



本件の報道解禁につきましては、令和元年  
12月19日(木)午前3時以降にお願いいたし  
ます。

令和元年12月18日

反強磁性トポロジカル絶縁体を世界で初めて発見！  
～未知の素粒子アクシオンの発見に加速～

【本研究成果のポイント】

- 反強磁性トポロジカル絶縁体を世界で初めて発見しました。
- 未知の素粒子アクシオンの引き起こすトポロジカル電気磁気効果の実現に道が開きました。

【概要】

広島大学大学院理学研究科 木村昭夫教授の研究グループは、ロシア・サンクトペテルブルグ大学やスペイン・ドノスティア国際物理センターなどとの国際共同研究として、広島大学放射光科学研究センターにて高輝度シンクロトロン放射光（\*1）やレーザー光を利用した角度分解光電子分光法（\*2）を用いて「反強磁性トポロジカル絶縁体」を世界で初めて発見しました。今回の研究成果は、未知の素粒子アクシオン（\*3）が引き起こすトポロジカル電気磁気効果などの新しい量子現象の観測に向けた研究が加速されることが期待されます。

本研究の成果は、英国の科学雑誌「Nature」に掲載されるのに先立ち、オンライン版に日本時間12月19日午前3時（イギリス時間12月18日午後6時）に掲載されます。

【論文情報】

論文タイトル：Prediction and observation of an antiferromagnetic topological insulator

著者名：M. M. Otrokov<sup>1</sup>, I. I. Klimovskikh<sup>2</sup>, D. Estyunin<sup>2</sup>, A. M. Shikin<sup>2</sup>, E. F. Schwier<sup>3</sup>, S. Kumar<sup>3</sup>, 木村昭夫<sup>4</sup>, E. V. Chulkov<sup>1</sup>、他36名

所属：1 ドノスティア国際物理センター、2 サンクトペテルブルグ大学、3 広島大学放射光科学研究センター、4 広島大学大学院理学研究科

DOI : 10.1038/s41586-019-1840-9

【背景】

トポロジカル絶縁体（\*4）という通常の絶縁体とは異なる特殊な絶縁体の存在が明らかになり大きな注目を集め、2016年のノーベル物理学賞につながりました。トポロジカル絶縁体は、物質の内部は電気を通さない絶縁体にも関わらず、表面では金属的な振る舞いを示すことが知られています。最近5年間では大きな進展がありました。このトポロジカル絶縁体に磁石の機能を加えることにより、全く新しい現象が予測・発見され、新たなフィーバーがおこっています。一つは量子異常ホール効果（\*5）と呼ばれ、トポロジカル絶縁体に少量の磁性元素を混ぜることにより、試料の端に沿って摩擦のない電流を外部磁場なしで発生することができました。もう一つは、トポロジカル電気磁気効果です。通常は、電場をかけることで電気分極が発生し、磁場をかけ

ることで磁化が生まれます。しかし、トポロジカル電気磁気効果では、電場で磁化を発生し、磁場で電気分極を発生する現象です。このようにこれまでの常識をくつがえすような効果が、反強磁性トポロジカル絶縁体で見ることが理論的に予測されていましたが、そのような物質はこれまで見つかっていませんでした。

【研究成果の内容】

本研究チームは、まず高度な理論計算手法を用いて  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  が反強磁性トポロジカル絶縁体になりうることを予測しました。次にその単結晶試料の作製を行い、構造、磁性、電気的特性を調べたところ、同物質が層状の反強磁性体であることを明らかにしました。その試料を、広島大学の放射光科学研究センターのシンクロトロン放射光を用いて角度分解光電子分光を用いて実験を行なったところ、その物質の表面に大きなエネルギーギャップが開いたディラック電子状態を直接的に観測しました。このように本研究では、世界で初めて反強磁性トポロジカル絶縁体の実現に成功しました。

【図 1】

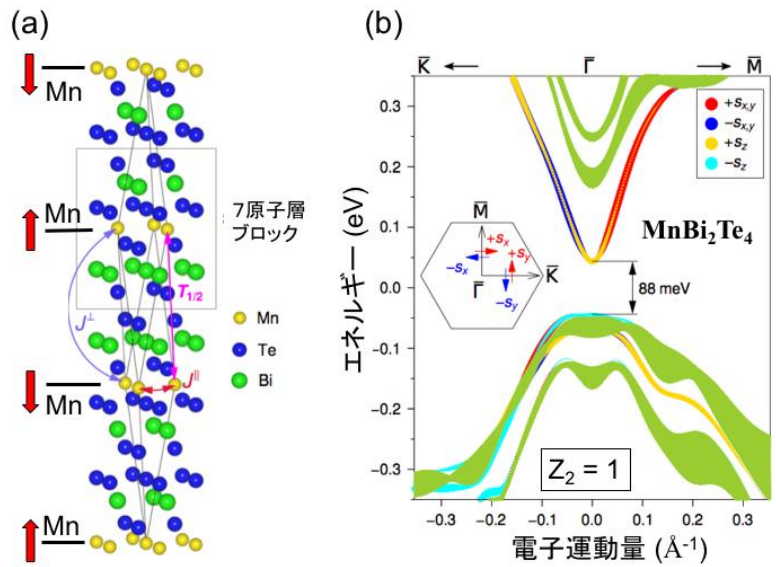


図 1. (a)反強磁性トポロジカル絶縁体候補物質  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  の結晶構造と(b)理論計算による表面バンド構造。

(a)四角で囲まれているように、テルルとビスマスとマンガン（中央）の原子層からできた7層ブロックが基本単位となり、弱い力で積層しています。それぞれのブロックのマンガン層の磁気モーメントがブロックごとに上向きと下向きに交互に並んで正味の磁化を持たない「層状反強磁性」となっています。(b)理論計算からバルクバンド（緑色）のエネルギーギャップの中に存在するスピン偏極した表面バンドに大きなエネルギーギャップ（86 meV）が予言されました。

【図2】

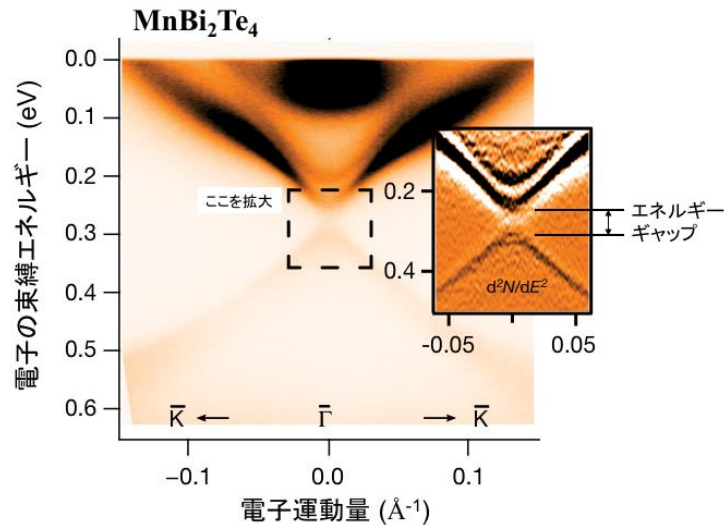


図2.角度分解光電子分光によって観測した  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  の表面バンド構造。

広島大学放射光科学研究センターの高輝度レーザー光を利用した角度分解光電子分光手法を用いて反強磁性トポロジカル絶縁体候補物質  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  の表面バンド構造の観測を行いました。その結果、図1に示すように、トポロジカル絶縁体を特徴付ける直線的なディラック表面の交差点で、エネルギーギャップが空いていることを観測しました。これにより、 $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  が反強磁性トポロジカル絶縁体であることを実験・理論の両面から世界で初めて明らかにしました。

### 【今後の展開】

今回の反強磁性トポロジカル絶縁体の発見には大きな意味があります。未発見の素粒子「アクシオン」が関わるトポロジカル電気磁気効果の観測に向けた研究が加速することが期待できます。アクシオンは、素粒子物理学で導入された仮想粒子で、従来の電磁気学の基本方程式であるマクスウェルの方程式が大きく変更されます。本研究で発見された反強磁性トポロジカル絶縁体を用いて、大型の加速器や検出器を用いることなく、アクシオンが引き起こす様々な新しい現象が発見されることが期待できます。

### 【用語解説】

#### \* 1. シンクロトロン放射光

光の速度（地球を一秒間に7週半する速さ）までに電子を加速し、磁場でその進行方向を曲げると、同時に進行方向に強力な光が放出される。これがシンクロトロン放射光である。自然界では星雲の中に放射光を見つけることができるが、地上では専用の加速器が必要である。シンクロトロン放射光は、人類が手に入れた最も強力な光で「夢の光」とも呼ばれる。本実験は広島大学放射光科学研究センターで行われました。当施設は国立大学法人としては唯一の放射光施設で、数多くの国内外ユーザーが利用する、共同利用・共同研究拠点です。

#### \* 2. 角度分解光電子分光

物質に光を照射すると、光電効果と呼ばれる現象によって、電子が固体表面から放出されます。この放出された光電子のエネルギーと放出角度を測定し、エネルギー保存則と運動量保存則を利用して固体内部の電子のエネルギーと運動量の決定する手法を角度分解光電子分光と言います。光源としてシンクロトロン放射光（\*1）やレーザー光などが用いられます。

### \* 3. アクシオン

物理学の最大の問題の一つである強い CP 問題を解決するために導入された仮想粒子で、宇宙の暗黒物質（ダークマター）の 4 分の 1 を占めているとも考えられている。これまで大掛かりな実験装置を用いた実験が数多く行われてきましたが、いまだその存在は確かめられていません。これが存在することで、高校・大学で学習するようなガウスの法則やアンペールの法則などの一般の電磁気学の法則に修正を加えなければなりません。この新しい電気磁気効果により、電場で磁化を誘起したり、磁場で電気分極を誘起することが可能となります。

### \* 4. トポロジカル絶縁体

透明なガラスは電気を通さずアルミホイルは電気を通すように、日常生活の中で「電気を通すかどうか」という感覚は物質の色を見るだけである程度判断できてしまいます。また、その自然に身に付いた感覚は、物理的な理由づけも可能であり、透明なガラスは「絶縁体」、アルミホイルは「金属」というように物質中の電子の状態で区別されます。

一方、「トポロジカル絶縁体」に属する物質は特殊で、「絶縁体」でありながら、その表面で金属と同じように電気を流す性質を持つ特殊な物質です。トポロジカル絶縁体の表面に電流を担う電子はスピン（電子の自転）をそろえて運動し、「光」と同じように質量を持たないのが最大の特徴です。また通常物質とは異なり、トポロジカル絶縁体の表面を動き回る電子は、普通とは違い、欠陥や不純物によって邪魔されることなく（エネルギーを損失することなく）伝導ができるというとても魅力的な性質を持っています。

### \* 5. 量子ホール効果と量子異常ホール効果

量子ホール効果は半導体の電気伝導度が量子化される現象で、1980 年にフォン・クリッチング博士によりはじめて観測されました。これは物性物理学の域を越えた世紀の大発見として大きな注目を浴び、同博士は 1985 年にノーベル物理学賞を受賞しました。その後、研究が大きく進展し、量子ホール効果がおこっている状態では、半導体試料の端に沿ってエネルギーを失うことなく電子が一方に流れていると理解されています。しかしながら、量子ホール効果は、極低温、強磁場という 2 つの環境がそろってはじめて実現するため、基礎研究の域を出ることはなく、実用化にはほど遠いものと考えられていました。ところが、2013 年になりトポロジカル絶縁体（※ 4）として知られるアンチモン・ビスマス・テルル化合物 ( $\text{Sb,Bi})_2\text{Te}_3$  にクロム (Cr) という微量の磁性元素を含んだ磁性トポロジカル絶縁体において、外部磁場を必要としない量子ホール効果が観測され大きな反響を呼びました。これは異常量子ホール効果と呼ばれ、それまで理論的には予言がされていたものの、実現が困難なものと考えられていました。

#### 【お問い合わせ先】

広島大学大学院理学研究科物理科学専攻 教授 木村 昭夫  
Tel : 082-424-7400  
E-mail : [akiok@hiroshima-u.ac.jp](mailto:akiok@hiroshima-u.ac.jp)

発信枚数：A4版 4枚（本票含む）