

トポロジカル材料科学に基づく革新的機能を有する材料・デバイスの創出
2019年度採択研究代表者

2021年度 年次報告書

松田 祐司

京都大学 大学院理学研究科
教授

量子スピン液体におけるトポロジカル準粒子の解明と直接検出

§ 1. 研究成果の概要

物質のもつトポロジーに由来して創発されるマヨラナ粒子と非可換エニオンは、環境ノイズに強いトポロジカル量子計算を実現するための鍵となる準粒子である。本研究課題では、これら準粒子の舞台となるKitaev・量子スピン液体状態にある磁性体においてトポロジーに関する性質を徹底的に解明し、これを母体とした新しい電子相を創出する。さらに創発準粒子の直接検出と可視化により、トポロジカル量子計算の基盤技術を確立する。

本研究に先立ち、研究代表者のグループでは世界に先駆けてKitaev・量子スピン液体物質 α - RuCl_3 において半整数熱量子ホール効果を観測した [Y. Kasahara *et al.*, *Nature* (2018)]。本年度は、半整数熱量子ホール効果および比熱の磁場角度依存性を詳細に調べた。その結果、面内磁場下における半整数熱量子ホール効果 (Planar 熱量子ホール効果) の観測に初めて成功し、熱ホール効果測定から決定されたトポロジカル不変量 (チャーン数) ならびに比熱測定から決定されたマヨラナ・ギャップの磁場方向依存性は、理想的な理論模型 (Kitaev 模型) から期待されるふるまいとほぼ一致することが明らかになった [T. Yokoi *et al.*, *Science* (2021)]。さらに、半整数熱量子ホール効果が消失する高磁場領域において、比熱が面内磁場角度に対して 2 回対称性を示し、結晶の 6 回対称性を自発的に破るネマティック状態が実現していることが明らかとなった [O. Tanaka *et al.*, *Nature Physics* (2022)]。トポロジカル・チャーン数の決定は中間目標のベンチマークとなる成果であり、ネマティック状態は当初予定にない新しい発見である。

以上の実験的研究成果を受けて理論研究を展開し、磁場誘起ネマティック状態の実現可能性が示されるとともに、量子計算のエラー補正モデルのひとつであるトリーク・コード状態への相転移の可能性を指摘した [M. O. Takahashi *et al.*, *Physical Review Research* (2021)]。さらに、磁場によって誘起されるトリーク・コード状態の存在を明らかにする手法として、核磁気共鳴やメスバウアー効果による新しい手法を理論的に提案した [M. G. Yamada *et al.*, *Physical Review Letters* (2021)]。

§ 2. 研究実施体制

(1) 松田グループ

- ① 研究代表者: 松田 祐司 (京都大学 大学院理学研究科 教授)
- ② 研究項目
 - ・ 熱ホール効果の磁場角度依存性測定による α -RuCl₃ におけるトポロジカル・チャーン数の角度依存性の同定
 - ・ MBE, PLD, スコッチテープ法による α -RuCl₃ 原子層薄膜の作製
 - ・ 不純物置換・電子線照射した系における熱ホール効果測定
 - ・ 元素置換、電界効果、近接効果によるキャリアドープと新奇電子相の探索
 - ・ 単層 α -RuCl₃/金属ヘテロ接合における STM/STS 測定による非可換エニオンの直接検出と可視化
 - ・ 磁場誘起トポロジカル量子相転移の熱膨張率、磁気トルク、熱輸送測定による探索

(2) 芝内グループ

- ① 主たる共同研究者: 芝内 孝禎 (東京大学 大学院新領域創成科学研究科 教授)
- ② 研究項目
 - ・ 比熱および磁気トルクの角度依存性測定によるチャーン数の精密な決定
 - ・ 電子線照射ならびに不純物効果の実施
 - ・ 電子線照射・不純物置換に対するキタエフ・量子スピン液体状態の安定性の検証
 - ・ 元素置換、電界効果、照射効果によるキャリアドープと新奇電子相の探索
 - ・ 極低温比熱の磁場角度依存性測定による高磁場ネマティック状態の解明
 - ・ マイクロ波によるカイラル・マヨラナ・エッジ流の検出

(3) 藤本グループ

- ① 主たる共同研究者: 藤本 聡 (大阪大学 大学院基礎工学研究科 教授)
- ② 研究項目
 - ・ 非キタエフ相互作用を考慮した理論モデルの構築
 - ・ 不純物効果の検証
 - ・ キャリアドーピングに対する相図の理論的考察
 - ・ 非可換エニオンの検出法の理論提案
 - ・ 高磁場ネマティック状態の理論的考察

【代表的な原著論文情報】

- 1) T. Yokoi *et al.*, “Half-integer quantized anomalous thermal Hall effect in the Kitaev material candidate α -RuCl₃”, *Science*, vol. 373, pp.568–572, 2021
- 2) O. Tanaka *et al.*, “Thermodynamic evidence for a field-angle-dependent Majorana gap in a Kitaev spin liquid”, *Nature Physics*, 2022

- 3) M. O. Takahashi *et al.*, “Topological nematic phase transition in Kitaev magnets under applied magnetic fields”, *Physical Review Research*, vol. 3, 023189, 2021
- 4) M. G. Yamada *et al.*, “Electric Probe for the Toric Code Phase in Kitaev Materials through the Hyperfine Interaction”, *Physical Review Letters*, vol. 127, 047201, 2021