

## 論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称	博 士 ( 理 学 )	氏名	Munisai Nuermaimaiti
学位授与の要件	学位規則第4条第①・②項該当		
論文題目			
Spin filtered surface state scattering and electronic states of three-dimensional topological insulator Bi <sub>2</sub> Te <sub>2</sub> Se (三次元トポロジカル絶縁体 Bi <sub>2</sub> Te <sub>2</sub> Se 表面のスピンの選択的電子散乱と電子構造)			
論文審査担当者			
主 査	准教授	木 村	昭 夫
審査委員	教授	生天目	博 文(放射光科学研究センター)
審査委員	教授	圓 山	裕
審査委員	教授	谷 口	雅 樹
<p>トポロジカル絶縁体とは、結晶内部では電流を流さないが、試料の端や表面で金属的な伝導を示す特殊な物質である。トポロジカル絶縁体という言葉が使われ始めたのは 2005 年くらいからであるが、トポロジーを用いて物質を区分するという概念そのものはもっと以前からあった。1980 年に発見された量子ホール効果は、低温・強磁場下で半導体二次元電子系が量子化したホール伝導度を示す現象としてよく知られる。ここでは電子は磁場中ではサイクロトロン運動を行うが、試料の端では電子が壁にぶつかりながら境界に沿って進むスキッピング運動をする。この量子ホール効果がトポロジーを用いて理解理解出来ることがその後の研究で示されたのである。ここでいうトポロジーはもともと数学の「位相幾何学」で使われ、分かりやすい例として、コーヒークップとドーナツが同じクラスに属し、中が詰まった穴の開いていないボールはドーナツとは異なるクラスに属す。このトポロジーの概念を電子の波数(運動量)空間において既述・分類したものがトポロジカル絶縁体である。通常、トポロジカル絶縁体と接するのは異なるトポロジーを持つ「真空」である。このように、異なるトポロジーを持つ2つの物質間の境界では必ずエネルギーギャップの閉じた質量ゼロの状態が存在しなければならない。この要請から、トポロジカル絶縁体表面ではディラック円錐型のバンドが形成される。</p> <p>本研究で申請者が着目する3次元トポロジカル絶縁体では、最小で単一のディラック円錐型の表面バンドが存在し、電子スピンの方向が波数ベクトルに対し垂直に固定された、ヘリカルスピントクスチャーを形成する。このため、トポロジカル絶縁体の表面では非磁性不純物に対する電子の完全後方散乱は禁止され、エネルギー損失の少ない表面スピンの流が得られるという性質を持ち、磁気単極子の発生、マヨラナフェルミオンの実現など、様々な新奇量子現象の発現が期待され世界中で大きな注目を集めている。</p> <p>その中でも、最近レーザー光照射によって表面スピンの流を生成する技術が理論的に提案された。現実それが実現出来れば、レーザー光を用いた画期的な次世代デバイスへの応用が考えられ期待も大きい。一方、3次元トポロジカル絶縁体として初期の頃に発見されたビスマスセレンイド(Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>)はバンドギャップの大きさが0.3eVと他のトポロジカル絶縁体物質に比べ大きなギャップを持っており、角度分解光電子分光を用いてトポロジカル絶縁体であることが示され、最も大きく注目された物質の一つである。しかしながらバル</p>			

クの絶縁性が乏しいため、バルク電流が支配し、新奇量子物性発現に深く関わると期待される表面電子輸送現象が捉えられるまでには至っていなかった。これは  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  が示す電子構造そのものが原因であることが考えられており、その意味ではより理想的なトポロジカル絶縁体の発見が強く望まれていた。このような中、3元系の  $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$  がよりバルク絶縁性の高いトポロジカル絶縁体であることが実験的に示され、次世代デバイス応用により適していると考えられた。先述のレーザー光を用いたスピン流の生成には、このようにバルク絶縁性の高いトポロジカル絶縁体の利用が必須である。さらには、約1電子ボルト (eV) のオーダーの光エネルギーで電子を励起するため、フェルミエネルギーから約1eVの範囲の非占有電子状態の知見を得ることがとても重要である。しかしながら、 $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$  において、占有電子状態の実験はいくつか報告があるものの、非占有状態の実験的な報告はこれまで皆無であった。

申請者はトポロジカル絶縁体  $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$  について非占有電子構造と電子散乱に関する知見を得ることを目的として走査型トンネル顕微分光の研究を提案した。試料表面と探針間の微分コンダクタンスは表面電子の局所状態密度に比例するため、微分コンダクタンスのバイアス電圧依存性を観測することにより、電子状態密度の空間分布の直接観測が可能である。また、表面に不純物や欠陥が存在すると表面電子は散乱の結果定在波を形成し観測可能になる。その定在波の波長は試料バイアスに依存し、それをフーリエ変換することにより散乱ベクトルの二次元情報を得ることができる。

申請者はまずシャープな探針を得る技術を習得し、良質の微分コンダクタンス像を得るために細心の注意を払った。結果的に観測された表面には、明確な定在波が観測され、実空間像をフーリエ変換することにより波数空間での散乱ベクトルの二次元パターンを見いだした。実験結果を解釈するためにモデル計算を用いて解析した結果、実験で得られた電子散乱パターンはトポロジカル絶縁体表面におけるヘリカルスピントクスチャーを仮定するとうまく説明できることが分かった。さらには第一原理計算の結果とも比較することにより、トポロジカル絶縁体表面に特有のヘリカルスピントクスチャーがフェルミエネルギーより1eV上でもまだ生き残っていることを示唆する結果となる。本研究で得られた実験結果は、今後レーザー光を用いたトポロジカル絶縁体表面におけるスピン流生成のために有益な知見を得たものと考えられインパクトは大きい。

以上、審査の結果、本論文の著者は博士（理学）の学位を授与される十分な資格があるものと認める。

## 公表論文

[1] Unoccupied topological surface state in  $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$

Munisa Nurmamat, E. E. Krasovskii, K. Kuroda, M. Ye, K. Miyamoto, M. Nakatake, T. Okuda, H. Namatame, M. Taniguchi, E. V. Chulkov, K. A. Kokh, O. E. Tereshchenko, and A. Kimura  
Phys. Rev. B **88**, 081301(R) (2013).

## 参考論文

[1] Experimental verification of the surface termination in the topological insulator  $\text{TlBiSe}_2$  using core-level photoelectron spectroscopy and scanning tunneling microscopy.

Kenta Kuroda, Mao Ye, Eike F. Schwier, Munisa Nurmamat, Kaito Shirai, Masashi Nakatake, Shigenori Ueda, Koji Miyamoto, Taichi Okuda, Hirofumi Namatame, Masaki Taniguchi, Yoshifumi Ueda, Akio Kimura.

Phys. Rev. B. **88**, 245308 (2013).