

光に操られるスピンの超高速な動きを可視化する装置を開発

— スピン流が光で発生する瞬間を捉えた —

附属極限コヒーレント光科学研究センター 川口 海周 黒田 健太* Zhigang Zhao**

谷 峻太郎 小林 洋平 近藤 猛

(*現所属：広島大学大学院 先進理工系科学研究科)

(**現所属：山東大学情報理工学部 (中国))

〈概要〉

スピンの流れ(スピン流)を光で制御し情報伝達技術に活かすスピントロニクス研究が現在活発に行われている。しかし、物質内の電子が持つスピンの動きが光の照射と共に具体的にどう動くのかを微視的に観察することは困難なため、新たな実験手法の開発が求められていた。本研究では、物質内の電子一つ一つの動きを描く電子構造(電子の運動量とエネルギーの関係)を実験的に決定できる角度分解光電子分光技術を発展させ、光の照射と共に変化する電子のスピンのベクトル量を3次元かつ10兆分の1秒間隔の超高速で観察可能な装置を実現させた [1]。本装置を用いることで、スピン流がトポロジカル絶縁体表面にパルス光の照射直後に発生するまさにその瞬間を超高速で観察することに成功した。物質内電子のスピンの振り舞いが手に取るように見える本装置は、日本発の技術として世界的に着目されているペロブスカイト太陽電池の動作原理の微視的解明および効率向上に向けた評価方法となるなど、広範囲に渡るスピントロニクス研究の基盤を支える実験技術になることが考えられる。

〈研究の背景〉

人々の生活を豊かにするための材料開発・デバイス開発は進化を続けており、特に、エネルギー問題の解決を大きな課題として、光を効率的に活用する発電技術やエレクトロニクスに変わる新しい情報技術の開拓が求められている。その身近な例となる太陽電池では、光が半導体に当たると、その内部の電子が光のエネルギーを吸収することで、電気エネルギーに変換される。最近では特に、電子が持つ電荷だけでなく、スピンの性質も活用した太陽光発電が注目されている。日本で最初に発見されたのち世界中で研究競争が進むペロブスカイト太陽電池の高い性能は、電子のスピンの向きが光のエネルギーを吸収することで反転する現象により実現すると考えられている [2]。スピンの活用は、エレクトロニクスに変わるスピントロニクスにおける情報技術においても重要で、その制御に光を用いるデバイス応

用が期待されている。ある種類のトポロジカル絶縁体では、光が当たることでスピンが流れる現象 [3] が提案されており、その直接的な観察を通じた制御技術の構築が望まれている(図1)。

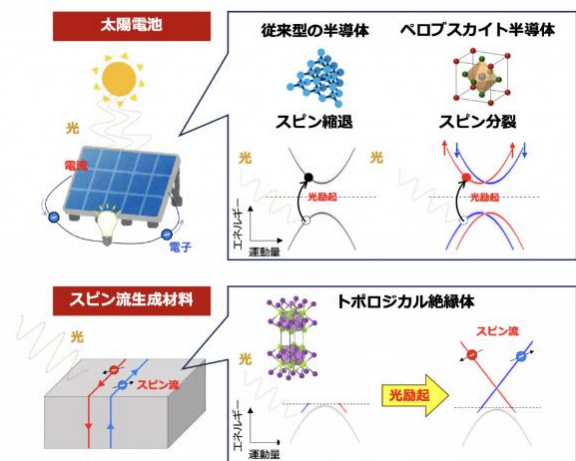


図1：電子・スピン・光と電子構造の関わり。スピンと電子構造における、光励起との関わりを示した概念図。太陽電池では、電子が光で高いエネルギーに励起されることで電気エネルギーに変換される。最近着目されるペロブスカイト半導体では、ラッシュバ構造と呼ばれるスピン分裂した電子構造が発電効率に大きな役割を果たしていると考えられている。トポロジカル絶縁体では、光励起によってスピン偏極したコーン状の電子構造が出現し、スピン流の制御が可能であることが本研究からも明らかになった。

電子の動きを視覚的に理解する手法が、光電子分光法による電子構造の観察である。電子構造とは、電子1つ1つをエネルギーと運動量の関係でプロットすると浮かび上がる模様を意味する。物質内では、無数の電子があたかも乱雑に動き回っているため、その集団運動を理解することは一見不可能に思われる。しかし、それを電子構造に焼き直すと物質固有の美しい模様が描け、量子力学に則った規則正しい集団運動として視覚的に理解できるようになる。電子の持つスピンの情報まで電子構造の模様反映させる実験手法がスピン分解光電子分光であり、電子構造に対して

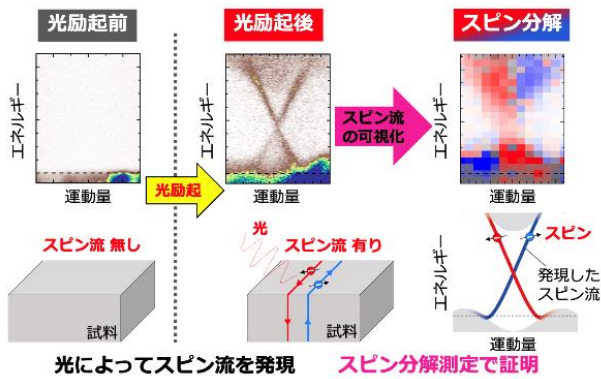


図 3 : 本装置で測定されたスピン流生成の直接観測結果。開発した装置を用いて測定した、トポロジカル絶縁体 Sb_2Te_3 の光励起後における電子・スピン状態のダイナミクスを電子構造として可視化した。光励起前には存在しなかった電子構造が光励起によって出現し、それがスピン流に由来することが、スピン分解された電子構造の測定により初めて直接的に示された。この結果は、スピン流が光によりスイッチングされたことを意味する。

〈今後の展望〉

開発した本装置によって、光で活性化された物質内の電子やそれらのスピンの状態が超高速で時間変化する様子を、視覚的に捉える電子構造から解明できるようになった。この新しい実験技術の有用性を、光励起によるスピン流の生成を世界で初めて直接視覚化し、実証した。今後の研究ターゲットは、ペロブスカイト太陽電池で予想されるスピン偏極電子構造に基づく光スピン変換理論の構築、光磁気デバイスに求められる材料の物性理解、スピントロニクス材料の特性評価など、幅は広大である。これらを実現する上で必須となるツールとして、本実験技術は今後、学界・産業界問わず普及して行くことが期待される。

〈参考文献〉

- [1] K. Kawaguchi *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **94** (2023).
<https://doi.org/10.1063/5.0151859>
- [2] F. Zheng *et al.*, Nano Lett. **15**, 7794–7800 (2015).
- [3] J. W. McIver *et al.*, Nat. Nanotechnol. **7**, 96–100 (2011).
- [4] T. Okuda *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **82**, 021002 (2013).
- [5] K. Yaji *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **87**, 053111 (2016).
- [6] Z. Zhao *et al.*, Opt. Express. **25**, 13517–13526 (2017).