

## 強相関量子凝縮相における回転対称性の破れの検証

Rotational symmetry breaking in strongly correlated quantum matters

課題番号：18H05227

松田 祐司（MATSUDA, YUJI）

京都大学・大学院理学研究科・教授



### 研究の概要（4行以内）

近年、様々な強相関物質において、結晶格子の回転対称性を自発的に破る電子ネマティック状態が発見されつつある。本研究では、強相関電子系と量子スピン液体に対し、超高精度で回転対称性の破れを検出できる装置を開発するなど、世界に例を見ないユニークな測定を組み合わせることにより、強く相互作用する量子凝縮体の研究にブレークスルーをもたらすことを目指す。

研究分野：数物系科学、磁性、超伝導、強相関電子系

キーワード：ネマティック状態、BCS-BEC クロスオーバー、量子スピン液体

### 1. 研究開始当初の背景

近年、銅酸化物高温超伝導体、鉄系高温超伝導体に代表される様々な強相関電子系において、結晶格子の回転対称性を自発的に破る電子ネマティック状態が発見されつつある。この状態の解明は、擬ギャップ形成、非従来型超伝導、隠れた秩序、量子臨界点などの長年にわたる凝縮系物理学の大問題と密接に関わっている。さらに絶縁体量子スピン液体では、量子力学的にエンタングルメントした状態が実現され、トポロジカル秩序や分数化された準粒子励起などを持つ基底状態が実現されていることが予想され、新しい量子凝縮体として大きな注目を集めている。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、回転対称性の破れを検出できる様々な装置を開発し、強相関電子系における回転対称性の破れを解明する。特に、銅酸化物高温超伝導体の擬ギャップ状態において、電子の回転対称性が破れた状態が実現しているかどうかを、熱力学的手法で解明する。次に、鉄系超伝導体において磁気秩序を伴わない、ネマティック量子臨界点近傍においてネマティック臨界揺らぎが電子にどのような影響を与えるかを解明する。さらに、FeSe 系はこれまで冷却原子でしか実現できなかったBCS-BEC クロスオーバー領域にあることがわかっているが、このような系の超伝導状態に強磁場をかけスピン不均衡状態を創り出し新奇超伝導状態が実現するかどうかを解明する。

さらに量子スピン液体状態において、超低温においてどのような準粒子励起が存在するかを研究する。特に、準粒子の分数化に関連したエキゾチックな励起の存在を解明したい。さらに、キタエフ・スピン液体においてスピンの分割によって創発されるマヨラナ準粒子と非可換エニオンの検出を行う。

### 3. 研究の方法

強相関電子系における回転対称性の破れの検証では、50mK から 400 K までの広範囲の温度域でカンチレバーを用いた磁気トルク測定を行うことのできる装置を開発し、銅酸化物高温超伝導体の擬ギャップ状態における回転対称性の破れの熱力学的検証実験を行う。さらに、ピエゾ素子を用いて結晶にひずみを与えたときの、電気抵抗の変化を精密に測定することにより、ネマティック感受率を決定する。また鉄系超伝導体 FeSe において、ネマティック量子臨界点近傍での輸送現象と超伝導ギャップ構造を調べ、ネマティック臨界揺らぎの電子状態に与える効果を詳細に調べる。

絶縁体量子スピン液体の研究では、熱伝導測定は、遍歴的なスピン励起を検出することができ、スピノンなどの分数化した準粒子励起を検出することが可能となる。さらに熱ホール効果測定は、ベリー位相やトポロジカルな励起と密接に関係したエキゾチックな準粒子励起の検出を可能にする。これらの測定により、量子スピン液体から励起されると予言されている、スピノン、モノポール、フ

ォトン、マヨラナ粒子などの、様々なエキゾチック準粒子を検出し、量子力学的にエンタングルメントした系からのトポロジカル励起や対称性の破れなどの研究を行う。

#### 4. これまでの成果

銅酸化物高温超伝導体の研究では、Y123 と Hg1201 系化合物のアンダードープ領域において、超高精度で磁気トルクの面内磁場角度回転依存性の測定を行い、擬ギャップ形成が銅酸化物に普遍的な回転対称性を破る相転移現象である事の決定的証拠を示した。さらに驚くべきことに、Y123 と Hg1201 ではネマティシティの起こる方向が 45 度異なっており、これは CuO<sub>2</sub> 層の数の違いに由来する可能性を示唆した。さらに、Bi2212 でも、ネマティック感受率測定によりネマティック量子臨界点が存在する可能性を示した。

鉄系超伝導体 FeSe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub> では、x=0.18 でネマティック転移がゼロとなる量子臨界点を持つ。この臨界点において、大きな臨界ネマティック揺らぎが観測され超伝導対称性が劇的に変わることを明らかにした。さらに強磁場中のノーマル状態の輸送現象が、ネマティック揺らぎにより非フェルミ流体的な振舞いを示すことも明らかにした。このことはネマティック臨界揺らぎが電子系に劇的な影響を与えていることを示している。

鉄系超伝導体 FeSe は、冷却原子でしか実現できなかった BCS-BEC クロスオーバー領域にある初めての超伝導体であることが明らかになっている。我々は、オランダのナイメーゲン強磁場センターにおいて、0.3 K、32 T まで熱伝導測定ができる装置を開発し、超強磁場中で低磁場とは異なる超伝導相が存在することを示した。この相は、大きなスピン不均衡を持つ新奇超伝導相である。

近藤絶縁体 YbB<sub>12</sub> において絶縁体であるにもかかわらず強磁場中で磁化だけでなく電気抵抗にも量子振動が現れることを発見した。さらに、YbB<sub>12</sub> の熱伝導度を極低温において測定した結果、絶縁体であるにもかかわらず金属のような有限の残留熱伝導度が観測された。これは量子スピン液体と類似した現象であり、何らかの中性のフェルミオン励起がこの系に存在していることを示している。古くから知られている近藤絶縁体に、多くの謎があることが明らかとなった。

量子スピン液体は、量子力学的に強くエンタングルメントした状態をもち、トポロジカル秩序と分数化された準粒子励起がそれを解く鍵となる。2 次元三角格子と 3 次元パイロクロア構造をもつ 1T-TaS<sub>2</sub> と Pr<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> において極低温熱伝導度と比熱測定を行った。1T-TaS<sub>2</sub> では絶縁体であるにもかかわらず、有限の比熱係数と残留熱伝導度が観測されスピノン励起による遍歴励起が存在することが示された。さらに Pr<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> では、100 mK

以下において熱伝導が異常に大きくなる現象が観測され、これがトポロジカル励起であるフォトン励起である可能性を示した。

キタエフ・スピン液体候補物質である  $\alpha$ -RuCl<sub>3</sub> において熱ホール効果が半整数値に量子化されることを発見した。これはマヨラナ粒子と非可換エニオンの存在を直接示すものであり、これは分数量子ホール効果における電荷の分数化と同様にスピンの分数化の証拠を与える。さらに、 $\alpha$ -RuCl<sub>3</sub> のトポロジカルチャーン数の決定にも成功している

#### 5. 今後の計画

開発した装置を用いてネマティック電子状態の研究を銅酸化物高温超伝導体のアンダードープ域や Ir 酸化物などに対して系統的に行う。さらに FeSe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub> 系において、ネマティック臨界揺らぎの輸送現象に与える影響を詳細に研究する。また BCS-BEC クロスオーバー領域の新奇超伝導相を様々な手法で解明する。量子スピン液体の研究では、 $\alpha$ -RuCl<sub>3</sub> 以外のキタエフスピン液体候補物質の熱ホール効果を測定する。さらにトンネル顕微鏡を用いてネマティック電子状態や非可換エニオンの直接観測などにも挑戦する。

#### 6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

1) S. Kasahara *et al.* "Evidence for an FFL0 state with segmented vortices in the BCS-BEC-crossover superconductor FeSe" *Phys. Rev. Lett.* **124**, 107001 (2020).

2) H. Murayama *et al.* "Diagonal nematicity in the pseudogap phase of HgBa<sub>2</sub>CuO<sub>4+δ</sub>" *Nature Commun.* **10**, 3282 (2019).

\* Editors' Highlights

3) Y. Sato *et al.* "Unconventional thermal metallic state of charge-neutral fermions in an insulator" *Nature Phys.* **15**, 954 (2019)

4) S. Licciardello, *et al.* "Electrical resistivity across a nematic quantum critical point" *Nature* **567**, 213 (2019).

5) Z. Xiang *et al.* "Quantum oscillations of electrical resistivity in an insulator" *Science* **362**, 65 (2018).

他 15 報

国際会議招待講演 24 回

受賞

H. Kamerlingh Onnes Prize August 2018

文部科学大臣表彰・科学技術賞 2019 年 4 月

#### 7. ホームページ等

<http://kotai2.scphys.kyoto-u.ac.jp/index.php>