

スピン渦とスピンホール効果

(京大院工) ○ 福田 将大, 市川 和秀, 立花 明知

Spin Vorticity and Spin Hall Effect

(Kyoto Univ.) ○ Masahiro Fukuda, Kazuhide Ichikawa, Akitomo Tachibana

【序】スピンホール効果は図 1(a) のように、スピン-軌道相互作用により電流に垂直な方向にスピンの流れ (スピン流) が生じるという理論的予測に対して観測されている現象であるが [1]、スピン流を物理量として定義することには多くの困難があることが知られている。本研究では、スピンホール効果という現象が量子電子スピン渦原理 [2–4] に基づくスピン渦の生成という考え方により、図 1(b) のように説明されることを示す。

【理論】超重力ダイナミクスにおける量子電子スピン渦原理は単純超対称性のもとで

$$\varepsilon^{A\mu\nu}(\text{SUGRA}) + \tau^{A\mu\nu}(\text{SUGRA}) = 0, \quad (1)$$

であり [2–4]、ミンコフスキー時空への極限において電子スピン \vec{s}_e のダイナミクスを記述する方程式を導く。

$$\frac{\partial}{\partial t} \vec{s}_e = \vec{t}_e + \vec{\zeta}_e, \quad (2)$$

$$\text{rot} \vec{s}_e = \frac{1}{2} (\bar{\psi} \vec{\gamma} (i\hbar D_{e0}) \psi + h.c.) - \vec{\Pi}_e. \quad (3)$$

ここで、 \vec{s}_e はスピン角運動量密度、 \vec{t}_e はスピントルク密度、 $\vec{\zeta}_e$ はツェータ力密度、 $\vec{\Pi}_e$ は動的運動量密度である。式 (2) については、原子・分子の相対論的電子状態を用いた数値計算による研究がすでになされている [5–7]。本研究では式 (3) に現れる物理量のスピン渦 $\text{rot} \vec{s}_e$ に注目する。スピン角運動量の渦度で表わされる電子スピン渦はスピンダイナミクスにおいて重要な役割を果たす。その役割を見るため、一般相対性理論から導かれる電子の対称ストレステンソル $T_e^{\mu\nu}$ より得られる電子の全運動量 $P_e^i = \frac{1}{c} T_e^{0i}$ に注目すると、

$$\vec{P}_e = \vec{\Pi}_e + \frac{1}{2} \text{rot} \vec{s}_e, \quad (4)$$

となり、動的運動量とスピン渦を含む。その時間発展は、

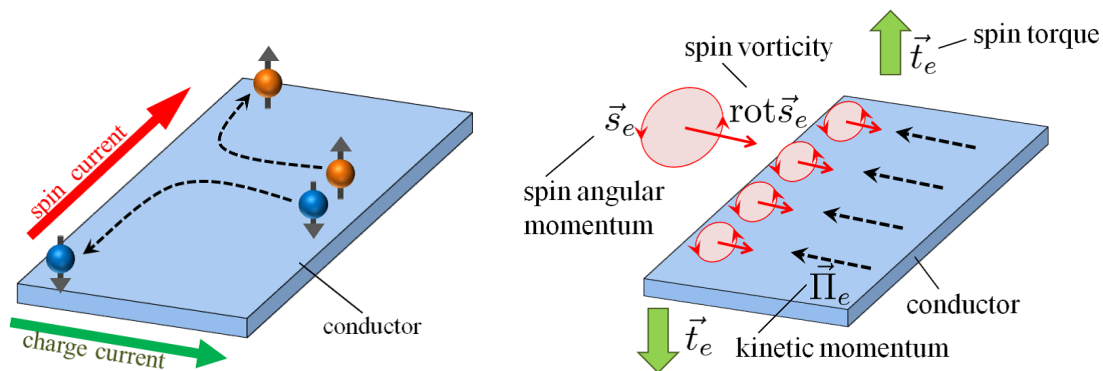
$$\frac{\partial}{\partial t} \vec{P}_e = \frac{\partial}{\partial t} \left(\vec{\Pi}_e + \frac{1}{2} \text{rot} \vec{s}_e \right) = \vec{L}_e + \vec{\tau}_e^S, \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \vec{\Pi}_e = \vec{L}_e + \vec{\tau}_e^S + \text{div} \vec{\tau}_e^A, \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\text{rot} \vec{s}_e) = -2 \text{div} \vec{\tau}_e^A = \text{rot} \vec{t}_e, \quad (7)$$

となる。ここで、 \vec{L}_e はローレンツ力、 $\vec{\tau}_e^S$ は張力である。

【考察】式 (5) ~ (7) から、電子の動的運動量がストレステンソルの反対称成分 $\overset{\leftrightarrow}{\tau}_e^A$ によりスピントルに変換されるという機構が明らかになる。この機構によりスピントル効果は「印加電場により与えられた電子の動的運動量がコンダクター内でスピントルに変換されて、コンダクターの端に逆向きのスピントルが蓄積される現象」として理解することができる。また、以上の関係式は、全て局所的に成り立つものであり、原子・分子系においても同様の議論が適用できる。



(a) 従来の描像。印加電場により生じた電流がそれに垂直方向のスピントルに変換される。

(b) 量子スピントル理論による描像。印加電場により生じた動的運動量がコンダクター内でスピントルに変換されて、コンダクターの端に逆向きのスピントルの蓄積を生じる。

図 1: スピントル効果の描像

【参考文献】

- [1] S. Maekawa *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **82**, 102002 (2013).
- [2] A. Tachibana, J. Math. Chem. **50**, 669-688 (2012).
- [3] A. Tachibana, Electronic Stress with Spin Vorticity. In *Concepts and Methods in Modern Theoretical Chemistry*, S. K. Ghosh and P. K. Chattaraj Eds., CRC Press, Florida (2013), pp 235-251.
- [4] A. Tachibana, J. Comput. Chem. Jpn., **13**, 18 (2014).
- [5] M. Senami, J. Nishikawa, T. Hara, A. Tachibana, J. Phys. Soc. Jpn **79**, 084302 (2010).
- [6] T. Hara, M. Senami, A. Tachibana, Phys. Lett. A. **376**, 1434 (2012).
- [7] M. Fukuda, M. Senami, A. Tachibana, *Progress in Theoretical Chemistry and Physics*, Vol. 27; Eds. M. Hotokka, E. J. Brandas, J. Maruani, G. Delgado-Barrio; Springer, Chapter 7, pp 131-139 (2013).