

量子状態の高度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出
2018年度採択研究代表者

2020年度 年次報告書

永長 直人

東京大学 大学院工学系研究科
教授

ナノスピン構造を用いた電子量子位相制御

§ 1. 研究成果の概要

創発電磁場を示す最もミクロな系としてのスピנקラスタが伝導電子を散乱する過程で生じる物性に関して研究を進めた。具体的には、キラル磁性体においてスピнкаイラリティのゆらぎ成分が伝導電子に対して強い散乱体として振舞い、巨大なホール効果や伝導度の非線形性/非相反性を生み出すことが、理論グループによって示されていたが、実際に高品質の MnGe エピタキシャル薄膜において、従来のホール伝導度をはるかに凌駕する巨大なホール伝導度(約 $40,000 \text{ } \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$)を観測した。また、らせん磁性体において交流電流によって生じる創発電場が、電流の時間微分に比例する電圧降下をもたらすこと、つまりインダクタとして働くことが理論的に示されていた。この予言に対して、RKKY相互作用による様々な短周期スピン構造を示す、ブリージングカゴメ格子を有する希土類化合物 $\text{Gd}_3\text{Ru}_4\text{Al}_{12}$ の単結晶を、収束イオンビーム(FIB)を用いて $1 \mu\text{m}$ オーダーの直方体の素子に微細加工し、温度と磁場を変えながらインダクタンスの大きさを評価した。その結果、らせん磁気相や縦型コニカル相といった非共線的な磁気相では、大きなインダクタンスが生じ、その値は数百ナノヘンリー程度であることを見出した。この値は一般的に使われているインダクタンス値に匹敵する大きさだが、この素子の体積は、従来型の小型インダクタンスと比べて 100 万分の 1 程度であり、微細化に向けて大きな進歩となった。さらに、ダイオード機能に関しては、従来の実空間のスピン構造だけでなく、運動量空間におけるスピン構造へと着眼点を変えて新しいアプローチを試みた。具体的には、トポロジカル絶縁体の表面状態に磁性不純物をドーピングし、量子化異常ホール状態を実現した上で、そこにキャリアをドーピングして表面状態とエッジ状態の伝導が共存する状況を用意した。この時に、両者の間の散乱過程に非相反性が生じることを予測し、実際に 10 数%におよぶ非相反電気抵抗を観測した。

§ 2. 研究実施体制

(1) 永長グループ

- ① 研究代表者: 永長直人(東京大学工学系研究科 教授/理化学研究所創発物性科学研究センター 副センター長)
- ② 研究項目
 - ・ナノスピン構造生成と電子位相制御の理論

(2) 十倉グループ

- ① 主たる共同研究者: 十倉好紀(東京大学工学系研究科 教授/理化学研究所創発物性科学研究センター センター長)
- ② 研究項目
 - ・ナノスピン構造物質創製と磁気構造観察

(3) 賀川グループ

- ① 主たる共同研究者: 賀川史敬(東京大学工学系研究科 准教授)
- ② 研究項目
 - ・動的創発電磁場の検出とその機能開拓

【代表的な原著論文情報】

- [1] W. Koshibae and N. Nagaosa, “Bulk and surface topological indices for a skyrmion string: current-driven dynamics of skyrmion string in stepped samples”, *Scientific Reports* 10, 20303 (2020).
- [2] Xiuzhen Yu, Jan Masell, Fehmi S. Yasin, Kosuke Karube, Naoya Kanazawa, Kiyomi Nakajima, Takuro Nagai, Koji Kimoto, Wataru Koshibae, Yasujiro Taguchi, Naoto Nagaosa, and Yoshinori Tokura, “Topological Defects in Extended Skyrmion-Strings” *Nano Lett.* 20, 7313–7320 (2020).
- [3] Kosuke Karube, Licong Peng, Jan Masell, Xiuzhen Yu, Fumitaka Kagawa, Yoshinori Tokura, Yasujiro Taguchi, “Room-temperature antiskyrmions and sawtooth surface textures in a non-centrosymmetric magnet with S4 symmetry”, *Nat. Mater.* 20, 335-340 (2021).
- [4] Junyeong Ahn, Guang-Yu Guo, and Naoto Nagaosa “Low-Frequency Divergence and Quantum Geometry of the Bulk Photovoltaic Effect in Topological Semimetals” *Phys. Rev. X* 10, 041041 (2020).
- [5] Enze Zhang, Xian Xu, Yi-Chao Zou, Linfeng Ai, Xiang Dong, Ce Huang, Pengliang Leng, Shanshan Liu, Yuda Zhang, Zehao Jia, Xinyue Peng, Minhao Zhao, Yunkun Yang, Zihan Li, Hangwen Guo, Sarah J. Haigh, Naoto Nagaosa, Jian Shen, and Faxian Xiu, “Nonreciprocal superconducting NbSe₂ antenna” *Nature Communications* 11, 5634 (2020).
- [6] X. Z. Yu, D. Morikawa, K. Nakajima, K. Shibata, N. Kanazawa, T. Arima, N. Nagaosa, and Y. Tokura, “Motion tracking of 80-nm-size skyrmions upon directional current injections”, *Sci. Adv.* 6, eaaz9744 (2020).
- [7] Yukako Fujishiro, Naoya Kanazawa, Ryosuke Kurihara, Hiroaki Ishizuka, Tomohiro Hori, Fehmi Sami Yasin, Xiuzhen Yu, Atsushi Tsukazaki, Masakazu Ichikawa, Masashi Kawasaki, Naoto Nagaosa, Masashi Tokunaga, and Yoshinori Tokura, “Giant anomalous Hall effect from spin-chirality scattering in a chiral magnet” *Nat. Commun.* 12, 317 (2021).
- [8] M. Hirschberger, L. Spitz, T. Nomoto, T. Kurumaji, S. Gao, J. Masell, T. Nakajima, A. Kikkawa, Y. Yamasaki, H. Sagayama, H. Nakao, Y. Taguchi, R. Arita, T. Arima, and Y. Tokura, “Topological Nernst Effect of the Two-Dimensional Skyrmion Lattice”, *Phys. Rev. Lett.* 125, 076602 (2020).
- [9] N. Ogawa, L. Köhler, M. Garst, S. Toyoda, S. Seki, and Y. Tokura, “Nonreciprocity of spin waves in the conical helix state”, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 118, e20222927118 (2021).
- [10] K. Yasuda, T. Morimoto, R. Yoshimi, M. Mogi, A. Tsukazaki, M. Kawamura, K. S.

- Takahashi, M. Kawasaki, N. Nagaosa, and Y. Tokura, “Large non-reciprocal charge transport mediated by quantum anomalous Hall edge states”, *Nat. Nanotechnol.* 15, 831-835 (2020).
- [11] T. Yokouchi, F. Kagawa, M. Hirschberger, Y. Otani, N. Nagaosa, and Y. Tokura. “Emergent electromagnetic induction in a helical-spin magnet”, *Nature* 586, 232-236 (2020).