

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

2022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

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)

藤本 聡 (大阪大学 基礎工学研究科 教授)

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、トポジカル量子計算の基盤技術を確立する。

Kitaev・量子スピン液体物質 α - RuCl_3 において、マヨラナ粒子と非可換エニオンの存在を示す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を明らかにした。このことは高磁場においてトポジカル相転移が起きていることを示しており、今年度はさらに高磁場領域について比熱、熱伝導率による詳細な研究を行った。その結果、半整数熱量子ホール効果が消失する磁場において熱伝導率、比熱に1次転移的な異常が観測され、相転移が起きていることが明らかとなった。¹⁾ さらに半整数熱量子ホール効果に関して試料依存性の詳細な研究を行い、欠陥の少ない高純度試料においてのみ半整数量子化が観測され、量子化に不純物散乱および非Kitaev相互作用が影響を及ぼしていることが示唆された。²⁾ これらの成果はマヨラナ粒子および非可換エニオンの安定的性に関して重要な情報を与えるものである。

非可換エニオンの直接検出手法としてKitaev・量子スピン液体物質の走査型トンネル顕微鏡 (STM) 測定が提案され、その実験的実証に取り組んでいる。STM 測定には金属基板上にKitaev・量子スピン液体物質の単原子層膜を積層する必要があるが、パルスレーザー堆積法による α - RuCl_3 単原子層の作製に世界で初めて成功した。さらに作製条件探索の過程で α - RuCl_3 の結晶多形である β - RuCl_3 の単原子層膜の作製にも成功し、STM 測定を行った。その結果、薄膜成長過程において幅数 nm、長さ数 μm のナノワイヤが形成され、非平衡過程に特徴的なチューリング・パターンと類似したパターン形成することが明らかとなった。このようなナノワイヤ・パターン形成は原子スケールでは前例のないものである。³⁾

また、非可換エニオンの交換操作に対する数値シミュレーションを行い、非可換統計性は時間反転を破る磁場に対して堅牢であるのに対し、不均一ポテンシャルの下では非可換統計性が保たれない場合があることが明らかとなった。⁴⁾

【代表的な原著論文情報】

- 1) S. Suetsugu *et al.*, “Evidence for a Phase Transition in the Quantum Spin Liquid State of a Kitaev Candidate α - RuCl_3 ”, *Journal of the Physical Society of Japan.*, vol. 91, 124703, 2022
- 2) Y. Kasahara *et al.*, “Quantized and unquantized thermal Hall conductance of the Kitaev spin liquid candidate α - RuCl_3 ”, *Physical Review B*, vol. 106, L060410, 2022
- 3) T. Asaba *et al.*, “Growth of self-integrated atomic quantum wires and junctions of a Mott semiconductor”, *Science Advances*, vol. 9, abq5561, 2023
- 4) Y. Tanaka *et al.*, “Manipulation of Majorana-Kramers qubit and its tolerance in time-reversal invariant topological superconductor”, *Physical Review B*, vol. 106, 014522, 2022