、ワイル点構造は磁気秩序に由来するため、磁気秩序が変調される場合の効果もカイラルゲージ場として記述できると期待される。特に、スピンと運動量方向が常に平行または反平行となる「スピン運動量ロッキング」と呼ばれる性質を仮定したモデルでは、磁化の方向とカイラルゲージ場が一对一对応する。そのため、カイラルゲージ場描像に基づき、磁気構造や磁化ダイナミクスに関連した様々なトポロジカル電磁応答が提案されており、この性質を利用したスピントロニクス機能性の創出に期待が持たれている。一方で実際の磁性ワイル半金属においては、スピン運動量ロッキングの存在はスピン軌道相互作用とスピン分裂 (交換相互作用の強さ) の競合により決まる。そのため、磁気秩序とカイラルゲージ場が対応付けられるかは各物質に強く依存し、トポロジカル電磁応答に関する知見も限られていた。

最近、東京大学物性研究所、日本原子力研究開発機構、および九州大学理学研究院による共同研究グループは、代表的な磁性ワイル半金属である $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ の有効模型を用いて、磁気秩序とカイラルゲージ場の対応関係を調べた。この物質は、フェルミ準位近傍で巨大なスピン分極を有する強磁性体であり、ワイル点周囲では上述のスピン運動量ロッキングの構造を持たない。本研究では、磁化方向の変調に対しワイル点は波数空間において連続的かつ急峻に移動することを提示し、巨大なスピン分極の下でもカイラルゲージ場描像を適用できることを明らかにした。この描像に基づき、磁気構造のダイナミクスに起因するトポロジカル電磁応答効果を提示した。この成果は *JPSJ* の 2024 年 9 月号に掲載された。

導入した $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ の強束縛模型は、Co からなるカゴメ格子と Sn からなる三角格子から構成され、ワイル点構造や異常ホール伝導率などの物性を簡潔に記述する模型である。図 1(a)は、磁気モーメントの角度を面直強磁性状態に対応する 0° から、磁化方向が逆転する 180° まで変化させた際の、波数空間におけるワイル点の軌跡を示している。ここで、ワイル点の色はカイラリティを示しており、カイラリティに依存したワイル点の移動、つまりカイラルゲージ場が現れることを示している。この磁化角度

とカイラルゲージ場の関係を用いて、非一様な磁気構造がある場合の有効磁場（カイラル磁場）の空間構造を得ることができる。図 1(b) は、ネール型磁壁を考慮した際のカイラル磁場の空間構造を示している。Co₃Sn₂S₂ の結晶構造に由来して、非対称なカイラル磁場の構造が現れ、その強度は 10nm 程度の磁壁幅で 260T にも達する。このような巨大なカイラル磁場のもとでは、ワイル電子に対してランダウ量子化が発現し、トポロジカル電磁応答への寄与が顕在化する。更に、磁場やスピントルクなどの外力によって磁壁構造が時間変化する場合は、その効果はカイラルゲージ場の時間変化、すなわちカイラル電場として働く。このカイラル電場・磁場により量子ホール効果が誘起され、そのホール電圧は磁壁の移動方向に現れる。この現象は、通常の磁性金属中の磁気構造ダイナミクスに由来して現れる電圧「スピン起電力」に類似している一方、誘起される電圧の大きさは通常のスピン起電力の 800 倍にも達することが示された。これは Co₃Sn₂S₂ のワイル点構造を反映するものであり、磁気メモリ等のスピントロニクスデバイス中での磁壁移動の検出に役立つ可能性がある。

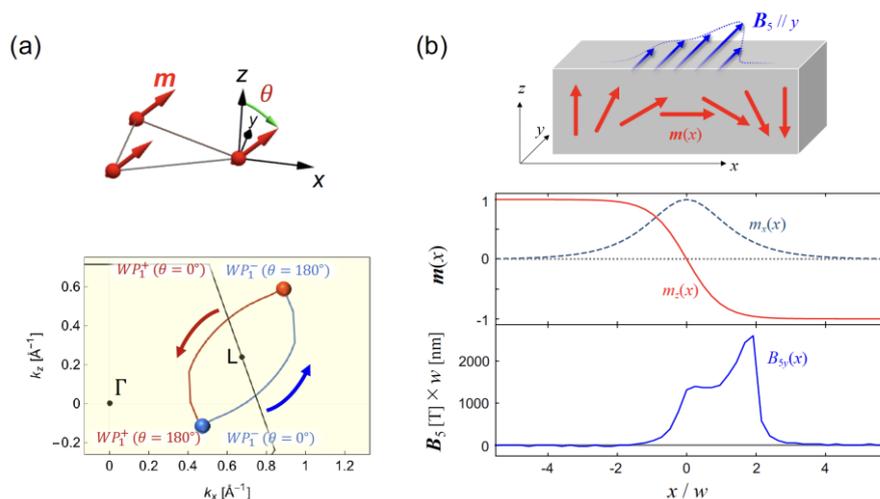


図 1. (a) 磁化方向（方位角 θ ）を変化させた際に波数空間におけるワイル点が描く軌跡。(b) ネール型磁壁 $m(x)$ (磁壁幅 w) を考慮した際のカイラル磁場 B_5 の空間構造。

本研究では磁気構造に対するカイラルゲージ場描像を適用することにより、現実的な磁性ワイル半金属における磁気構造と電子輸送の協奏効果の具体例が得られた。今回得られたカイラルゲージ場の知見に基づき、ワイル半金属における新たなトポロジカル電磁応答の探索が進展することが期待できる。

原論文（2024年8月9日公開済）

Chiral Gauge Field in Fully Spin-Polarized Weyl Semimetal with Magnetic Domain Walls

Akihiro Ozawa, Yasufumi Araki, and Kentaro Nomura, J. Phys. Soc. Jpn. **93**, 094704 (2024).

< 情報提供 :

小沢耀弘（東京大学物性研究所）

荒木康史（日本原子力研究開発機構）

野村健太郎（九州大学理学研究院）>