

# 高分解能マイクロ ARPES 装置の建設と 反強磁性トポロジカル物質における電子構造の研究

東北大学理学研究科物理学専攻 本間飛鳥

反強磁性トポロジカル絶縁体 (AF TI) は、2010 年に提案された新しい物質相であるが、その Dirac 電子状態は未解明であった。本研究では、AF ドメインを分離可能な空間分解能約  $10\ \mu\text{m}$  のマイクロ集光角度分解光電子分光 (マイクロ ARPES) 装置を建設し、AF TI 候補物質 NdBi および GdBi のドメイン依存 Dirac 電子状態を直接観測した。さらに、NdSb のマイクロ ARPES 測定を行い、磁気秩序由来の特異な表面状態の起源を明らかにした。

マイクロ ARPES 装置の建設は高エネルギー加速器研究機構 Photon Factory BL-28A において行い、微小集光を達成するために、ARPES 装置の直前に K-B ミラーを設置して調整を行った。光電子の空間走査を行うために、高精度試料マニピュレーターを製作し、光電子分光装置と連動した制御システムを開発した。光学系の調整の結果、試料上でスポットサイズを  $10\times 12\ \mu\text{m}^2$  まで集光することに成功し、建設した装置がドメイン分割測定に極めて有効であると結論した[1]。

NdBi および GdBi の AF TI としての性質を、マイクロ ARPES を用いて系統的に調査した。両物質は NaCl 型結晶構造を有するが、NdBi は type-I、GdBi は type-II の異なる AF 秩序を示し、磁気秩序の違いが Dirac 電子状態に与える影響を直接比較できる。AF 相のマイクロ ARPES 測定により、NdBi では 2 つの AF ドメインが共存し、一方では  $125\ \text{meV}$  の Dirac ギャップが開くのに対し、他方ではギャップレスな Dirac 分散が現れることを見出した。また、type-II AF 秩序を示す GdBi では、ドメインの違いに由来した 2 種類の  $2\times 1$  のフェルミ面折り返しの観測に成功し、両 AF ドメインにおいてギャップレスな Dirac 電子状態が実現していることを見出した。対称性解析の結果、両者の Dirac 電子状態が複合対称性  $S = \Theta T_D$  ( $\Theta$ : 時間反転、 $T_D$ : 並進) によって保護されると結論した[2,3]。

NdBi では、AF 秩序の形成により、従来の Rashba 型や Zeeman 型とは異なるバンド分散を持つフェルミアーク状の表面状態が出現し、その起源の解明が課題となっている。この状態のトポロジカル性を調べるため、トポロジカルに自明な電子状態を有する NdSb に対して ARPES 測定を行った。NdSb の AF 相においてマイクロ ARPES 測定を行い、AF ドメインを分離して観測した結果、常磁性相では存在しない複数の表面状態が現れることを見出した。また、分裂の起源となり得る対称性を吟味し、 $P\Theta$  対称性 ( $P$ : 空間反転) の破れと AF 秩序によるバンド折り返しの複合効果に起因することを明らかにした[4]。

本研究では、AF TI における Dirac 電子状態を明らかにするために、AF ドメインを分離可能なマイクロ ARPES 装置の建設を行った。NdBi、GdBi に対して系統的にマイクロ ARPES を行い、複合対称性  $S = \Theta T_D$  が、AF 構造に依存せず、AF TI の Dirac 電子状態を普遍的に保護することを示した。また、AF 秩序由来の新奇表面状態の起源を探るため NdSb のマイクロ ARPES を行い、表面状態が  $P\Theta$  対称性の破れ、および AF 秩序由来バンド折り返しの複合効果に起因したトポロジカルに自明な状態であることを明らかにした。これらの成果は、マイクロ ARPES を用いることで磁性とトポロジーの寄与を分離して理解し、両者が強く絡み合う系において出現する表面状態の起源を統一的に理解する枠組みを与える。

## 【参考文献】

[1] M. Kitamura, S. Souma, A. Honma, *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **93**, 033906 (2022).

[2] A. Honma *et al.*, *Nat. Commun.* **14**, 7396 (2023).

[3] A. Honma *et al.*, *Phys. Rev. B* **110**, 115152 (2024).

[4] A. Honma *et al.*, *Phys. Rev. B* **108**, 115118 (2023).