



東北大学



OSAKA UNIVERSITY



平成22年9月17日

報道機関各位

東北大学 大学院理学研究科・原子分子材料科学高等研究機構  
大阪大学 産業科学研究所  
科学技術振興機構（JST）

## 新型のトポロジカル絶縁体を発見 -次世代省エネデバイスの開発に向けて大きく前進-

### <概要>

東北大学大学院理学研究科の佐藤宇史准教授、大阪大学産業科学研究所の瀬川耕司准教授と安藤陽一教授、および東北大学原子分子材料科学高等研究機構の高橋隆教授らのグループは、次世代省エネデバイスへの応用などで注目されている「トポロジカル絶縁体」の中で最も大きいバンドギャップ<sup>注1)</sup>を持つ新物質を発見しました。

本研究成果は、平成22年10月1日（米国東部時間）発行（予定）の米国物理学会誌 Physical Review Letters に受理され、オンライン版で近日中に公開されます。

### <背景>

固体には、金属、絶縁体、半導体、超伝導体といった状態が存在しますが、ここ数年、「トポロジカル絶縁体」と呼ばれる従来の物質の状態とは全く異なる新しい状態が存在することが発見され、大きな話題になっています。このトポロジカル絶縁体物質は、内部（バルク）は電流を流さない絶縁体状態であるのに対して、その表面に特殊な金属状態が現われます。この表面状態においては、有効質量ゼロの粒子（ディラック粒子）<sup>注2)</sup> がディラック錐（図1）と呼ばれる状態を形成し、電子の自転（スピン）<sup>注3)</sup> をそろえて動き回っています。この表面のディラック電子は、従来の物質中の電子よりも格段に動きやすい上に不純物に邪魔されにくいという性質を持っており、これを利用した次世代の超低消費電力デバイスや超高速の量子コンピューターへの応用へ向けた研究が現在世界中で急ピッチに進められています。

このように様々な応用が期待されているトポロジカル絶縁体ですが、現在までそ

の候補物質は数えるほどしか発見されていません(具体的にはBi(ビスマス)とSb(アンチモン)の合金、セレン化ビスマス $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ など)。これらの物質の量子状態の安定性は、バルクが持つバンドギャップによって決まりますが、これまでに知られているトポロジカル絶縁体物質はバンドギャップが比較的小さいため、表面のディラック粒子が熱によって壊れやすいという欠点を持っていました。そのため、室温で安定して動作する新型デバイスを開発するためには、熱に強い新型のトポロジカル絶縁体を発見することが不可欠と考えられてきました。

#### <研究の内容>

今回、東北大学と大阪大学の共同研究グループは、 $\text{TlBiSe}_2$ (Tl:タリウム、Bi:ビスマス、Se:セレン)(図2)の高品質大型単結晶の育成に成功し、外部光電効果<sup>注4)</sup>を利用した角度分解光電子分光<sup>注5)</sup>という手法を用いて、 $\text{TlBiSe}_2$ から電子を直接引き出して、そのエネルギー状態を高精度で調べました(図3)。その結果、 $\text{TlBiSe}_2$ の表面とバルクの電子状態を分離して観測する事に成功し、表面では理論で予測されるディラック錐状態が観測される一方で、バルクでは絶縁体に対応したバンドギャップが開いていることを明らかにしました(図4)。この結果により、 $\text{TlBiSe}_2$ が新型のトポロジカル絶縁体であることが実験的に確立されました。さらに、観測されたバンドギャップの大きさ(0.35 エレクトロンボルト(eV))は、これまで発見されたトポロジカル絶縁体の中で最も大きいことから、 $\text{TlBiSe}_2$ は室温で動作するデバイスへの実用に最も適していることも見出されました。

#### <今後の展望>

今回の研究成果は、これまでごく限られた物質でしか見出されなかったトポロジカル絶縁体が、より多くの物質で発見される可能性を明確に示したものです。また、 $\text{TlBiSe}_2$ と同じ結晶構造を持つ物質の探索により、異なるタイプのトポロジカル絶縁体が発見されることも期待されます。さらに、 $\text{TlBiSe}_2$ の構成原子を他の原子に置換することによって表面ディラック電子を自在に制御して、様々な機能をもつスピントロニクス<sup>注6)</sup>デバイスを作製することも可能になると考えられます。

---

本成果は、日本学術振興会の科学研究費補助金 若手研究(S)「モット絶縁体とスピンホール絶縁体：普通でない絶縁体の物理の究明」(研究代表者：安藤陽一)、および、JST 戦略的創造研究推進事業 チーム型研究(GREST)の「物質現象の解明と応用に資する新しい計測・分析基盤技術」研究領域(研究総括：田中通義 東北大学 名誉教授)の研究課題「バルク敏感スピン分解超高分解能光電子分光装置の開発」(研究代表者：高橋 隆)によって得られました。

## <用語解説>

### 注1) バンドギャップ

絶縁体や半導体において、電子が埋まっている状態(価電子帯)における一番高いエネルギーと、埋まっていない状態(伝導体)における一番低いエネルギーの差をバンドギャップと呼びます。バンドギャップが大きいほど絶縁体状態は壊れにくく、熱に対してより安定になります。

### 注2) ディラック粒子

固体中の電気伝導を担う電子は、通常、有限の有効質量をもって運動していますが、特殊な状況下では、素粒子の一種であるニュートリノのように、その有効質量が消失し、固体中を運動すると理論的に予言されていました。このような状態にある粒子は非常に動きやすく、その運動は、今から約80年前に英国の物理学者ディラック(1933年ノーベル物理学賞)が提唱した相対論的量子力学に従います。

### 注3) スピン

電子が持つ、自転に由来した磁石の性質のことです。自転軸の方向に対して、上向き(アップ)と下向き(ダウン)の2種類の状態があります。トポロジカル絶縁体の表面では、上向きスピンを持った電子は右に、下向きスピンを持った電子が左にといったように、スピンの方向の異なる電子が互いに逆方向に移動します。

### 注4) 外部光電効果

物質に紫外線やX線を入射すると電子が物質の表面から放出される現象です。物質外に放出された電子は光電子とも呼ばれます。この現象は、1905年に、アインシュタインの光量子仮説によって理論的に説明されました。アインシュタインは、この業績でノーベル賞を受賞しています。

### 注5) 角度分解光電子分光

結晶の表面に高輝度紫外線を照射して、外部光電効果<sup>注4)</sup>により結晶外に放出される電子のエネルギーと運動量を同時に測定する実験手法です。この方法により、固体中の電子のエネルギーと運動量の関係(これをバンド分散といいます)を決定でき、決定されたバンド分散から物質の示す様々な性質(例えば超伝導や光学的性質など)を説明することができます。

### 注6) スピントロニクス

電子の磁氣的性質であるスピンを利用して動作する全く新しい電子素子(トランジスタやダイオードなど)を研究開発する分野のことです。電子スピンのアップ/ダウン状態を、電気信号の「0」と「1」に置き換えて信号処理を行います。電子スピンは応答が早く、熱エネルギーの発生も非常に少ないので、これを利用したスピントロニクス素子は、超高速、超低消費電力の次世代電子素子の最有力候補とされています。

<参考図>

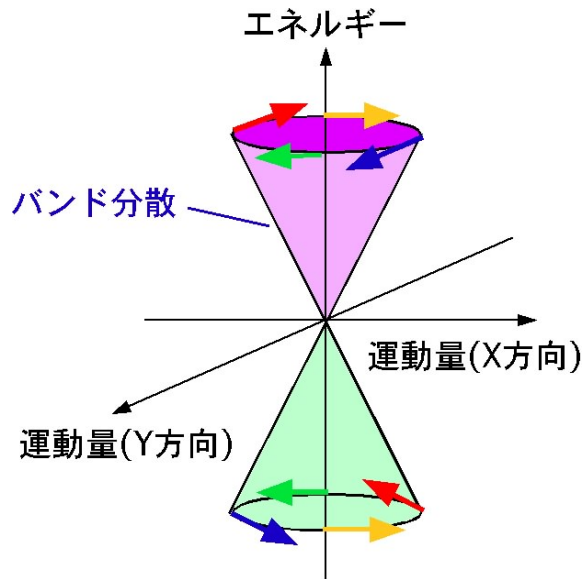


図 1: ディラック錐状態における電子のエネルギー関係の模式図。バンド分散が直線的であるために電子の有効質量がゼロとなり、電子がディラック粒子的な振る舞いを示す。矢印は予想されるスピンの向き。

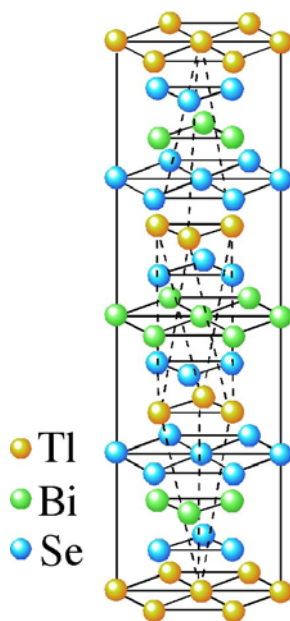


図 2: 新型トポロジカル絶縁体 TlBiSe<sub>2</sub> の結晶構造

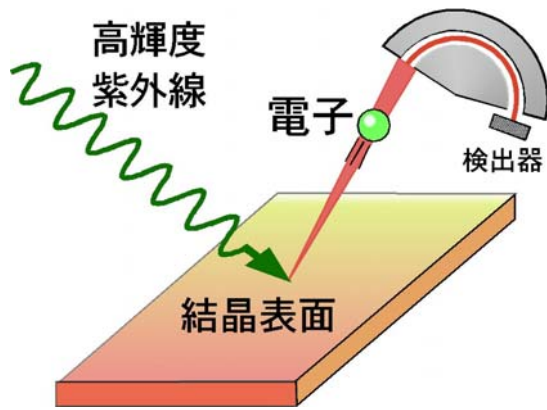


図3: 光電子分光の概念図。物質に高輝度紫外線を照射して出てきた光電子のエネルギー状態を精密に測定する。

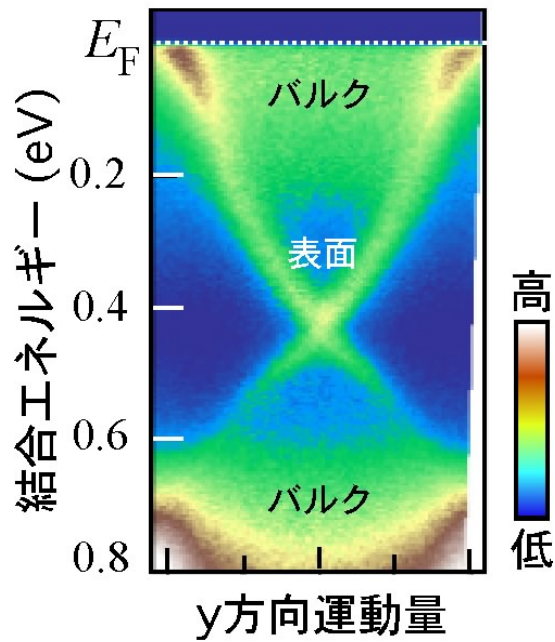


図4: 角度分解光電子分光で決定したTlBiSe<sub>2</sub>のバンド分散。バルク状態の間にディラック錐的なエネルギー分散を示す表面状態が観測される。

<お問い合わせ先>

<研究に関すること>

佐藤 宇史 准教授  
東北大学 大学院理学研究科  
Tel : 022-795-6477

安藤 陽一 教授  
大阪大学 産業科学研究所  
Tel : 06-6879-8440  
E-mail : y\_ando@sanken.osaka-u.ac.jp

高橋 隆 教授  
東北大学 原子分子材料科学高等研究機構  
Tel : 022-795-6417  
E-mail : t.takahashi@arpes.phys.tohoku.ac.jp

<JSTの事業に関すること>

長田 直樹  
科学技術振興機構 イノベーション推進本部 研究領域総合運営部  
〒102-0075 東京都千代田区三番町5 三番町ビル  
Tel : 03-3512-3524 Fax : 03-3222-2064  
E-mail : crest@jst.go.jp