

有機ディラック電子系における非線形トポロジカル輸送現象

長田 俊人 〈東京大学物性研究所 osada@issp.u-tokyo.ac.jp〉

アンディカ・キスワンディ 〈東京大学物性研究所 kiswandhi@issp.u-tokyo.ac.jp〉

ホール効果は、磁場中で物質に電流を流したとき磁場と電流に直交する方向に起電力が発生する現象で、電子が磁場から受けるローレンツ力により説明される。一方、磁性体でみられる異常ホール効果は外部磁場に比例しないホール効果で、ゼロ磁場でもホール起電力が残ることが特徴である。これは磁性体内の自発磁化によるホール効果と解釈され、時間反転対称性をもたない、異常ホール効果の微視的起源として、近年バンド構造のトポロジーに関係した内因性機構が注目されるようになった。

バンド構造のトポロジーは、バンド n の波数 \mathbf{k} におけるベリー曲率 $\Omega_n(\mathbf{k})$ で表現される。時間反転対称性のある系では $\Omega_n(\mathbf{k})$ は \mathbf{k} の奇関数、空間反転対称性のある系では偶関数となる。磁場がなく $\Omega_n(\mathbf{k})$ が有限の場合、電子波束の群速度には、異常速度 $(e/\hbar)\mathbf{E} \times \Omega_n(\mathbf{k})$ が加わる。熱平衡状態で占有状態についての $\Omega_n(\mathbf{k})$ の和が有限ならば、異常速度によりゼロ磁場でも電場 \mathbf{E} に直交するホール電流が生ずる。この内因性異常ホール効果は波動関数の断熱的変形により電流が運ばれるトポロジカル輸送現象の一種である。異常ホール効果の発生には時間反転対称性が破れ、 $\Omega_n(\mathbf{k})$ の和が有限に残ることが必要である。

しかし非磁性で時間反転対称な系でも、電流を流した非平衡定常状態ならば異常ホール効果が非線形現象として現れる可能性がある。これは2015年にSodemannとFuにより議論された。空間反転対称性が破れ $\Omega_n(\mathbf{k})$ が有限となった系に電流を流して非平衡定常状態にすると、電子分布がずれるために、 $\Omega_n(\mathbf{k})$ の占有状態につい

ての和が消えずに残る場合がある。これは系のベリー曲率双極子が有限になる場合で、このとき電流に対する2次の応答として非線形異常ホール効果が起こる。

本研究では2次元ディラック電子系として知られる非磁性の層状有機導体 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ を用いて電流誘起の非線形トポロジカル輸送現象を探索した。まず圧力誘起の電荷秩序-ディラック半金属転移直下の「弱い電荷秩序状態」が、空間反転対称性が破れてギャップが開いた2次元massiveディラック電子系であることを、層間磁気抵抗の温度依存性の実験により確認した。これはベリー曲率双極子をもつ最も単純な系で、電流誘起効果を研究するうえで最適の舞台を提供する。次に非平衡分布が2つの傾斜したディラックコーン間の $\Omega_n(\mathbf{k})$ の相殺を破り非線形異常ホール効果を誘起すること、それはディラックコーンの傾斜方向に関係した面内異方性を示すこと、電流を反転してもHall電場は反転しない整流性を示すことなどを議論した。また非線形異常ホール効果の熱電アナロジーとして、ホール起電力に比例した横温度勾配が電流誘起される「非線形異常Ettingshausen効果」を提案した。そしてこれらが現実の α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ において観測可能であることを定量的に見積もった。最後に α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ の弱い電荷秩序状態において伝導測定を行い、電流の自乗に比例する異常ホール電圧やその面内異方性などから、非線形異常ホール効果の発現を確認した。これは有機導体におけるベリー曲率由来のトポロジカル輸送現象の最初の観測である。

用語解説

ベリー曲率：

波数空間の微小な閉曲線に沿って \mathbf{k} を一周させると、ブロッホ関数の周期関数部分 $u_{nk}(\mathbf{r})$ に余分な位相(ベリー位相)がつく。これを閉曲線が囲む面積で割ったものがベリー曲率 $\Omega_n(\mathbf{k})$ (の閉曲線が囲む面の法線成分)である。 $\Omega_n(\mathbf{k})$ は波数空間における仮想磁場として働く。

異常速度：

電場によりブロッホ波束が波数空間を移動したとき波束が掃引した領域にベリー曲率 $\Omega_n(\mathbf{k})$ があると、波束の成分波間に位相差が生じ、その群速度に $(e/\hbar)\mathbf{E} \times \Omega_n(\mathbf{k})$ の補正が加わる。これを異常速度という。

ベリー曲率双極子：

系に定常電流を流すと、電子分布が波数空間で $\Delta\mathbf{k}$ だけシフトした非平衡状態となる。このとき $\Delta\mathbf{k}$ に対し、占有状態についてのベリー曲率 $\Omega_n(\mathbf{k})$ の総和がどれだけ変化するかを表すテンソル量がベリー曲率双極子である。

非線形異常ホール効果：

ベリー曲率双極子が有限の系に電流を流して非平衡状態を作ると、占有状態についてのベリー曲率 $\Omega_n(\mathbf{k})$ の総和が有限となり時間反転対称性があっても異常ホール効果が現れる。これを非線形異常ホール効果という。