

## 別紙 4

報告番 -	※ 甲 第 号
----------	---------

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目 Theory of edge induced quantum critical phenomena  
in strongly correlated system  
(強相関電子系における表面誘起量子臨界現象の理論)

氏 名 松原 舜

## 論 文 内 容 の 要 旨

電子間のクーロン相互作用の効果が大きい強相関電子系では、スピンの相関であるスピン揺らぎによって超伝導や回転対称性を破るネマティック秩序など、多様な現象が生じる。一方で、物質の表面や不純物などの並進対称性を破る実空間構造は、フリーデル振動によって状態密度の変調をもたらす。また、d波超伝導体の(1,1)エッジにはアンドレーエフ束縛状態が形成され、フェルミ準位の状態密度が顕著に増加する。このような状態密度の増加は電子相関を増強するため、実空間構造の効果はバルクでは見られない新奇現象の宝庫となる可能性がある。

申請者は、実空間構造が電子相関に及ぼす影響を明らかにし、表面特有の現象の提案を行うため、バルク d 波超伝導状態下の銅酸化物超伝導体  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (YBCO)を想定した 2 次元ハバードモデルに(1,1)エッジを導入した。そして、スピン感受率の空間依存性を求めるため、実空間の乱雑位相近似 (RPA)、揺らぎ交換近似 (FLEX 近似) による計算を行った。その結果、アンドレーエフ束縛状態が、エッジにおいて強磁性揺らぎを著しく発達させるという結果を得た。これは、トリプレット超伝導の出現に有利な状態である。

次に申請者は、エッジに生じるトリプレット超伝導を解析するために、バルク d 波超伝導ギャップ存在下の線形化トリプレットギャップ方程式を構築した。偶周波数超伝導を仮定して解析した場合には、エッジに局在した p 波超伝導の解が得られ、時間反転対称性の破れた「表面 d+ip 波状態」が実現することが分かった。一方で、ギャップ関数の振動数依存性まで考慮した解析では、奇周波数 s 波超伝導の解が得られ、時間反転対称性を保った「表面 d+sodd 波状態」が実現し、この時エッジに沿って自発スピン流が生じるという結果を得た。また、磁気臨界点近傍では、奇周波数 s 波超伝導の方が p 波超伝導より起こりやすいことが分かった。以上の研究により、強相関電子系の表面は、電子相関の増強や、偶周波数 p 波超伝導、奇周波数 s 波超伝導などの多彩な現象を誘起することが予言された。

一方で近年、鉄系超伝導体のネマティック秩序が活発に研究されている。特に、FeSeは磁気秩序を伴わずにネマティック秩序が生じることから、ネマティック秩序と超伝導の関係を議論するのに適した物質であると考えられ注目を集めている。実験的にはARPESによって、鉄系超伝導体FeSeのネマティック秩序下でのY点電子面の消失が報告されている。理論としては、スピン揺らぎ間の量子干渉効果を取り扱うDensity-Wave (DW)方程式のxz,yz軌道に対する解析が行われており、 $\Gamma$ 点、X点のフェルミ面は実験と整合するが、Y点の電子面は消失しない。そこで申請者は、xz,yz軌道に加えてxy軌道を考慮したDW方程式を解析した。その結果、xz,yz軌道の分極に加え、xy軌道のボンド秩序が得られ、Y点電子面が消失する結果を得た。さらに、Luttinger-Ward理論に基づいた自由エネルギーの解析から、xz,yz軌道の分極とxy軌道のボンド秩序の相対位相が、バンドギャップを生じるように決定されているという結果を得た。以上より、FeSeのネマティック秩序を、量子干渉効果によってフェルミ面のリフシツツ転移まで含めて説明した。

以上のように申請者は、強相関電子系の表面に誘起される多彩な超伝導状態の出現を理論的に提案した。今回提案した表面誘起超伝導は、バルクでは実現が難しい奇周波s波超伝導や偶周波p波超伝導を実現させる方法の1つになると考えられる。また、開発された実空間での解析やバルクのネマティック秩序の理解は、実空間誘起のネマティック秩序などの新奇現象の解析への応用が期待出来る。