

Laser-SARPES で解明する スピン軌道エンタングルメントと光スピン制御

矢治 光一郎
東京大学物性研究所

東京大学物性研究所極限コヒーレント光科学研究センターでは、真空紫外レーザー光を用いたスピン・角度分解光電子分光 (laser-SARPES) 装置を開発した[1]。レーザー光の高輝度・単色性を用いることにより、高分解能で SARPES 測定が可能になった。また、レーザー光の重要な性質として「偏光」がある。この偏光特性をフル活用することにより、レーザー光ならではの SARPES 研究が展開できるようになった。講演では、強いスピン軌道相互作用を示す表面電子状態を対象とした偏光依存 laser-SARPES について紹介する。

東大物性研の laser-SARPES 装置

我々の装置では、励起光として $h\nu=6.994\text{eV}$ の真空紫外レーザー光を使用している。レーザー光の特徴である高強度と単色性の相乗効果により、スピン分解測定モードで最高エネルギー分解能 1.7meV を達成した。本装置では、偏光面可変の直線偏光と円偏光を含む任意の楕円偏光が利用可能である。また、本装置には二台の超低速電子回折型スピン検出器が 90° の位置関係で配置されているため、三次元的に光電子のスピン偏極度を解析することができる。さらに、光電子アナライザーには、試料と入射スリット間の電子レンズ部分に電子ディフレクター機能がついており、試料を動かすことなく、入射スリット平行方向に 30° 、入射スリット垂直方向に 20° の範囲内の角度分解測定ができる。SARPES では励起光の入射方向や偏光電場ベクトルの向き、光電子の検出方向といった測定の幾何学的な配置が極めて重要である。光電子ディフレクター機能を用い、測定の幾何学配置を固定して SARPES を行うことは、観測されるスピン偏極度に関する理論解析を容易にする。

スピン偏極表面電子状態のスピン軌道エンタングルメントと光電子スピン

強いスピン軌道相互作用によってスピン偏極した表面電子状態では、表面電子のスピン方向は電子の運動量によって一意に決まるというのが標準的なモデルである。しかし、最近になって、表面電子のスピンは軌道成分と結合しており、軌道の対称性によって結合するスピンの向きが異なる「スピン軌道エンタングルメント」というアイデアが提唱された[2]。本研究では、Bi 単結晶表面をはじめとするいくつかのスピン偏極表面電子状態について、直線偏光を利用した軌道選択 laser-SARPES を行った。まず、 p 偏光及び s 偏光条件における SARPES では、鏡映面垂直方向のみにスピン偏極が観測されるが、その向きは p 偏光と s 偏光で反転することを見出した[3-5]。光学遷移選択則を考慮すると、 p 偏光では $|\psi_{\text{even},\uparrow}\rangle$ 、 s 偏光では $|\psi_{\text{odd},\downarrow}\rangle$ を観測しているといえる。一般論として、スピン軌道結合した表面電子状態の固有関数は $|\psi_{\text{even},\uparrow}\rangle$ と $|\psi_{\text{odd},\downarrow}\rangle$ の線形結合で記述できることを明らかにした。一方、直線偏光の電場ベクトルを鏡映面に対して傾けて p 偏光や s 偏光条件からずらすと、光電子のスピンは始状態とは異なる方向を向くことを発見した。これは、 $|\psi_{\text{even},\uparrow}\rangle$ と $|\psi_{\text{odd},\downarrow}\rangle$ が同時に励起され、それが光励起過程で量子力学的に干渉した結果として説明される[3,5]。直線偏光の電場ベクトルの回転角度に対して光電子スピンのどのように応答するかを定式化し、光スピン制御の基本概念を確立した[5]。

参考文献

- [1] K. Yaji *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **87**, 053111 (2016).
- [2] 例えば, Y. Cao *et al.*, Nature Phys. **9**, 499 (2013).
- [3] K. Kuroda *et al.*, Phys. Rev. B **94**, 165162 (2016).
- [4] R. Noguchi *et al.*, Phys. Rev. B **95**, 041111(R) (2017).
- [5] K. Yaji *et al.*, Nat. Commun. **8**, 14588 (2017).