

ディラック電子系の時間分解 ARPES

東京大学物性研究所 石田行章

フェムト秒域パルスレーザーを ARPES の光源に用いることでポンプ・プローブ型の超高速時間分解 ARPES (TARPES) が可能となり、物質の表層における光現象を解明するツールとして認知されつつある。トポロジカル絶縁体やディラック電子系物質についての最近の研究を紹介する。

① 非占有側バンド分散の直接観測

トポロジーの概念を用いて絶縁体（半金属まで含む）を 2 種類に分類できることが 2008 年に実証された。固体波動関数の大域的な構造に“ひねり”が定義できて、ひねりが入っているものがトポロジカル絶縁体 (TI)、そうでないものが普通の絶縁体に分類される。TI の特徴として、バルクのバンドギャップを差し渡す形で表面にスピン偏極したディラック型分散が現れる。この特異な表面分散を捉えることで、TI か否かを判定する研究が広く行われてきた。

TI の判定ためには、バンドギャップを差し渡すディラック分散を非占有側まで見る必要が生じる場合がある。ここに TARPES を活用した。電子を非占有側に分布させた瞬間をプローブすれば通常の ARPES では見ることのできない非占有側のバンドも観測できる。TARPES を用いて V 族単体半金属のうち調べのついていなかったヒ素を TI と同定し [Zhang *et al.*, PRL **118**, 046802 (2017)]、TI である $\text{Bi}_{1.5}\text{Sb}_{0.5}\text{Te}_{1.7}\text{Se}_{1.3}$ のバンド構造の全貌を明らかにした [Kim *et al.*, PRL **112**, 136802 (2014)]。

TI の表面に特異な状態が現れるのと同様に、ワイル半金属の表面にはフェルミアーク状態が出現する。この表面状態を捉えることで $(\text{Mo,W})\text{Te}_2$ [Belopolski *et al.*, Nature Commun. **7**, 13643 (2016)] と TaIrTe_4 [Belopolski *et al.*, Nature Commun. accepted] を II 型のワイル半金属に帰属した。

② トポロジカル絶縁体表面における光機能の創出

トポロジーによる絶縁体の分類が進むにつれて、バルクの絶縁性の高い TI も得られるようになってきた。高絶縁性 TI の表面に光起電力 (SPV) が生じることを世界に先駆けて見出した [Ishida *et al.*, Sci. Rep. **5**, 8160 (2015)]。SPV は表層にバンド湾曲が発達するときに生じる。表面ディラック電子と表層バンド湾曲の共存を利用して、TI 表面にスピン偏極電流を光で誘起する新機能を提案した。この機能創成に向けて、巨大 (~ 0.1 V) SPV [Neupane *et al.*, PRL **115**, 116801 (2015)] および表面電流の方向を制御するのに必須となる両極性 SPV を実証した [Yoshikawa *et al.*, submitted]。

③ ディラック電子系のダイナミクス

ディラック電子系物質の高光強度下の光学特性が非常に注目されている。ディラックコーンはあらゆる色の光を吸収することができる。この性質を利用してあらゆる色のレーザーをフェムト秒域パルスに変えることが実証されている (Bonaccorso *et al.*, Nature Photon. >3500 cites)。さらにディラックコーンの中で反転分布を実現できれば、あらゆる色でのレーザー発振への道も開ける。

ディラック電子系の光励起現象を基礎付けることを念頭に、キャリアダイナミクスの研究を進めてきた。層状ディラック系において 2 温度モデルによる理解ができる場合があること (SrMnBi_2 [Ishida *et al.*, PRB **93**, 100302(R) (2016)])、その一方で多くの場合にこのモデルが破綻することが判ってきた (Graphite [Ishida *et al.*, Sci. Rep. **1**, 64 (2011)]等)。また TI である Sb_2Te_3 の表面ディラック分散において反転分布が 3 ps 持続することを見出した [Zhu *et al.*, Sci. Rep. **5**, 13213 (2015)]。

TARPES 測定は物性研究所辛研の装置 [Ishida *et al.*, RSI **85**, 123904 (2014)] を用いて行われた。本研究は広島大木村研、Princeton 大 Hasan 研、茨城大伊賀研、東京大石渡研との共同研究です。