光が観た金表面をまわる電子スピンの向き

[1] 要旨

金(Au(111))表面の電子状態はスピン自由度によって同心円状に分裂するが、そのスピンの向きは、20 年近く謎であった。その向きを決めるための実験的な工夫が行われ、外側電子のスピンの向きは時計回り、内側電子は反時計回りであることが明らかになった。この手法は、材料横断的な「基準データ」の整備を可能にし、さらにスピントロニクス材料設計とデバイス開発を加速する基盤となる。

[2] 本文

金(Au(111))表面には、最表面に電子がとどまって運動するショックレー表面状態とよばれる量子状態が現れる。電子の運動の向きとスピン（微小な磁石）の向きが結び付くいわゆるラシュバ効果により、電子状態はスピンの向きが逆の 2 つの同心円に分かれる。この発現機構について実験・理論両面で研究が進められてきた。特に、この 2 本の同心円状態のうち、どちらが時計回りでどちらが反時計回りのスピン配置なのかについては、測定法や座標系の取り方の違いなどによる混乱から、約 20 年間にわたり見解が分かれていた。

自然科学研究機構分子科学研究所と大阪大学産業科学研究所からなる研究チームは、極端紫外光研究施設(UVSOR)の放射光と光電子運動量顕微鏡にスピンローテーターと 2 次元スピンフィルターを組み合わせ、金(Au(111))表面状態のスピン配向を符号付きで決定した。この成果は、長年の論争を決着させるものであり、JPSJ の 2025 年 11 月号に掲載された。

従来の手法では、スピンフィルターの感度を反転させるのに時間がかかり、スピン偏極の感度の再現性に問題が生じることがあった。新たにスピンローテーターを用いることで、電子のスピンの向きを高速で 180°反転させ、差分データを効率よく取得できるため、スピン偏極の見積もりの効率と信頼性が向上する。

その結果、外側の電子状態が時計回り、内側の電子状態が反時計回りというスピン配置を、明確に実証した。さらに、法線入射の真空紫外光で偏光を切り替えて測定したところ、電場ベクトルと直交する放出方向では表面状態の信号が消失することが確認された。これは、表面状態の主成分が金原子の 6s・$6p_z$ 軌道であることを示している。この高対称な配置での測定が、光電子を通じて特定の軌道の電子状態に選択的にアクセスできる手法となっている。

今回の「2 次元のスピンと原子軌道の同時マッピング」は、材料ごとに共通指標となる「基準データ」を短時間で得られる実験手法である。スピンの向きや強さを材料設計に活かすスピントロニクス分野では、信頼できる基準データが装置開発や材料探索の効率や理論研究の進展を大きく左右する。本成果により、金（Au(111)）表面のスピン分布についての混乱が解消され、他の金属・半導体・トポロジカル材料へも同じ測定作法を展開し、データベースを作成するなどの道筋が整った。将来的には、スピンを使って低消費電力で動作するメモリ・論理素子、超高感度センサーなどの実現に寄与することが期待される。

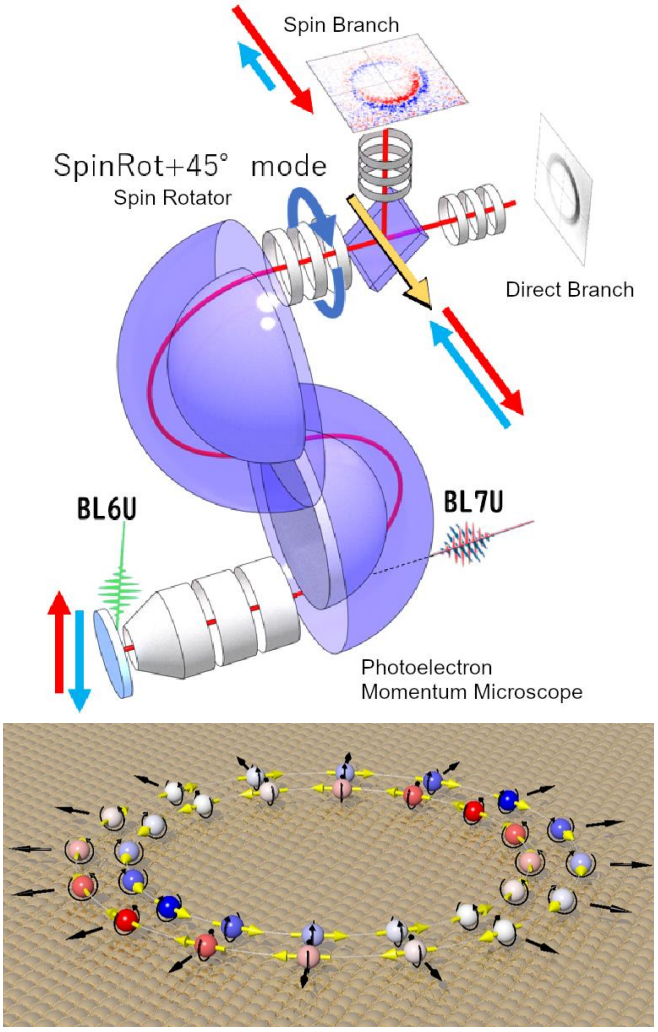

図 1. スピンローテーターと２次元スピンフィルターを備えた光電子運動量顕微鏡とこの装置によって決定した Au(111)表面状態のスピンの向きの概念図。

原論文（2025 年 10 月 31 日公開済）

Spin and Orbital Polarizations of Au(111) Surface State Determined by Photoelectron Momentum Microscope

F. Matsui, K. Hagiwara, Y. Sato, R. Sagehashi, and S Suga, J. Phys. Soc. Jpn. **94**, 114707 (2025).

＜情報提供：松井　文彦（自然科学研究機構・分子科学研究所）＞