

半金属ビスマスのトポロジーの謎を解明 ー電子波干渉効果を用いた超精密電子状態解析ー

1. 発表者：

伊藤 俊（東京大学大学院理学系研究科 博士課程1年）

松田 巖（東京大学物性研究所 准教授）

小林 功佳（お茶の水女子大学 基幹研究院 教授）

2. 発表のポイント：

- ◆近年注目を集めているトポロジカル物質に欠かせない原料であるビスマス元素は、その結晶そのものがトポロジカル物質であるかどうかは長年謎とされてきた。
- ◆本研究グループは、原子レベルで制御した薄膜内の電子波干渉効果を先端分光法で精密測定することで、ビスマス結晶がトポロジカル物質であることを明らかにした。
- ◆安定で安全、安価なビスマスの、今まで解明されていなかったトポロジカル特性が明らかとなり、今後これを活かした次世代デバイス材料としての利用が期待される。

3. 発表概要：

東京大学物性研究所の松田巖准教授らの研究グループは、お茶の水女子大学、広島大学、国立清華大学（台湾）、NSRRC 研究所（台湾）のグループと共同で、半金属ビスマスがトポロジカル物質（注1）であることを解明しました。

トポロジカル物質とは量子力学の原理に基づく性質を保存した材料で、絶縁体の表面のみで電気が流れるなど身の回りの物質とは大きく異なる性質を持ち、今後次世代の情報技術への応用に向けて注目されている物質群です。ビスマスは代表的な半金属材料ですが、最近では様々なトポロジカル物質を合成するのに欠かせない原料となっています。しかしながら、純粋なビスマス結晶それ自体がトポロジカル物質かどうかは長らく謎のままでした。トポロジカルな性質の解明には、その電子状態を光電子分光法（注2）で直接測定するのが確実な方法ですが、ビスマス結晶は量子力学の不確定性原理（注3）で決まる測定限界をもっているため、正確な測定が阻まれていました。そこで本研究では、原子レベルで制御したビスマスの超高品質な膜を合成し、内在する電子波の干渉効果を観測することでその問題を回避しました。そして、最先端の光電子分光法による超精密測定により、ビスマス結晶のトポロジー量を決定し、本材料が実はトポロジカル物質であることを証明しました。

ビスマスは安定で安全、安価な物質であり、トポロジカル物質固有の性質を活かしたデバイスへの注目が集まる中、次世代材料の有力候補となると期待されます。また、現在も次々と新しいトポロジカル物質が提案されており、その精密測定において本研究の手法が大きな力を発揮すると期待されます。

本研究成果はアメリカ物理学会の速報誌「Physical Review Letters」に近日中に掲載されます（11月22日（火）オンライン版掲載予定。前後する可能性あり）。また、同誌の編集者推薦（Editor's Suggestion）に選ばれました。

4. 発表内容：

背景

半金属ビスマスは、質量がほぼゼロのディラック電子を持つなど、興味深い性質を示す物質です。特に近年は、トポロジカル物質と呼ばれる新しい物質群を構成する中心元素としても注目を集めています。物質中では、電子は固有の波長とエネルギーを持った「電子波」として振る舞い、このエネルギーと波長の関係（バンド構造）が各物質を特徴づけます。トポロジカル物質はバンド構造の幾何学的性質（トポロジー）が通常の物質に対して反転した物質です。この奇妙な性質に起因して、表面のみに電流が流れたり、電気と磁気が直接結合したりするなど、種々の興味深い現象が発現します。しかし、ビスマスそれ自体がトポロジカル物質であるかどうかは長らく議論が続いていました。これは、トポロジカル物質は一般に光電子分光法によりバンド構造を観測することで確認できますが、ディラック電子などの複雑な構造を精密に決定することが難しかったためです。ビスマスは測定限界が量子力学の不確定性原理によって決まっており、この問題解決は困難とされてきました。

研究成果

本研究グループは、3次元的な物質であるビスマスを極めて薄い2次元的な膜にすることで、この測定限界の問題を回避できることを見出しました。原子スケールまで薄くした膜の中では、閉じ込められた電子の波が作る干渉波形が直接見えるようになります。光電子分光において、不確定性原理による測定限界は3次元的な性質に対して生じるもののため、2次元的な膜の中の電子波は遥かに精密に測定できます（図1）。さらに、この干渉波形が物質固有の情報を持っていることから、膜の厚みを変えながら干渉の様子を調べていくことで、物質の3次元的な情報をも抽出できることが分かりました（図2）。試料は超高真空の中でビスマスの原子ビームを飛ばす手法により作成し、広島大学放射光科学研究センターおよび台湾の放射光施設 NSRRC のビームラインにて測定を行いました。膜の厚みを制御した試料に対して光電子分光測定を行うことで、ビスマスの複雑なバンド構造を精密に決定し、ビスマスがトポロジカル物質であることを疑いなく確認でき、長年の謎に決着を付けることができました。

今後の展開

本研究によりビスマスがトポロジカル物質であることを解明できました。ビスマスの基礎研究における重要な一歩であるだけでなく、トポロジカル物質の性質を活かした応用技術開発に向けても価値ある成果です。ビスマスは安定な単元素のトポロジカル物質であり、また安全・安価な物質であることから、次世代のデバイス材料の有力な候補です。また、本研究における電子の干渉波形を用いた手法は他の様々な物質に応用できます。現在でも次々と新しい機能を持ったトポロジカル物質が提案されていますが、これらの多くはビスマス同様複雑な電子構造を持っており、高分解能測定が欠かせません。本手法は、超精密な測定手法の1つとして今後の物質研究で活用されていくでしょう。

5. 発表雑誌：

雑誌名：Physical Review Letters

論文タイトル：Proving Nontrivial Topology of Pure Bismuth by Quantum Confinement

著者：S. Ito, B. Feng, M. Arita, A. Takayama, R.-Y. Liu, T. Someya, W.-C. Chen, T. Iimori, H.

Namatame, M. Taniguchi, C.-M. Cheng, S.-J. Tang, F. Komori, K. Kobayashi, T.-C. Chiang and
I. Matsuda*

6. 用語解説：

(注1) トポロジカル物質

物質中の電子は、あるエネルギーと波長を持つ波として振る舞い、このエネルギーと波長の関係（バンド構造）が物質の性質を決定する。トポロジカル物質は、バンド構造の形状（トポロジー）が通常の物質に対して反転した物質群である。通常の物質では実現できない奇妙な性質が発現することから、次世代のデバイスへの応用が期待されている。

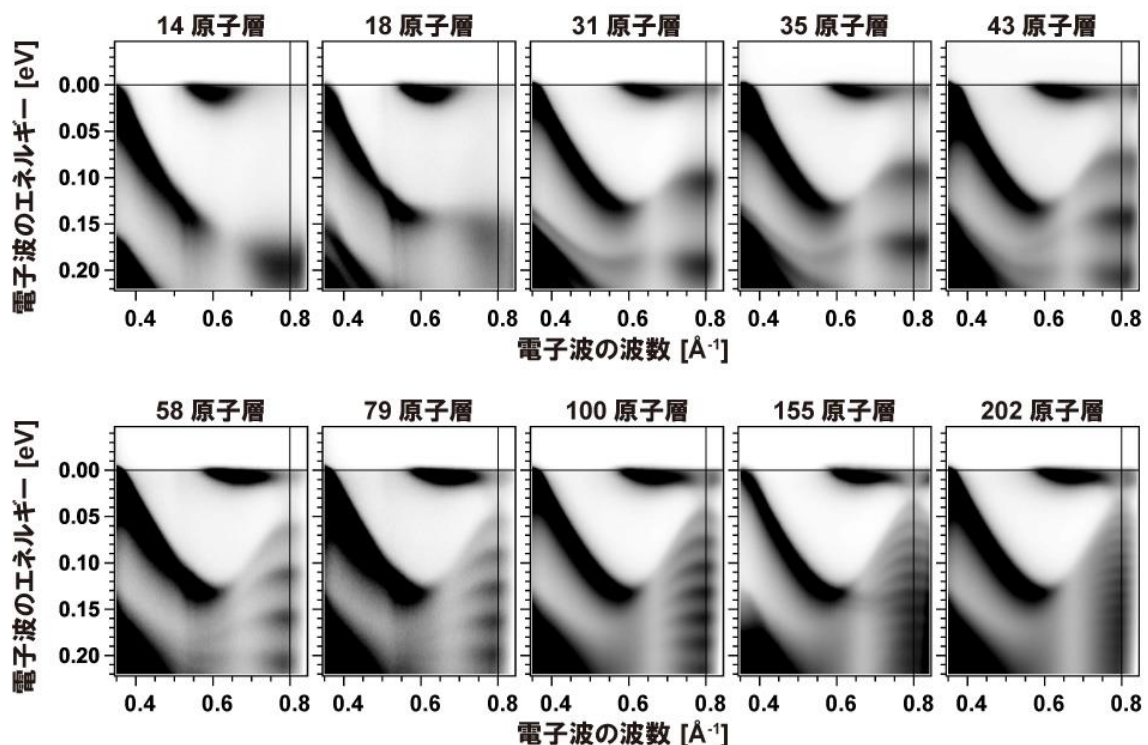
(注2) 光電子分光法

金属や半導体などの固体に紫外光以上のエネルギーを持つ光を照射すると、電子が放出される。この電子を光電子と呼び、光電子のエネルギーや速度を分析することで固体中の電子の情報を抽出する実験法を光電子分光法という。

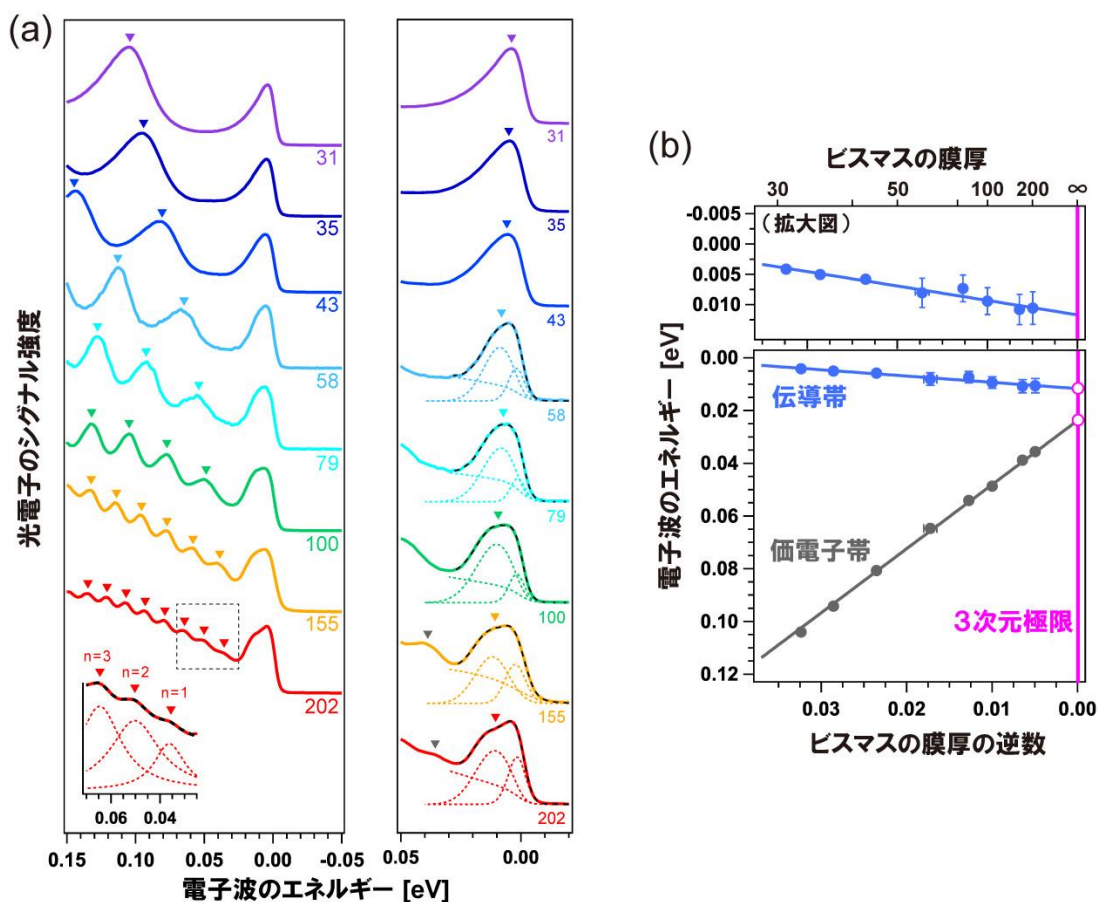
(注3) 不確定性原理

原子や電子などの極めて小さいスケールの世界では、日常的な物理法則は成立せず、量子力学の法則に支配される。量子力学では、位置と速度のように互いに関連する2つの量を同時に測定しようとする、必ず有限の測定誤差が生じてしまう。これを不確定性原理と呼ぶ。光電子分光法では、光電子の放出方向（試料面垂直方向）に対して不確定性原理が影響する。

7. 添付資料：



(図1) 光電子分光法で観測されたビスマス薄膜のバンド構造を、電子波のエネルギーと波数（波長の逆数）の関係で示している。黒色が信号強度の強い領域を表す。原子スケールの薄膜中における電子波の干渉が直接観測されている。



(図2) (a) 図1の特定の波数 ($0.8 \text{ \AA}^{-1}$) で抽出された、光電子スペクトルの膜厚依存性。干渉効果に対応するピークが明瞭に観測されている。(b) 抽出されたピーク位置を膜厚の逆数にプロットした結果。下方(灰色)と上方(青色)のデータがそれぞれ価電子帯(電子の詰まったバンドの中で最もエネルギーの高いもの)と伝導帯(価電子帯の1つ上のバンド)の端の位置を示している。膜厚が無限大になる3次元極限での電子構造が、膜厚に対する依存性から精密に求められた。