

氏 名 鈴木 健太

授与した学位 博士

専攻分野の名称 理学

学位授与番号 博甲第4546号

学位授与の日付 平成24年 3月23日

学位授与の要件 自然科学研究科 先端基礎科学専攻

(学位規則第5条第1項該当)

学位論文の題目 Vortex states in superconductors with strong paramagnetic effects based on the Eilenberger theory

(Eilenberger 理論による常磁性効果の強い超伝導体における渦糸状態の研究)

論文審査委員 教授 市岡優典 教授 大嶋孝吉 教授 鄭国慶 准教授 岡田耕三

学位論文内容の要旨

重い電子系超伝導体、特に CeCoIn_5 を念頭に置き、超伝導渦糸状態において強い常磁性効果がもたらす特異現象の解明を中心に理論研究を行なった。

常磁性効果が顕著な高磁場領域から常磁性効果の弱い低磁場領域までの広い磁場領域での渦糸状態を定量的に理論評価するため、微視的理論である準古典 Eilenberger 理論を用い、渦糸状態の空間構造を正確に決めた上で、物性の数値解析を行うとともに、計算結果と実験結果との比較・検討を行なった。これによって、超伝導発現機構に深く関係する超伝導対称性や、常磁性効果による超伝導秩序変数が空間変調する新奇な超伝導状態について重要な知見を得た。主な研究項目は以下のとおりである。

1. 結晶構造や超伝導対称性に4回対称がある様々な物質 (CeCoIn_5 , V_3Si , $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$ など) において、低磁場領域での三角格子から四角格子への渦糸格子変形と渦糸格子の方位の一次転移が観測されている。微視的理論と現象論である非局所 London 方程式を解くことにより、この一連の渦糸格子変形、方位の一次転移を再現し、電子状態の観点から理解を与えた。

低磁場領域においては、渦は円とみなせ、その最密充填は正三角形となる。一方で磁場が大きくなると、渦が互いに近づきその異方性の影響を受ける。4回対称のある系では最密充填は正方格子となる。また、渦格子は低励起エネルギー状態を渦間で繋げることでエネルギーを下げ、安定となると考えられる。正方格子では最近接同士で繋がることができるが、正三角格子では最近接でなく、第二近接同士が必ず繋がりが、安定となる。この電子状態の繋ぎ変えにより、渦格子の方位の転移が起こることを示した。

2. 近年、 CeCoIn_5 の面内に磁場を印加したとき、高磁場低温領域に非整合の反強磁性秩序が安定することが中性子実験により明らかになった。この実験を受け、常磁性効果が大きい異方的超伝導体の面内方向に磁場を印加した際の、波数空間における電子状態を微視的理論から明らかにした。

これにより、常磁性効果が大きい場合、波数空間において超伝導ギャップのノード近傍に正常時の値を超える状態が出現すること、この正常時を超える状態は垂直磁場下では現れないことを示した。 CeCoIn_5 のフェルミ面構造を考慮しつつ、面内磁場下の渦糸状態において反強磁性転移が促進される可能性を議論した。

3. 強い常磁性効果により、クーバー対が有限の重心運動量を持ち超伝導秩序変数が空間変調する FFLO 状態について空間構造および物性を、微視的理論を用い評価した。FFLO 状態は理論的予言から40年以上経た現在、 CeCoIn_5 においてその実現が期待されている。本研究では、特に、FFLO 状態が実現する安定領域の評価や FFLO 状態で期待される渦糸構造因子や、NMR スペクトルなどの物理量の磁場変化についての定量的評価をおこなった。ここで得られた知見は、実験において FFLO 状態を直接観測するための指針となることが期待される。

論文審査結果の要旨

本学位論文では、重い電子系超伝導体、特に CeCoIn_5 を念頭に置き、超伝導渦糸状態において強い常磁性効果をもたらす特異現象の解明を中心に理論研究を行なった。

常磁性効果が顕著な高磁場領域を含む全磁場領域での渦糸状態を定量的に理論評価するため、微視的理論である準古典 Eilenberger 理論を用い、渦糸状態の空間構造を正確に決めた上で、物性の数値解析を行うとともに、計算結果と実験結果との比較・検討を行なった。これにより、超伝導発現機構に深く関係する超伝導対称性や、常磁性効果により現れる新奇な超伝導状態について重要な知見を得ており、この研究分野の発展に寄与する効果を報告している。主な研究成果は以下のとおりである。

(1). 結晶構造や超伝導対称性に 4 回対称がある様々な物質 (CeCoIn_5 , V_3Si , $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$ など) において、低磁場領域での三角格子から四角格子への渦糸格子変形と渦糸格子の方位の一次転移が観測されている。微視的理論と現象論である非局所 London 方程式を解くことにより、この一連の渦糸格子変形、方位の一次転移を再現し、電子状態の観点から理解を与えた。

(2). 異方的超伝導体に磁場を印加した際の、波数空間における電子状態を微視的理論から明らかにした。その結果、常磁性効果が大きい場合、面内方向に磁場を印可すると、超伝導ギャップのノード近傍に正常時の値を超える状態が出現することを示した。これと CeCoIn_5 のフェルミ面構造を考慮して、面内磁場下の渦糸状態において反強磁性転移が促進される可能性を指摘した。

(3). 強い常磁性効果により、クーバー対が有限の重心運動量を持ち超伝導秩序変数が空間変調する Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov (FFLO) 状態について空間構造および物性を、微視的理論を用い評価した。FFLO 状態は理論的予言から 40 年以上経た現在、 CeCoIn_5 においてその実現が期待されている。本研究では、特に、FFLO 状態が実現する安定領域の評価や FFLO 状態で期待される渦糸構造因子、NMR スペクトルなどの物理量の磁場変化についての定量的評価を行なった。ここで得られた知見は、実験において FFLO 状態を直接同定するための指針となることが期待される。

学位審査は、学位論文、および、審査会での口頭発表と質疑応答により行なった。この学位論文の成果は、非従来型超伝導体の解明にむけた超伝導渦糸状態研究の発展に寄与する成果を報告しているといえる。よって、博士（理学）の学位に値する内容であると判定する。