

光子と電子の動的スピン量子相関

小坂 英男 (東北大学 電気通信研究所)

目的 本研究の目的は、半導体における光子と電子の動的スピン量子相関を異種交換相互作用という新原理で解明し、量子情報交換を伴う新たな光電効果の探求とその活用の道筋をつけることである。本研究により、電子が光子に与えるコヒーレントなスピントルクおよび光子が電子に与えるスピントルクを実験的に示し、光子と電子のスピン相関が双方向かつ量子的であることを明らかにする。

背景 光子は質量も電荷もなく、常に光速で走行するボソンである。一方電子は質量も電荷もあり、静止させることのできるフェルミオンである。このようにこれらは全く異質の素粒子であるが、電子間のクーロン相互作用は、仮想光子のやり取りによる電磁相互作用を起源とする。また、光子を吸収して電子が励起される「光電効果」は、光子はエネルギーという物理量の最小単位であることを示したアインシュタインの光量子仮説を生み出し、量子力学の基礎を築いた。一方で、量子は情報という物理量の最小単位でもあり、光子では偏光、電子ではスピンと呼ぶ内部量子数に情報を乗せる量子情報技術が近年急速に発展しつつある。スピンとは電子の内部状態を2値の波動関数で記述するものであり、自由空間を伝播する光子も、2値の円偏光（ヘリシティ）状態の重ね合わせで記述できることからスピンと呼ぶことができる。このようなスピンという共通の自由度を介して、互いの量子状態を交換し合うことが可能となれば、物質間の量子情報交換を伴う新原理の光電効果が実現する。ところが、光子と電子のスピンは形式的には同形でも物理的には異なる物理量であり、慎重に検討すべきである。本研究では、まず現象論的に光子と電子の動的スピン量子相関を明らかにし、物質の光効果や光励起現象の本質に迫る。具体的には、磁性スピンや電子スピンなどで古典的・量子的に議論されているスピントルクという概念を、光子-電子間に適用する。光子と電子が間接的に相互作用することにより、あたかも両者のスピンの間に量子的なトルクを受けるかのように振舞うことを実験的に検証する(図1)。

研究手法 偏光は基本的には振動電場であり、電子系の軌道自由度にしか結合しない。ところが半導体中のS電子は軌道成分を持たないため、対生成される正孔の軌道自由度を介して始めて、光子は電子とスピン結合する。この際、介在する正孔は電子ともつれ状態にないことが必要条件となる。半導体量子井戸を用い、軽い正孔励起子に横磁場を印加した際に形成されるV型3準位

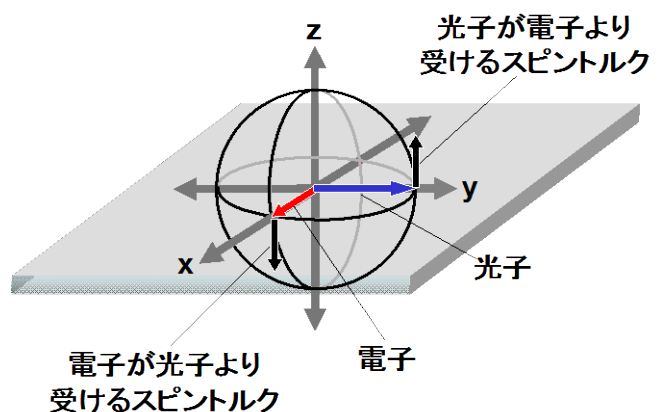


図1 ポアンカレーブロッホ球で表現した光子スピンと電子スピンの間に相互に作用するスピントルク。

構造（図 2）により、この必要条件は満たされる。本研究では、光実励起された電子スピンと光仮想励起された電子スピンの間のコヒーレントな相関（交換相互作用）を、「光スピン状態転写（文献 1）」および「電子スピン状態トモグラフィ（文献 2）」の手法を用いて観測する。

光子が物質（ここでは半導体を想定）に吸収されて電子正孔対（励起子）を生成する際、通常は電子と正孔のスピン状態はもつれてしまう。例えば量子井戸に円偏光を照射した場合には、電子と正孔の状態を一意的に決めることもできるが、直線偏光を照射した場合には電子と正孔はスピンもつれ状態にあり、統計平均をとった発光の偏光度はゼロとなる。このもつれを解くために V 型 3 準位構造が必要となる（図 2a）。このとき、正孔のスピン状態は一意的に決まり、電子のスピン状態は入射光の偏光状態に応じて変化する。これが光子から電子へのスピン状態転写の原理である。

逆に電子スピンの状態を読み出したい場合には、入射光（プローブ光）が仮想的に任意状態の電子スピンを生成するように設定する。この際にも V 型 3 準位構造が必要となる（図 2b）。実電子と仮想電子が交換相互作用することにより、反射光の偏光が回転する。このような電子による光子のスピントルクが生じるのは、図 1 のように電子と光子の状態ベクトルが互いに並行ではないときに限り、トルクベクトルはベクトル積方向に発生する。この反作用として電子は光子によってスピントルクを受ける。通常この反作用は小さいが、光子を高密度に注入することにより、測定可能な変位を引き起こす。

上記原理に基づき、電子と光子が相互に及ぼし合うスピントルクを、両方向から明らかにする。

研究進捗 電子スピンが光子スピンに及ぼす量子的スピントルク効果を利用して、図 3 に示す電子スピン歳差運動の可視化に成功している。交換相互作用の量子コヒーレンス項を顕在化させることにより、電子スピンの任意状態におけるから光スピンへ動的スピン量子相関効果の検証に成功した。

参考文献

[1] H. Kosaka *et al. Phys. Rev. Lett.* **100** (2008) 096602.

[2] H. Kosaka *et al. Nature* **457** (2009) 702.

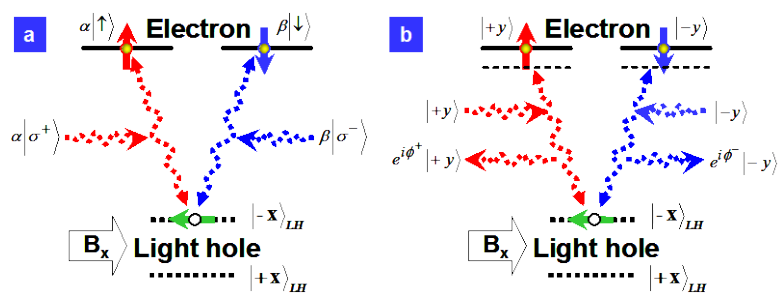


図 2 (a) 光子から電子へのスピン状態転写を可能とする実励起 V 型三準位構造。(b) 光による電子スピン状態トモグラフィを可能とする仮想励起 V 型三準位構造。

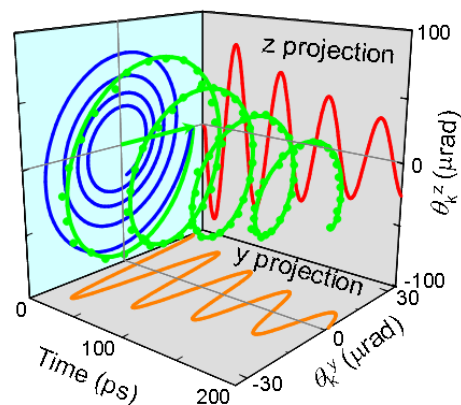


図 3 電子スピン状態トモグラフィによって得られた電子スピンの磁場（x 軸）回りの歳差運動。