

松田 祐司

京都大学理学研究科
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調べた。その結果、トポロジーに関する性質を決定づけるトポロジカル不変量ならびに熱力学量の磁場方向依存性は、理想的な理論モデル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てきた。さらに詳細な研究を進めることで、現実物質におけるマヨラナ粒子や非可換エニオンの安定性が明らかになると期待される。

本年度は並行して2次元三角格子を持つ量子スピン液体の候補物質である $1T\text{-TaS}_2$ の研究も行った。三角格子における量子スピン液体の研究は四半世紀にわたるが、その準粒子励起ならびにランダムネスの効果は長年の未解決問題であった。本研究では極低温における熱伝導度および比熱測定を行い、その結果、絶縁体であるにも関わらず金属的な熱的性質を示すことが明らかになった。さらにランダムネス効果を系統的に調べることにより、準粒子励起として遍歴的なスピノン励起と一重項を形成する局在孤立スピン励起が共存して現れることを示した(図)。以上の成果はさまざまな量子スピン液体状態の理解を深化させるものである [1]。

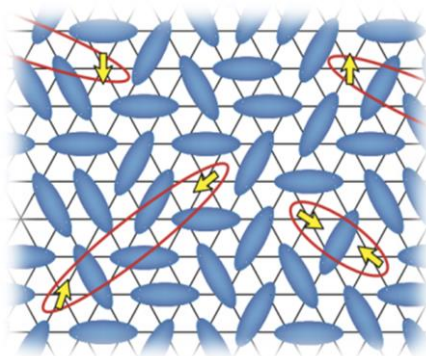


図:1T-TaS₂の量子スピ液体状態におけるスピ励起の概念図。局在励起をもたらす孤立スピン(黄矢印)によるランダムシングレット状態(赤楕円)と遍歴励起をもたらすスピ液体状態(青楕円)が共存する。

【代表的な原著論文】

1. H. Murayama, Y. Sato, T. Taniguchi, R. Kurihara, X. Z. Xing, W. Huang, S. Kasahara, Y. Kasahara, I. Kimchi, M. Yoshida, Y. Iwasa, Y. Mizukami, T. Shibauchi, M. Konczykowski, Y. Matsuda, “Effect of quenched disorder on a quantum spin liquid state of triangular-lattice antiferromagnet 1T-TaS₂”, Phys. Rev. Research, vol. 2, 013099, 2020

§ 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ブ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

(2) 芝内グループ

- ① 主たる共同研究者: 芝内 孝禎 (東京大学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ブと新奇電子相の探索

(3) 藤本グループ

- ① 主たる共同研究者: 藤本 聡 (大阪大学基礎工学研究科、教授)
- ② 研究項目
 - ・ 非キタエフ相互作用を考慮した理論模型の構築
 - ・ 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