

新博士紹介

1. 氏名 伊藤 俊 (Philipps-Universität Marburg, Prof. Ulrich Höfer Group)
2. 論文提出大学 東京大学大学院 物理学専攻
3. 学位種類 博士 (理学)
4. 取得年月 2019年3月
5. 題名 Electronic properties of bismuth studied by systematic film control at the nanoscale
6. 使用施設 HiSOR BL-9A, NSRRC BL-21B1

7. 要旨

重元素ビスマス (Bi) の単結晶は、非常に小さなキャリアポケットを持つ半金属であり、3次元のディラック分散を持つことから、その異常な磁気伝導特性が大きな注目を集めてきました。また、その安定元素中最大の原子質量によって巨大なスピン軌道結合を持ち、近年のトポロジカル物質の研究における中心元素となってきました。本研究では Bi 単結晶において長年議論が続いてきた2つの問題、電子トポロジと薄膜における金属-絶縁体転移に対し、真空紫外光での高分解能・角度分解光電子分光 (ARPES) による研究を行いました。実験は、広島大学放射光科学研究センターの BL-9A および台湾 National Synchrotron Radiation Research Center の BL-21B1 にて行いました。

1. Bi 単結晶の非自明な電子トポロジの解明

Bi は様々なトポロジカル物質を合成する中心元素ですが、その単結晶のトポロジは議論が続いてきました。約 10 meV の微小なバンドギャップによって実験・理論両面でトポロジの決定が困難であったためです。鍵となる ARPES 測定において、光電子の脱出深さに対する不確定性関係から3次元のバンドに対する分解能に制限が与えられますが、Bi の3次元ディラックバンドはこれよりもさらに鋭く分散し、原理的に決定が不可能でした。

この問題に対し私たちは、2次元の薄膜を使うことで分解能の制限を回避できることを見出しました。薄膜中に形成される量子化状態は純粋に2次元的な電子状態のため不確定性関係の影響を受けない一方、その膜厚に対する依存性の中に3次元の情報が埋め込まれているのです。私

たちは、Fig. 1 に示すように、14原子層から202原子層までの厚みで膜厚制御された高品質な Bi 薄膜を作製し、量子化状態の発展を追跡することに成功しました。とくに、202原子層の薄膜中に形成される10 meV スケールの量子化構造を高分解能 ARPES によって観測することで、ビスマスの3次元バルクバンドと、その表面バンドとの結合を精密に決定し、Bi 単結晶が非自明なトポロジを持つことを実験的に検証しました¹⁾。

2. Bi 薄膜の金属-絶縁体転移における新奇な機構の発見

Bi はその微小なキャリアポケットのために非常に長いフェルミ波長を持ち、ナノスケールにおいて量子力学的な効果が強く表れる系として興味を持たれてきました。特に、バンドの量子化による金属-絶縁体転移は今から半世紀前に予言され²⁾、電気伝導測定で実証されました³⁾。しかし、最近の ARPES 実験では超薄膜でフェルミ準位をよぎるバルクバンドの端が観測されており⁴⁾、全く同一の試料で矛盾した結果が得られていました。

私たちは、上記の高品質な Bi 薄膜の高分解能 ARPES を数原子層の領域で行い、全ての量子化バンドを分解した、Bi 薄膜の金属-絶縁体転移の初の直接観測に成功しました。フェルミ準位よりも上に位置する伝導帯の底についてはアルカリ金属吸着の特性⁵⁾を活用することでバンド分散を決定しました。さらに、この数原子層領域における、量子化準位の異常な膜厚依存性と準位の縮退を発見しました。実験結果と第一原理計算、タイトバインディング計算、そしてモデル計算を組み合わせた解析により、表面状態の影響が数原子層領域で強まったときに、電子相関によって閉じ込めポテンシャルが変形されるという全く新しい描像で理解できることを明らかにしました。これにより、先行研究でフェルミ準位を横切っていたバンドの波動関数が実は表面に局在しており、実効的な表面状態として振舞うことで伝導測定と整合的になることが分かりました。この結果は Bi の歴史的な問題の完全な描像をもたらすのみならず、物質や次元性を問わず、エッジ状態を持つ系のナノスケールでの振る舞いを支配する一般的な枠組みを提示するものです⁶⁾。

最後に、本研究で多大なご支援をいただきました共同研究者の方々に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) S. Ito *et al.*: Phys. Rev. Lett. **117**, 236402 (2016).
- 2) V. Sandomirskii: JETP **25**, 101 (1967).
- 3) S. Xiao *et al.*: Phys. Rev. Lett. **109**, 166805 (2012).
- 4) T. Hirahara *et al.*: Phys. Rev. Lett. **115**, 106803 (2015).
- 5) S. Ito *et al.*: Phys. Rev. B **97**, 155423 (2018).
- 6) S. Ito *et al.*: arXiv 1903.07018.

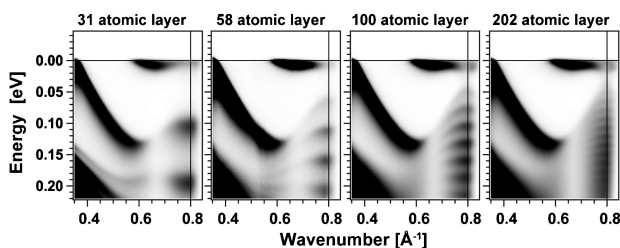


Fig. 1 Evolution of ARPES images measured on Bi films whose thicknesses are systematically increased. (modified from ref. 1)