# 「優秀発表賞(Best Presentation Award: Silver Prize)」を受賞して

電気通信大学基盤理工学専攻　特任研究員
物性研究所・附属国際超科学研究施設　ISSPリサーチフェロー　　山田 暉馨

本年 4 月に京都大学桂キャンパスで行われた学術変革領域研究(A)「1000 テスラ超強磁場による化学的カタストロフィー：非摂動磁場による化学結合の科学」の第三回領域会議にて優秀発表賞(Best Presentation Award: Silver Prize)を頂くことができました。発表内容は「High-field transport in three-dimensional Rashba electron systems」で、最近発表した磁場中輸送の基礎理論[1]を複数バンド系へ拡張した結果についてお話ししました。

スピン軌道相互作用は半導体・半金属中でキャリアの電子状態を変調するバンド間効果の一つで、自由電子に対し空間反転対称を破るような摂動としてこの効果を加えることによりスピン分裂した状態を得ることができます(ラシュバ効果) [2]。またこのようなエネルギー分散を持つ電子系はラシュバ電子系と呼ばれ、通常は半導体ヘテロ界面や金属表面においてよく見られますが[3]、最近では反転対称を破った半導体のバルク状態においてもその存在が見つかっています[4]。

ラシュバ電子系は 2 バンドという極めてシンプルな系ですが、スピン軌道相互作用によるバンド間効果が電子輸送の様子を自由電子とは全く異なるものに変えます。自由電子の磁気伝導度はランダウ量子化した軌道間の遷移に起源をもち、古典的な荷電粒子のサイクロトロン運動への対応付けが可能です。一方ラシュバ電子系の場合、ここにスピン間の遷移による伝導度が加わりますが、これは量子論を考慮することで初めて登場する変わり種です。

今回 3 次元ラシュバ電子系の磁気伝導度テンソルに含まれる軌道遷移項・スピン遷移項すべてを解析的に計算してみました。するとスピン軌道相互作用が大きいとき、スピン遷移が軌道遷移を凌駕し、ホール伝導度の符号を反転させることが分かりました。さらに興味深いのは強磁場におけるふるまいです。スピン軌道相互作用が大きい場合でも、これに拮抗するエネルギーの磁場を印加することで軌道遷移が優勢となり、自由電子由来のホール伝導度に移り変わることを発見しました。

ラシュバ電子系は、低エネルギー領域にのみ注目するとスピン軌道相互作用の強い極限であるディラック電子に似た線形分散を持ちますが、高エネルギー領域まで見渡すと(エネルギー分散を遠目から見ると)自由電子のように見えます。言い換えると、スピンの影響は低エネルギー領域に限定されており、そのスケールを超える磁場によって自由電子のふるまいを顕在化させることができるのです。これとよく似た効果にパッシェン・バック効果があります。原子軌道がスピン軌道相互作用を受けると、準位間の混ざりあいによって微細構造を形成しますが、強磁場下ではこの混ざりあいが顕著ではなくなり、ピュアな磁気モーメント由来の分裂のみが観測されます[5]。バンド電子のホール効果と原子軌道間の励起という全く異なる現象について、スピン軌道相互作用に対する磁場効果が同様の振る舞いを示すというのは大変興味深く、磁場を通して一見とらえどころのない相互作用の普遍的な一面を垣間見た気がしました。

領域会議にて贈られた賞状

ラシュバ電子系は今や物性物理において知らぬ人のないほど有名になっていますが、ラシュバの原論文[2]を手に入れるのはさほど簡単でないことに気づきました。このご時世にこれほど有名な論文がインターネット上で閲覧困難であるとこに驚きましたが、ありがたいことに物性研図書館の書庫で蔵書を見つけることができました。製本された論文集はラシュバのページが特にボロボロで、本から切り取られて封入されていたのが印象的でした。1950~70 年代のソビエトの物性論文は先駆的なアイデアの宝庫で、物性研図書館の充実したアーカイブには常に助けられました。この場を借りて御礼申し上げます。

結びになりますが、2024 年 10 月をもちまして 2 年余りお世話になった物性研を離れ、神戸大学理学研究科に異動する運びとなりました。強磁場施設との出会いを与えてく

ださった徳永将史先生、学術変革領域のメンバーに採用してくださった松田康弘先生には返しきれないご恩を賜りました。共同研究や研究会などでお世話になる際はお力になれるよう頑張ってまいりますので、今後とも何卒よろしくお願い致します。また、この度神戸大学理学研究科教授にご栄転される伏屋雄紀先生とは早くも 5 年余りのお付き合いとなりました。本受賞の研究は電気通信大時代の伏屋研究室における議論から発展したものです。学部 4 年の時に知った電子輸送理論の奥深さと感動を現在も味わうことができることを大変有難く思います。今後ともご指導のほど何卒よろしくお願い致します。徳永研の近藤助教、阪大花咲研の村川助教からは 3 次元ラシュバ電子系物質の輸送実験に関して貴重なご意見を頂戴することができました。磁場中輸送の実験について今後ともお二人にはアドバイスを仰ぐ場面も多いかと思いますが、何卒よろしくお願い致します。

**（参考文献）**

[1] A. Yamada and Y. Fuseya, J. Phys.: Condens. Matter 36, 245702 (2024).
[2] E. I. Rashba, Fiz. Tverd. Tela 2, 1224 (1960).
[3] G. Bihlmayer, et al., New J. of Phys. 17 (2015).
[4] K. Ishizaka, et al., Nat. Mater. 10, 521–526 (2011).
[5] F. Paschen and E. Back, Physica 1, 261 (1921).