

有機ディラック電子系における多様なトポロジカル相



長田 俊人

東京大学大学院工学系研究科
osada@issp.u-tokyo.ac.jp

炭素の二次元結晶であるグラフェンで「質量のない (massless)」二次元**ディラック電子系**が 2005 年に実証され、これを表す模型に交番磁束やスピン軌道結合 (SOC) を導入することで、二次元**チャーン絶縁体** (CI) や二次元**トポロジカル絶縁体** (TI) が理論的に発見された。これらの成果を契機として、二次元物質や固体中ディラック電子、トポロジカル絶縁体・半金属といった新概念に関する実験的・理論的研究が爆発的に発展して現在に至っている。確立したと思われていたバンド物理に、このような飛躍的発展の余地が残されていたことは驚くべきことである。

導電性の分子性結晶である有機導体において、ディラック物性やトポロジカル物性を実現することは困難であると考えられてきた。結晶対称性が低く、バンド幅が狭く、SOC が小さい有機導体では、バンドの交差や反転が生じにくいと考えられるためである。しかし 2006 年にグラフェンに次いで固体中で 2 番目となる二次元 massless ディラック電子系が、 α 型有機導体 α -(ET)₂I₃ (ET は BEDT-TTF の略称、 α は結晶構造の指標) で発見された。本系の研究は、当初は有機導体分野の中で独自に進展していたが、近年 α -(ET)₂I₃ や類縁物質 α -(BETS)₂I₃ において、二次元物質や無機三次元トポロジカル系と共通する種々の現象が観測され、分野を超えた一般的視点から研究されるようになってきた。ここではその例を紹介する。

α 型有機導体はバルク層状結晶であるが、理論研究では通常、層間結合を無視して二次元系として扱われる。強束縛模型により、傾斜した線形分散を持つ二次元 massless ディラック電子系が再現される。これは高压下の α -(ET)₂I₃ に対応する。また面

内 SOC を導入すると二次元 TI 相となり、常圧下の α -(BETS)₂I₃ に対応すると考えられる。

二次元 massless ディラック電子系は、磁場中で離散的ランダウ準位に量子化されるが、スピンとバレー (波数空間内のディラック点位置) について縮退した最低次ランダウ準位が常にディラック点に現れるという顕著な特徴を持つ。この性質は指数 $\pm 2, \pm 6, \pm 10, \dots$ の**量子ホール効果**を導く。グラフェンでは、縮退が解けた指数 0 や ± 1 の量子ホール効果も加えて観測され、その機構と電子状態が議論されてきた。 α 型有機導体においても、指数 1 の量子ホール効果が観測されたが、これは交換相互作用による最低次ランダウ準位の自発的バレー分裂に起因する量子ホール状態で、そこでは空間反転対称性が破れ、電荷・スピン密度の空間変調が生ずると理解されている。

二次元系として振舞うバルク層状結晶では、層間結合が温度に対して無視できなくなる低温領域において、三次元系の性質が顕在化する。 α 型有機導体では、 α -(ET)₂I₃ において低温で三次元**ディラック半金属**または**ワイル半金属**を示唆する磁気伝導現象が観測され、 α -(BETS)₂I₃ では「強い TI」を示唆する全表面伝導が報告されており、単純な層間結合に基づく予測を覆した。I₃ イオン電場による層間 SOC を考慮すると、 α -(ET)₂I₃ はディラック半金属となって実験結果を説明できる一方、 α -(BETS)₂I₃ は「弱い TI」となり、実験結果の説明には何らかのトポロジカル転移が必要になる。

α 型有機導体は、単一物質系で多様なトポロジカル相や伝導現象を実現できる系であり、トポロジカル物性を探求する上で有用なプラットフォームであるといえる。

——用語解説——

ディラック電子:

相対論的量子力学のディラック方程式に似た方程式で記述される結晶内電子。質量のない (massless) ディラック電子は一定群速度で運動し、円錐状の伝導帯と価電子帯が頂点で接触する線形分散を示す。

チャーン絶縁体:

一方向に電流を運ぶ金属的なカイラル表面状態を持つ時間反転対称性のない絶縁体。

トポロジカル絶縁体:

スピン毎に異なる向きに電流を運ぶ金属的なヘリカル表面状態を持つ絶縁体。三次元では、表面状態が全表面に現れる強いトポロジカル絶縁体と、側面のみに現れる弱いトポロジカル絶縁体に分かれる。

量子ホール効果:

二次元電子系のホール伝導度が e^2/h の整数倍に量子化される効果。

ディラック半金属:

時間および空間反転対称性があるときに実現する三次元トポロジカル半金属。スピン縮退した円錐状の伝導帯と価電子帯が点接触するディラック点を持ち、縮退バンドのバレー曲率の和は相殺するが、磁場中でカイラル磁気効果が現れる。

ワイル半金属:

時間または空間反転対称性がないときに実現する三次元トポロジカル半金属。円錐状の伝導帯と価電子帯が点接触するワイル点近傍で有限のバレー曲率の和は相殺するが、磁場方向にトポロジカルな電流が生じるカイラル磁気効果を示す。