

2023 年度年次報告書

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

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

キタエフ量子スピン液体物質 α -RuCl₃ において、熱ホール効果と比熱の面内磁場角度依存性の精密測定を行い、熱ホール効果の符号反転とディラック・コーン型エネルギー分散を有するギャップレス状態の出現が、蜂の巣格子のアームチェア方向への平行磁場中で同時に起こることを明らかにした。熱ホール効果の起源はマヨラナ粒子とボゾンと相反するもので議論となっていたが、本研究成果により、量子化の有無に関わらず熱ホール効果がマヨラナ粒子起源であることが明らかとなった¹⁾。

さらに電子線照射によりキタエフ量子スピン液体における不純物効果を調べ、点欠陥の導入により反強磁性転移が抑制される一方、マヨラナ粒子の励起ギャップはほとんど変化しないことを明らかにした。また、低温比熱にべき乗の温度依存性が観測され、マヨラナ粒子のインギャップ状態が形成されることが明らかとなった。以上の成果により、理論的に提唱されていたマヨラナ粒子のアンダーソン局在現象が実現していることを明らかにした²⁾。

欠陥間のスピン相関が減衰することなく長距離であり、分数化に伴う非局所性を示すことを明らかにした。そして非可換エニオン検出の新手法として、非局所コンダクタンス測定を提案した³⁾。電気的中性である非可換エニオンの電氣的検出・制御手法の新しい提案であり、現実物質と組み合わせることによってトポロジカル量子計算への発展が期待される。

キタエフ量子スピン液体の研究と並行してトポロジカル物質候補であるカゴメ格子金属 CsV₃Sb₅ およびスピン三重項超伝導体 UTe₂ の研究を行った。CsV₃Sb₅ では回転対称性ならびに時間反転対称性の破れた奇パリティネマティック秩序を伴う電荷密度波状態の実現を明らかにした⁴⁾。UTe₂ ではヘリウム 3 と類似した強いトポロジカル超伝導状態の実現を明らかとし、試料表面全面にマヨラナ表面状態の出現が期待される⁵⁾。

【代表的な原著論文情報】

- 1) K. Imamura *et al.*, “Majorana-fermion origin of the planar thermal Hall effect in the Kitaev magnet α -RuCl₃”, *Science Advances*, vol. 10, adk3539, 2024
- 2) K. Imamura *et al.*, “Defect-Induced Low-Energy Majorana Excitations in the Kitaev Magnet α -RuCl₃”, *Physical Review X*, vol. 114, 011045, 2024
- 3) M. O. Takahashi *et al.*, “Nonlocal Spin Correlation as a Signature of Ising Anyons Trapped in Vacancies of the Kitaev Spin Liquid”, *Physical Review Letters*, vol. 131, 236701, 2023
- 4) T. Asaba *et al.*, “Evidence for an odd-parity nematic phase above the charge-density-wave transition in a kagome metal”, *Nature Physics*, vol. 20, 40-46, 2024
- 5) S. Suetsugu *et al.*, “Fully gapped pairing state in spin-triplet superconductor UTe₂”, *Science Advances*, vol. 10, adk3772, 2024