

# 論文審査の結果の要旨

氏名 金 聖憲

本論文では、最近世界中で精力的に研究されているトポロジカル絶縁体を対象とし、その結晶の表面状態での電子の弾性散乱および非弾性散乱現象を実験的に研究し、トポロジカル表面状態に特徴的な現象を見出した成果が報告されている。トポロジカル絶縁体とは、強いスピン軌道相互作用と時間反転対称性に起因して、結晶内部では絶縁体であり、そのバルクバンド構造ではフェルミ準位付近でバンドギャップが開いているが、その結晶表面にはスピン偏極した金属的な電子状態ができているという特別な物質群である。これは、通常物質群（非トポロジカル物質）とは電子の波動関数のトポロジが異なる物質量子相であることが近年発見された。とくに、その表面状態は質量ゼロのディラック電子系のバンド分散を持ち、しかも表面電子の運動量とスピンの向きとの関係が固定されている。つまり、特定の方向に進む電子のスピンは一定の方向しか向いていない。このスピン偏極特性のため、表面状態では非磁性欠陥による後方散乱が禁止され、なおかつ表面の欠陥や汚染によって壊されない頑強な性質を持つと理論的に予想され、それを示唆する実験報告も出ている。本論文では、2種類の実験を行い、その特徴的な性質を明らかにした。第一には、走査トンネル顕微鏡による準粒子干渉パターンの観察を通して、表面電子は  $180^\circ$  後方散乱だけでなく、散乱角が  $100^\circ$  以上の後方散乱すべてが抑制されていることを発見した。第二の実験としてポンプ・プローブ型時間・角度分解光電子分光法を行い、トポロジカル表面状態のキャリア緩和時間が 10 ピコ秒程度であることを実測し、金属状態としては非常に長いことを初めて示した。このようなトポロジカル表面状態のキャリアダイナミクスの研究は世界的に見ても例が少なく、得られた結果の理論的解釈はまだなされていないものの、従来から多数の研究例がある静的な電子状態の研究とは一線を画する画期的な成果である。

本論文は 6 章から構成されている。第 1 章では本研究の背景として、トポロジカル絶縁体に関する先行研究を概観し、その中から生まれた

問題意識および本研究の目的が述べられている。第2章では、本研究の基盤となる知識と概念、物質群などに関して詳述されている。とくに、今まで実験に用いられてきた多くのトポロジカル絶縁体では、格子欠陥のためにバルクが絶縁体化されていないが、本研究で用いた試料結晶  $\text{Bi}_{1.5}\text{Sb}_{0.5}\text{Te}_{1.7}\text{Se}_{1.3}$  はバルク状態が絶縁体化されており、バルクバンドがフェルミ準位を横切っていない。これによって、表面状態電子がバルク状態に散乱されることを抑制することになり、トポロジカル表面状態の本来の特性を引き出すことができる。このことが本研究の特徴である。第3章では、本研究で使用した実験手法の走査トンネル顕微鏡と時間・角度分解光電子分光法について、それらの原理と使用した装置について述べている。第4章において、極低温型走査トンネル顕微鏡による電子定在波（準粒子干渉パターン）の観察、およびそのフーリエ変換から求めた散乱ベクトルの解析結果が報告されている。その結果を角度分解光電子分光で得られたバンド分散と比較することにより、最大の散乱ベクトルがバンド分散から予想される散乱ベクトルのおよそ75%の大きさしかないことを見出した。それは、表面電子の散乱過程において、散乱角が  $100^\circ$  以内であることを意味している。つまり、散乱角が  $100^\circ$  以上の後方散乱がすべて抑制されていることを実験的に明らかにした。 $180^\circ$  後方散乱はスピンの反転を伴うのでトポロジカル表面状態では禁止されていることが先行研究によって理論的にも実験的にも示されていたが、抑制される後方散乱がこれほど広い角度範囲にわたることは驚きである。その原因究明は今後の課題であるが、この事実を発見した功績は大きい。第5章では、ポンプ・プローブ型の時間・角度分解光電子分光法によって光電子強度の時間依存性を測定し、レート方程式によるシミュレーションで実験データを再現することによって、トポロジカル表面状態に入っている電子の緩和時間が、バルク伝導バンドの底に蓄積される電子の緩和時間より長く、10 ピコ秒程度になることをつきとめた。これは、今回使用した試料結晶のバルク状態が真に絶縁体的バンド構造を持つため、バルク伝導バンドの影響を受けずに純粋に表面状態での電子緩和過程を観測することができたために初めて明らかになった性質である。第6章では本論文で明らかにされた結果とその意義がまとめられており、さらに今後

の研究の展望が述べられている。

以上のように、論文提出者は、トポロジカル絶縁体結晶の表面状態に関して、スピン偏極状態に起因する後方散乱の抑制現象と金属状態としては極めて長い緩和時間を持つことを見出し、弾性・非弾性散乱過程でのキャリアダイナミクスを明らかにした。これらは世界的にもみても初めてとなる成果である。この成果は、トポロジカル絶縁体の基礎物性として確固たる知見を与えただけでなく、スピントロニクス等への応用研究に有用な知見を与えるものである。よって、本研究の物性物理学としての価値と独創性は十分と認められ、博士（理学）の学位論文としてふさわしい内容をもつものと認定し、審査員全員で合格と判定した。なお、本論文は、共同研究者らとの共同研究であるが、論文提出者が主体となって実験の遂行や結果の解析を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断した。

## 最終試験の結果の要旨

氏名 金 聖憲

成績 合 格

本委員会は論文提出者に対し、平成 27 年 1 月 27 日、学位論文の内容及び関連事項について、口頭試験を行った。

その結果、論文提出者は、物理学、特に物性物理学について、博士（理学）の学位を受けるにふさわしい十分な学識をもつものと認め、審査委員全員により合格と判定した。