

エネルギー・運動量空間で見る スピンと光が駆動する光スピントロニクスの新展開

川口海周*

New Horizons for Spin- and Light-driven Opto-spintronics Explored in Energy-momentum Space

Kaishu KAWAGUCHI*

This project aims to directly visualize the generation and temporal evolution of spin currents, a key concept in spintronics, from the perspective of the electronic band structure in energy-momentum space. Conventional studies of spin currents have mainly relied on transport measurements, making it difficult to access the microscopic electronic states responsible for their generation and dissipation. To overcome this limitation, I employed spin- and time-resolved angle-resolved photoemission spectroscopy (Spin-TrARPES), an advanced experimental technique capable of resolving energy, momentum, spin, and time simultaneously. Using this technique, I investigated the photoexcited electronic dynamics in thin films of the topological insulator Bi_2Te_3 . The measurements reveal the excitation of spin-polarized electrons into unoccupied states following optical excitation, which is closely related to the formation of spin-current states. These results demonstrate the capability of Spin-TrARPES to directly probe the microscopic processes underlying spin-current generation and provide a new experimental platform for studying ultrafast spin dynamics in spintronic materials.

1. 研究目的

本研究では、スピントロニクス分野の基盤概念であるスピン流の生成・制御・散逸過程について、エネルギー・運動量空間における電子バンド構造の時間発展として直接可視化することで、その機構解明を目指している。スピン流は電子のスピン自由度を利用した新しい情報伝達手段として注目されており、低消費電力かつ高速な次世代情報デバイスの実現に向けた重要な物理概念である^(1,2)。しかしながら、これまでのスピン流研究は主として電気伝導測定などの実空間的手法に基づいており、スピン流を担う電子のエネルギー状態や運動量依存性を直接観測することは困難であった。そのため、スピン流の生成機構や散逸過程については未解明の点が多く、よりミクロな電子状態に基づく理解が求められている。本研究では、この課題を解決するため、スピン流を「バンド構造の時間発展」として直接観測する新しい実験手法を導入した。申請者が開発を進めてきたSpin- and Time-resolved Angle-resolved Photoemission Spectroscopy (Spin-TrARPES) は、エネルギー、運動量、スピンの三つの自由度を同時に分解し、さらに時間分解測定を可能とする先進的な分光手法である⁽³⁾。本研究ではこの装置を用いて、光励起によって生成されるスピン流の形成と時間発展を直接観測し、その量子力学的描像を明らかにすることを目的とした。特に研究対象として、強いスピン軌道相互作用を持つトポロジカル絶縁体 Bi_2Te_3 ^(4,5) に着目した。この物質はスピン偏極した表面状態を有することから、光励起による純スピン流生成の有力な候補物質と考えられている。本研究では、 Bi_2Te_3 における光励起スピン流をエネルギー・運動量空間で直接観測することにより、光スピントロニクスの基礎理解を深化させる。

2. 研究の方法と結果

フェムト秒パルスレーザーを用いたポンプ・プローブ法とスピン分解角度分解光電子分光を組み合わせた Spin-TrARPES 装置 (図1) を用いて測定を行った。ポンプ光により試料を光励起し、その後の非平衡電子状態をプローブ光で観測することで、光励起後の電子状態およびスピン状態の時間発展をエネルギー・運動量空間において追跡した。研究対象としてトポロジカル絶縁体 Bi_2Te_3 薄膜を用いた。まず、高品質試料を安定して得るために薄膜成長条件の最適化を行い、成膜温度や蒸着

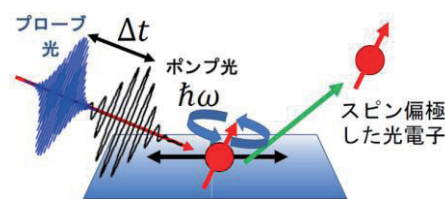


図1 Spin-TrARPES 測定 の概念図。

2026年3月5日 受理

* 豊田理研スカラー

東京大学物性研究所

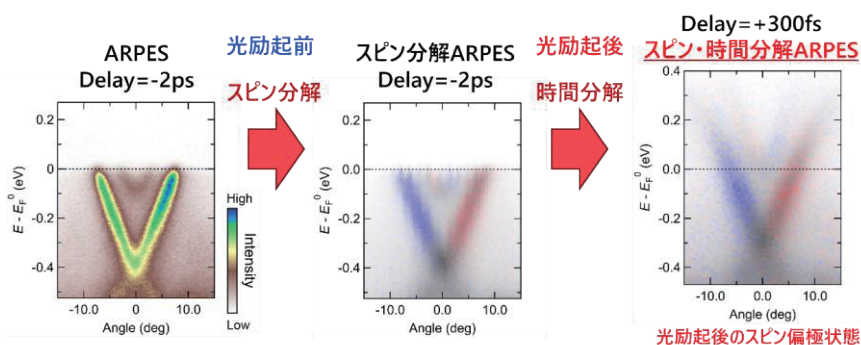


図2 本研究の進展として、 Bi_2Te_3 薄膜に対するスピン・時間分解角度分解光電子分光 (Spin-TrARPES) 測定を実施した。その結果、光励起によってスピン流状態の形成に関与すると考えられるスピン偏極電子が励起される様子を、エネルギー・運動量空間において明瞭に観測することに成功した。

速度などを系統的に調整することで、平坦で清浄な表面を有する Bi_2Te_3 薄膜を再現性よく作製する条件を確立した。作製した試料については、通常角度分解光電子分光測定により表面状態のバンド分散を確認し、試料品質を評価した。その後、Spin-TrARPES 測定を行い、光励起後に形成される非占有電子状態の生成過程およびその時間発展を観測した。光強度、偏光、時間遅延などの条件を系統的に変化させながら測定を行い、非占有状態のエネルギー位置や寿命、運動量分布の変化を詳細に調べた。さらにスピン分解測定を組み合わせることで、光励起によって誘起されるスピン偏極の形成過程をエネルギー・運動量空間に基づいて解析した (図2)。これらの実験により、光励起後の電子状態の時間発展とスピン偏極の関係を調べるための基礎データを取得することができた。

本研究において大きな課題となったのは、Spin-TrARPES 測定におけるスピン分解検出の技術的難易度であった。スピン分解測定は検出効率が低く、高い統計精度を得るためには長時間測定が必要となる。そのため、レーザー出力の安定性や光学系の位置安定性、真空環境の維持、試料表面の清浄性など、装置全体の安定運転が重要となった。また、 Bi_2Te_3 薄膜の作製においても、成膜条件のわずかな違いが表面状態や測定結果に影響を与えることが明らかとなり、試料作製の再現性確保が重要な課題となった。これに対しては、成膜条件の詳細な記録と再現実験を行うことで、安定した試料作製条件を確立することができた。さらに、スピン分解データの解析では、信号強度が弱いことからバックグラウンドの影響や統計誤差の評価が重要となる。このため、スピン偏極信号の抽出や誤差評価を含む解析手法の高度化が、今後の重要な課題として明らかになった。

3. 将来展望

今後は、本研究で整備した実験基盤および解析手法を活用し、スピン分解測定をさらに発展させていく予定である。光励起条件を系統的に制御することで、純スピン流およびスピン偏極電流の生成条件を詳細に調べ、その発生メカニズムと時間発展を明らかにする。また、理論計算との比較を通じて、スピン流生成および散逸過程の物理的理解を深化させることを目指す。これにより、スピン流生成効率を高めるための材料条件や光励起条件に関する指針を提示できると期待される。本手法は他の物質系にも応用可能であり、今後はトポロジカル物質、磁性体、低次元材料などへの展開も視野に入れて研究をさらに展開していく。

4. 本研究の社会的・学術的意義

本研究は、スピン流という量子力学的現象をエネルギー・運動量空間で直接可視化する新しい計測手法を確立するものであり、スピントロニクス研究の基盤技術の発展に寄与する。スピン流は低消費電力で高効率な情報処理を可能とする次世代電子デバイスの実現に向けた重要な概念であり、その物理機構の理解は将来の半導体技術や情報通信技術の発展に大きく貢献する可能性がある。また、エネルギー効率の高い情報処理技術の実現は、電力消費の削減や環境負荷の低減にも寄与する。さらに、本研究で確立される Spin-TrARPES 技術は、物性物理学および材料科学における新しい計測手法として広く応用される可能性があり、今後の学術研究の発展にも寄与すると期待される。

REFERENCES

- 1) I. Žutić, *et al.*, *Rev. Mod. Phys.*, **76** (2004) 323.
- 2) A. Hirohata, *et al.*, *J. Magn. Magn. Mater.*, **509** (2020) 166711.
- 3) K. Kawaguchi, *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, **94** (2023) 083902.
- 4) H. Zhang, *et al.*, *Nat. Phys.*, **5** (2009) 438.
- 5) M. Z. Hasan, *et al.*, *Rev. Mod. Phys.*, **82** (2010) 3045.