電子のスピンを自在に操作~先端レーザー技術が拓 く光スピン制御~

【はじめに】

電子は、電気的な性質である電荷と磁気的な性質である スピンという二つの性質を併せ持つ。従来のエレクトロニ クス分野では、電子の電荷としての性質のみを利用してき たが、これと併せてスピンも制御できれば、より高速かつ 低消費電力でデバイス応用できるのではないかと考えられ 活発に研究が行われている。これまでスピンを制御するた めに磁場、電場、光、熱がよく使われてきた。一方、電子 には位相があり、この自由度もスピン制御のために利用で きるのではないかと考えられる。

強いスピン軌道相互作用によってスピン偏極した表面状 態を持つ物質の代表例として、トポロジカル絶縁体やラ シュバ型スピン分裂をもつ表面が挙げられる。これらの表 面電子状態ではスピン方向は電子の運動量によって決まる というのが標準的なモデルである。ところが電子の軌道に 着目すると、そ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」という状態にあ る。本研究では、スピン軌道エンタングルメント状態にあ る電子バンドからレーザーの偏光を利用してアップスピン 電子とダウンスピン電子を同時に光励起して重ね合わせる ことにより、自在にスピンの向きを制御できることを解明 した[1,2]。

【実験結果】

試料には、その表面電子状態が強いスピン軌道相互作用 によりスピン偏極していることが知られている Bi および Bi₂Se₃単結晶を用いた。実験は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において開発されたレー ザー光励起によるスピン・角度分解光電子分光(laser-SARPES)装置を用いて行われた[3]。図 1(a)の幾何学配置 で測定された Bi(111)単結晶薄膜表面の下M鏡映面上にお けるスピン分解バンド図を図 1(b,c)に示す[4]。鏡映面垂直 方向のみに表面電子状態のスピン偏極が観測され、「点に 対してスピンの向きは反転している。ところが、p 偏光励 起とs 偏光励起では観測される全てのスピン偏極の向きが 反対になっている。光学遷移のパリティ選択則によると、 p 偏光励起(ベクトルポテンシャルの対称性が偶)では始状

著者: 矢治 光一郎、黒田 健太

態が鏡映面に対して対称な波動関数($|\psi_{sym}\rangle$)を、s 偏光励 起(ベクトルポテンシャルの対称性が奇)では始状態が鏡映 面に対して非対称な波動関数($|\psi_{asym}\rangle$)を選択的に励起す る。したがって、p 偏光とs 偏光でスピンの向きが反転す るということは、波動関数の対称成分と非対称成分がそれ ぞれ反対向きのスピンと結合していることを意味している。 そして、Bi(111)のスピン縮退が解けた表面電子状態の固 有関数は、 $|\psi_{sym,\uparrow}\rangle$ と $|\psi_{asym,\downarrow}\rangle$ あるいは $|\psi_{sym,\downarrow}\rangle$ と $|\psi_{asym,\uparrow}\rangle$ の線形結合で書ける。一般に、スピン軌道相互作用と鏡映



図1(a) SARPES 測定の幾何学配置の概略図。(b) p 偏光条件および(c) s 偏光条件で測定された Bi(111)のラシュバ分裂表面電子状態のスピン分解バンド図。赤色と青色はお互いに反対向きのスピンをあらわす[4]。点線は表面電子バンドを示したガイド線。

対称性の帰結として、(i)スピンは鏡映面に対して垂直方 向を向き、(ii)波動関数の対称成分と非対称成分がそれぞ れ反対向きのスピンと結合し、(iii)対称・非対称成分それ ぞれのスピン偏極度は|1|になるが、(iv)これらが混ざり 合った系では全スピン偏極度は|1|にはならない、という ことが言える[2]。

次に、鏡映対称性が破られた場合には SARPES で観測 される光電子スピンはどうなるだろうか。例えば、図 2 (a) のように、p 偏光やs 偏光では測定の幾何学配置も含めて 鏡映対称性が保たれているが、直線偏光の電場ベクトルを 鏡映面に対して傾けると測定の幾何学配置の鏡映対称性を 破ることができる。ここで、光の入射面に対して電場ベク トルがなす角をθとする。図2(b)に、レーザー光の直線偏 光の電場ベクトルを p 偏光と s 偏光の間で回転させて測定 した Bi のスピン偏極表面電子状態からの光電子のスピン 偏極度を三次元的に解析した結果を示す。 $\theta = 0^\circ, 90^\circ,$ 180°のp 偏光及びs 偏光配置では、スピン偏極度のy成分 Pvが±1になっており、これは始状態のスピンベクトルの 方向と同じである。また、θ=60°及び120°付近で Pyはゼ ロになっている。一方で、スピン偏極度の x, z 成分 $P_{x,z}$ はθ=0°,90°,180°ではゼロであるが、θがそこからずれる と現れはじめ、 $\theta = 60^{\circ}, 120^{\circ}$ で極値をとる。スピン偏極度



図 2 (a) 測定の幾何学配置における鏡映面と直線偏光の電場ベク トルの向きの関係図。光の入射面と光電子の検出面は一致して おり、これらは試料の鏡映面に対して平行になっている。両矢 印は電場ベクトルの向きをあらわし、左図がp偏光、中図がs偏 光、右図では電場ベクトルが鏡映面に対して傾けられている。 電場ベクトルと鏡映面がなす角を θ とする。(b) Bi(111)の表面電 子バンドの波数 k_4 から放出された光電子の三次元スピン偏極度 $P_{x,yz}$ [2]。実線カーブは、文献 2 中の式(4)を用いたフィッティン グ結果である。(c) Bi₂Se₃ の表面電子バンドのから放出された光 電子の三次元スピン偏極度 $P_{x,yz}$ [1]。各シンボルが実験値で、実 線カーブがフィッティング結果である。

の各成分を合成することによりスピンベクトルを求めるこ とができ、その向きはθに依存して回転し、その大きさは 1になる。

同様の実験をトポロジカル絶縁体 Bi₂Se₃のスピン偏極 表面電子状態に対しても行った[図 2(c)]。その結果、P_xと P_yの振る舞いは Bi とよく似ているが、P_zの符号は反対に なっている。したがって、Bi₂Se₃から放出された光電子の スピンベクトルの回転方向は Bi とは異なっていることが わかる。入射する偏光に対して光電子のスピンベクトルが どのように回転するかは物質によって異なる。

それではなぜこのように直線偏光の電場ベクトルの向き により光電子のスピンベクトルの方向は回転するのであろ うか。図 3(a),(b)に示すように、p 偏光(s 偏光)励起では光 電子はアップ(ダウン)スピンを持つ。一方、直線偏光を傾 けると入射光はp 偏光とs 偏光の両方の成分をもつので、 図 3(a),(b)の過程が同時に起きる。つまり、図 3(c)に示す ように、一つのバンドのある波数k における $|\psi_{syn,\uparrow}(k)\rangle$ と $|\psi_{asyn,\downarrow}(k)\rangle$ をある終状態へ同時に励起しているので、始 状態と終状態それぞれのエネルギーと波数は同じだが異な る二つの経路がある、ということになる。これはコヒーレ ントな過程であり、アップスピン電子とダウンスピン電子 の波動関数を重ね合わせなければならない。一般に、アッ



図3 スピン軌道エンタングルメントとレーザー光を用いた光電子 のスピン回転の概念図。(a) p 偏光励起における光電子スピン。 (b) s 偏光励起における光電子スピン。(c) 電場ベクトルを任意の 角度にした時には, アップスピンを持つ光電子とダウンスピンを 持つ光電子が干渉しスピンベクトルが三次元的に回転する。 プスピン電子(スピノル $|\uparrow_y\rangle$ と定義)とダウンスピン電子 (スピノル $|\downarrow_y\rangle$ と定義)の重ね合わせは、その複素係数の 比の絶対値 u と位相差 α をパラメータとして、 $|\uparrow_y\rangle+ue^{i\alpha}|\downarrow_y\rangle$ とあらわされる。ここで、y 方向をスピン 量子化軸にとっている。この式は、アップスピン状態とダ ウンスピン状態を重ね合わせることで任意の方向を向いた スピン状態を作り出すことができるということを意味して いる。したがって、直線偏光の回転角 θ を変化させれば同 時励起される $|\psi_{sym,\uparrow}(k)\rangle$ と $|\psi_{asym,\downarrow}(k)\rangle$ の比を変えること ができ、 θ に依存して光電子のスピンベクトルの方向が回 転する。

【まとめと展望】

本研究では、スピン軌道エンタングルメント状態にある 電子バンドからアップスピン電子とダウンスピン電子を同 時に光励起すると、それらの干渉により任意の向きのスピ ンを作り出すことができる"光スピン制御"の基本原理を 解明した。今回のデモンストレーションでは、励起光とし て 7eV の光を利用したため、光励起された電子は光電子 として真空中に飛び出してしまっていたが、励起光のエネ ルギーをもっと低くすれば電子を固体内に留めておくこと がでる。この場合でも同様の概念が使えると予想している。 本研究成果は、光だけでなく電子の位相の自由度も利用し たスピン制御の新しい概念として多岐にわたる応用と発展 が期待される。

【謝辞】

本研究は、辛埴、小森文夫、原沢あゆみ、豊久宗玄、石 田行章、中山充大、近藤猛、小林功佳の各氏との共同研究 により行われました。また、真空紫外レーザー光システム の開発では、渡部俊太郎、Chuangtian Chen の各氏にお 世話になりました。本研究は JSPS 科研費 26287061、 15K17675 の助成を受けて行われました。

【参考文献】

- K. Kuroda, K. Yaji, M. Nakayama, A. Harasawa, Y. Ishida, S. Watanabe, C.-T. Chen, T. Kondo, F. Komori and S. Shin, Phys. Rev. B 94 (2016) 165162.
- K. Yaji, K. Kuroda, S. Toyohisa, A. Harasawa, Y. Ishida,
 S. Watanabe, C. T. Chen, K. Kobayashi, F. Komori and
 S. Shin, Nat. Commun. 8 (2017) 14588.

- K. Yaji, A. Harasawa, K. Kuroda, S. Toyohisa, M. Nakayama, Y. Ishida, A. Fukushima, S.Watanabe, C. Chen, F. Komori and S. Shin, Rev. Sci. Instrum. 87 (2016) 053111.
- 4. 矢治光一郎、黒田健太、小森文夫、辛埴、固体物理 52, 559 (2017).