

# 量子異常を伴う有機ディラック半金属

## [1] 要旨

量子異常の物理および関連する現象は、素粒子・宇宙物理学分野での研究対象とされてきたが、近年トポロジカル物質においても見出され、物質系にも存在する普遍的な現象であることが明らかになってきた。量子異常はカイラル対称性が破れた3次元系に存在する。ところが最近、擬2次元有機ディラック半金属 $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>の低温領域で量子異常に関する電磁輸送現象が発見され注目を集めている。これまでのトポロジカル物質とは異なり、この系のスピン軌道相互作用は無視でき、強い電子相関効果によりカイラル対称性が破れていることも特徴であり、量子異常の物理の新たな展開が期待されている。

## [2] 本文

古典論では成り立っている保存則が、量子力学では破れてしまう場合がある。この不思議な保存則の破綻は量子異常と呼ばれ、古くから素粒子物理学や宇宙物理学の研究対象になっていた。近年、この量子異常の物理および関連する現象がトポロジカル物質においても見出され、物質系にも存在する普遍的な現象であることが明らかになってきた。

量子異常はディラック/ワイル点近傍における低エネルギーの物理であるため、いろいろな外場をパラメーターとして、量子異常に関する新しい物理を探索できるトポロジカル物質は格好の試験場である。量子異常効果の特徴的な現象に、散逸を伴わない輸送現象（負の磁気抵抗効果など）、プレーナーホール効果、異常ホール効果などの巨大応答がある。また、ディラック/ワイル電子の易動度は極めて高い。そのため、サイズが微小で消費電力が少なく、高速に作動するデバイスへの応用面でも活発な研究がなされている。

このような量子異常の存在には、カイラル対称性の破れが重要な役割を担うが、もう1つ重要な要素に電子が運動する空間の次元性がある。場の量子論によると、量子異常は3次元系には存在するが2次元系には存在しないのである。通常、ディラック/ワイル半金属は2次元系か3次元系に分けられ、両者を繋ぐ候補物質はこれまで発見されていなかった。量子異常効果の物理の本質に迫るには2次元系から3次元系へと次元を制御できるような、カイラル対称性が破れたディラック/ワイル電子系の物質を発見・創成することが喫緊の課題となっていた。

最近、東邦大学、京都大学、愛媛大学、理研のメンバーで構成した研究グループは、多層構造をした有機導体 $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>の高圧力下において、高温では2次元ディラック電子系だが、層間トンネリングがコヒーレントとなる低温領域でカイラル対称性が破れた3次元ディラック半金属が実現していることを実験的に明らかにした。低温で、量子異常効果に伴う散逸を伴わない負の磁気抵抗効果とプレーナーホール効果を検出したのである。この成果はJPSJの2023年12月号に掲載された。

高圧下にある有機導体 $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>（図1(a)）は世界で最初のバルクな（多層状の）質量ゼロのディラック電子系である。これまで、この系の（量子）輸送現象や熱力学的性質は質量ゼロの2次元ディラック電子系の描像で理解されてきた。ところが最近、低温の層間磁気抵抗効果は層間トンネリングがコヒーレントであることを示し、実際に森成による理論計算から3次元ディラック半金属状態にあることが示唆された。重要なことは、電子相関効果によりこの系の時間反転対称性と

空間反転対称性が共に破れていることである。このようにカイラル対称性が破れたディラック/ワイル電子系は、波動関数のトポロジーを起源として、2つのディラック/ワイル点 ( $K, K'$ ) にN極とS極に相当する「磁気単極子」(合わせて「磁気双極子」)を形成する(図1(b))。

本研究の成果として、この系のディラック点から発生する仮想的な磁場(ベリー曲率という)がもたらす負の磁気抵抗効果とプレーナーホール効果を低温で検出され(図2)、多くの研究者の注目を集めている。固体中で起きる量子異常の物理は、基礎研究だけでなく応用面からも重要視されており、今後の研究の展開が期待される。

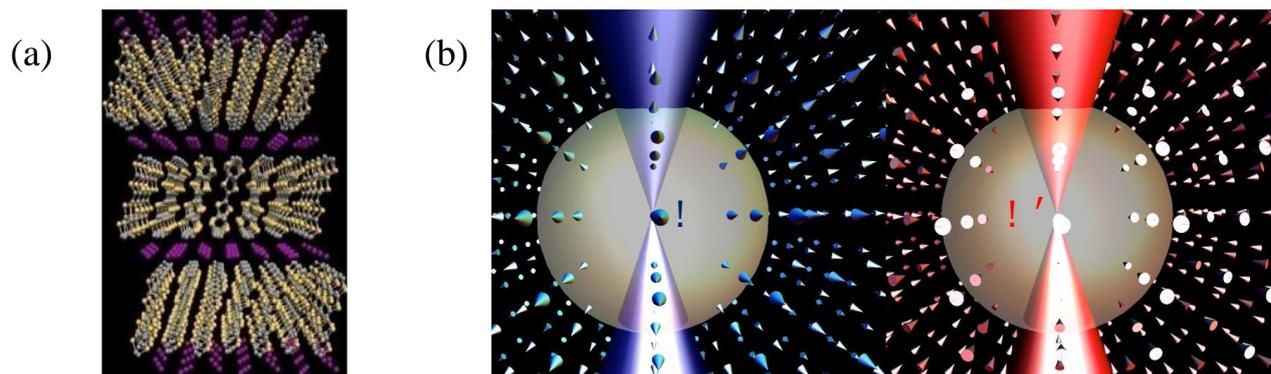


図1 有機導体 $\alpha$ -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ の結晶構造。(b) ディラック点 ( $K, K'$ ) におけるベリー曲率(仮想磁場)のイメージ図。

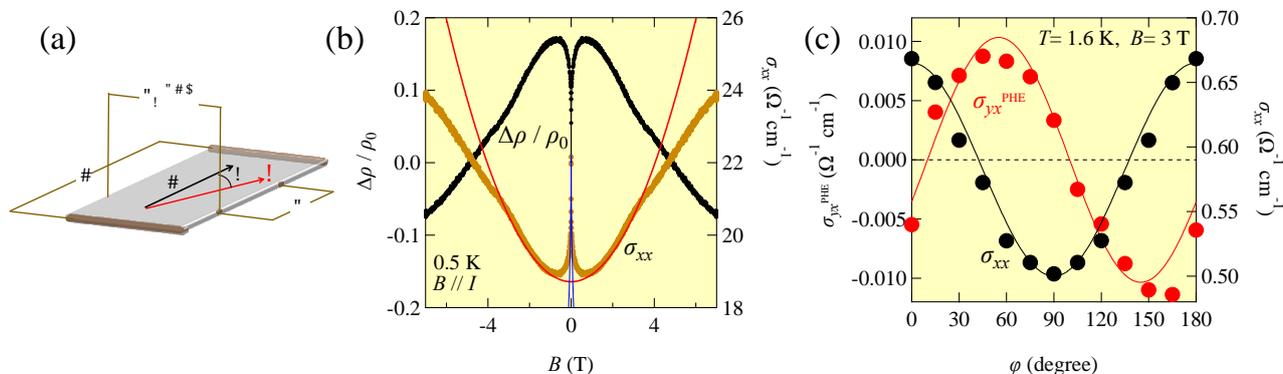


図2 (a) 磁気抵抗効果とプレーナーホール効果測定の概略図。(b) 0.5 Kにおける縦磁気抵抗の磁場依存性。(c) 1.6 K,の低温 3 Tの磁場下における磁気抵抗効果とプレーナーホール効果の2次元面内磁場方位依存性。量子異常効果により、伝導度は $\sigma_{xx} = \sigma_0 + \Delta\sigma \cos^2 \phi$ 、プレーナーホール伝導度は $\sigma_{yx}^{\text{PHE}} = \frac{\Delta\sigma}{2} \sin 2\phi$ で表される。ここで、 $\sigma_0$ はゼロ磁場における伝導度、また $\Delta\sigma \propto B^2$ である。

原論文(2023年11月21日公開済)

### Evidence for Three-Dimensional Dirac Semimetal State in Strongly Correlated Organic Quasi-Two-Dimensional Material

N. Tajima, Y. Kawasugi, T. Morinari, R. Oka, T. Naito, and R. Kato, J. Phys. Soc. Jpn. **92**, 123702 (2023).

< 情報提供 : 田嶋 尚也 (東邦大学理学部) >