

ワイル半金属のスピン트로ニクス応用に向けて

[1] 要旨

系の持つトポロジカルな性質をスピン트로ニクス現象に応用し、より効率の良い磁化制御を目指す分野が「トポロジカルスピン트로ニクス」として近年注目されている。本研究では、トポロジカル半金属である強磁性ワイル半金属におけるスピントルクを系統的に導出することに成功した。その結果として、ワイル半金属中では電流によって誘起されるスピン軌道トルク、スピン移行トルクに加えて、電圧によって誘起される電荷誘起スピントルクが生じることが明らかになった。本研究の成果は、ワイル半金属を用いたスピン트로ニクス素子を実現する上で重要な指標になることが期待される。

[2] 本文

スピン트로ニクス分野において、効率的な磁化制御方法の確立は低消費電力デバイスを実現する上で重要な研究課題である。それに対する一つのアプローチとして、系の持つトポロジカルな性質を用いることでより効率的で散逸の少ない磁気制御を実現する試みが、トポロジカルスピン트로ニクスとして近年注目され盛んに研究がなされている。代表的な例は磁性トポロジカル絶縁体であり、スピン偏極した表面状態を用いることで従来の磁性体に比べ小さい電流密度で磁化制御が可能であることが実験により確かめられている。トポロジカル物質では、強いスピン軌道相互作用が引き起こすフェルミ準位近傍での準位交差によりトポロジカルに非自明なバンド構造が実現し、量子スピンホール効果や異常ホール効果などの異常な電磁応答を示す。このトポロジカル相の概念はバルクギャップのない金属相へも拡張され、フェルミ準位近傍で準位が点接触しているワイル半金属相やディラック半金属相などが、3次元トポロジカル半金属相として知られている。ここ数年、酸化物の SrRuO_3 や積層カゴメ格子物質の Fe_3Sn_2 、またホイスラー化合物の $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ 、 Ti_2MnAl 、 Co_2MnGa 、 Co_2MnAl などの強磁性体において、ワイル半金属相が実現していることが ARPES や輸送実験などで確認されている。トポロジカル半金属相に共通する特徴として、不純物散乱などの摂動に対して頑強な金属状態が常に存在することが挙げられる。ワイル半金属では、必ず対で現れる準位交差点（ワイル点）がそれぞれ波数空間上での磁気単極子の N 極と S 極として振る舞い、対消滅しない限りワイル点を取り除くことができない。このため、不純物に影響されにくい高い伝導性を持ち、次世代の低消費電力デバイスや超高速コンピューティングなどへの応用面からも注目を集めている。一方で、その強いスピン軌道相互作用のためワイル半金属中でのスピン輸送は複雑で、多くのことは理解されていない。

最近、理化学研究所のメンバーを中心とした研究グループは、強磁性ワイル半金属におけるスピントルクに注目し理論的な研究を行った。ディラック-ワイル電子系におけるスピントルクは、強いスピン軌道相互作用から生じる「スピン-運動量ロッキング」に基づくものと、系の幾何学位相である「ベリー位相」に基づくものに大きく分けられる。本研究では、場の量子論的法を用いることでこの両者を系統的に導出することに成功している。その結果として、強磁性ワイル半金属中では電流によって駆動されるスピン軌道トルク、スピン移行トルクに加え、電圧印加によって誘起される電荷誘起スピントルクが現れることを明らかにした。さらに、電荷誘起スピントルクはワイル半金属に特有な現象である「カイラル量子異常」により引き起こされる新奇現象であることを解明

した。この成果は、Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)の2021年8月号に掲載された。

一般的には、スピン軌道相互作用がある系では、その低い対称性からスピントルクは複雑な形をとることができ、解析的な表式の導出は困難である。本研究で著者達は、ワイル半金属中における軸性電流と電子スピンの間に一对一の関係があることに着目し、輸送現象としてスピントルクを捉えることで、その解析的な表式の同定に成功している。電氣的に誘起される磁化ダイナミクスは、スピントルクの対称性によって決まる。今回得られた結果はワイル半金属中での磁化ダイナミクスを理解する上で重要な結果である。

また、本研究で調べられた電荷誘起スピントルクは、従来のスピン軌道トルクやスピン移行トルクなどのスピン偏極電流によって誘起されるものとは異なり、電圧によって誘起されるトルクである。そのため、定常電流によるジュール散逸が生じず、従来の手法に比べエネルギー効率が高い磁化の制御が可能である。例えば、図1に示すバックゲート構造素子では、ゲート電圧の制御で磁化のスイッチングが可能であり、新しい磁気メモリー素子などへの応用が期待される。

本研究はスピントロニクス基礎でもあるスピントルクを網羅的に調べたものであり、本研究の成果をもとに強磁性ワイル半金属のスピントロニクス応用に向けた更なる展開が期待される。

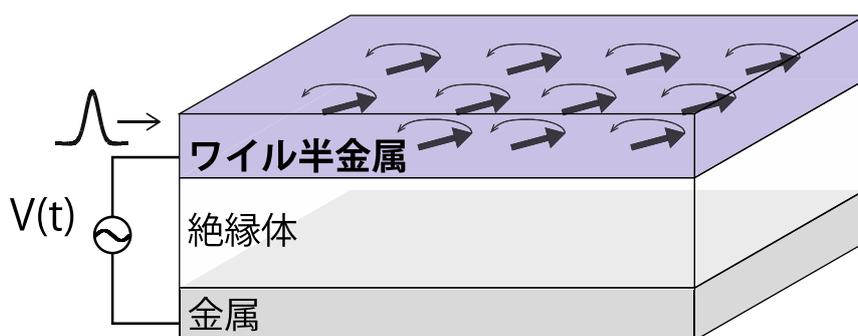


図1：強磁性ワイル半金属を用いた磁気メモリー素子の提案

(D. Kurebayashi and K. Nomura, Phys. Rev. Appl. **6**, 044013 (2016) を改変の上、転載)

原論文 (7月6日公開済)

Microscopic Theory of Electrically Induced Spin Torques in Magnetic Weyl Semimetals

D. Kurebayashi, Y. Araki, and K. Nomura: J. Phys. Soc. Jpn. **90**, 084702 (2021).

<情報提供：紅林大地 (School of Physics, University of New South Wales)

野村健太郎 (東北大学金属材料研究所) >