

氏名	天野 雄次郎
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5222号
学位授与の日付	平成27年 9月30日
学位授与の要件	自然科学研究科 数理物理学専攻 (学位規則第5条第1項該当)
学位論文の題目	一軸異方性超伝導体における渦糸状態の理論
論文審査委員	教授 市岡 優典 教授 岡田 耕三 教授 鄭 国慶 准教授 大成 誠一郎

学位論文内容の要旨

本論文では、第2種超伝導体に磁場をかけた時に生じる渦糸状態の空間構造と物性について、定量的に正しい理論計算が可能な Eilenberger 理論による研究を纏めた。特に、結晶の ab 方向と c 方向で超伝導相関長が異なる一軸異方性超伝導体について、磁場方向を ab 方向と c 方向の間で傾けていく場合の渦糸状態の変化を解明することを目的として研究を進めた。このため、渦糸状態の超伝導秩序変数と内部磁場分布の空間構造を正確に計算し、中性子小角散乱などの物理量について実験データとも定量的に比較可能な理論計算を実施した。この磁場を傾けた場合においては、内部磁場において印加磁場に垂直方向の横磁場成分が現れる。そこで、Eilenberger 理論による渦糸状態の計算において横磁場成分も考慮に入れて正確な理論評価を行った点が新たな展開と言える。具体的な適用例としては、次の2つのテーマについて、研究を行った。

1. 一軸異方性超伝導体における横磁場成分を含む磁束線格子構造因子に関する Eilenberger 理論と London 理論

渦糸状態において、内部磁場の空間構造から得られる磁束線格子構造因子は中性子小角散乱実験の散乱強度により測定される。磁場方向を ab 面から傾けた場合に生じる横磁場成分の内部磁場についても中性子小角散乱のスピンフリップ散乱で測定でき、銅酸化物高温超伝導体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ などでの実験結果が報告されている。そこで、通常の縦磁場成分だけでなく横磁場成分を含めて (1, 1) スポットと (1, 0) スポットでの磁束線格子構造因子の大きさと磁場角度依存性について Eilenberger 理論により定量的な評価を行った。この中で、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ を想定してコヒーレンス長の異方性比 γ を 4 から 8 の間で変えてその影響を評価するとともに、超伝導対称性について s 波の場合と d 波の場合での結果の違いを明らかにした。また、この結果について、先行研究として行われていた現象論的な London 理論による磁束線格子構造因子の磁場方向依存性の計算結果との相違を同じ物質パラメータを用いて定量的に比較した。Eilenberger 理論と London 理論の結果は、比較的似た結果を与えるが、磁場方向依存性に系統的な違いが存在し、その傾向を明らかにした。さらに、この違いの原因を把握するため、渦糸芯半径の寄与をカットオフ関数として考慮した拡張 London 理論を導入することにより、渦糸芯半径の影響を評価し、縦成分と横成分の両方の磁束線格子構造因子の磁場角度依存性について Eilenberger 理論の結果を再現できることを示した。なお、d 波超伝導と s 波超伝導の違いは、超流動密度の温度依存性が超伝導対称性により異なることに起因していることも明らかにした。

2. 強い一軸異方性の超伝導渦糸状態におけるパウリ常磁性効果: Sr_2RuO_4 を対象として

超伝導体 Sr_2RuO_4 の一軸異方性は渦糸格子形状から $\gamma=60$ と評価され、大きな異方性を持つ。この超伝導体にかかる磁場方向を回転させると、磁場方向が ab 面に近づく時に上部臨界磁場が急激に増加し、超伝導転移が二次転移から一次転移へ変わる異常が磁気熱量効果、比熱、磁化の実験によりそれぞれ報告されている。この異常の原因が強いパウリ常磁性効果であると仮定した時、渦糸状態の物性にどのような影響が見られるか、Eilenberger 理論による研究を行った。この中で、縦成分と横成分の磁束線格子構造因子、磁化と比熱の磁場依存性、ナイトシフトの NMR スペクトル、トルクの磁場角度依存性など定量的に評価した。磁束線格子構造因子については、横磁場成分のみ中性子小角散乱で観測されているが、その散乱強度の大きさは、パウリ効果により上部臨界磁場が抑制された効果を考慮すると定量的に再現できることを示した。また、上部臨界磁場での一次転移による磁化や比熱の跳びの大きさもパウリ常磁性効果と多バンド効果を考慮すると説明できる。このように、磁場を ab 面にかけた時に観測される異常の起源を理解するためには、パウリ常磁性効果の考慮が重要であることを示すことができた。

論文審査結果の要旨

本学位論文は、第2種超伝導体に磁場をかけた時に生じる渦糸状態の空間構造と物性に関する理論研究であり、特に、結晶のab方向とc方向で超伝導相関長が異なる一軸異方性超伝導体において、磁場方向をab方向とc方向の間で傾けていく場合の渦糸状態の変化を解明することを目的としている。この磁場を傾けた場合には、内部磁場において印加磁場に垂直方向の横磁場成分が現れるという特徴があり、磁束線格子構造因子の横磁場成分が中性子小角散乱で測定されている。そこで、定量的に正しい理論計算が可能なEilenberger理論により、渦糸状態の超伝導秩序変数と内部磁場分布の空間構造を正確に計算し、横磁場成分も含めた物理量の磁場角度依存性について、定量的な理論評価を行った点が新たな展開と言える。主な研究成果は以下のとおりである。

- (1) 銅酸化物高温超伝導体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ を想定したパラメータを用い、磁束線格子構造因子の磁場角度依存性について Eilenberger 理論と London 理論の2つの手法により定量的な評価を行った。この中で、コヒーレンス長の ab 方向と c 方向の異方性比を変えてその影響を評価するとともに、超伝導対称性について s 波と d 波の場合での結果の違いを明らかにし、その原因として超流動密度の温度依存性が超伝導対称性により異なるためであることを指摘した。さらに、2つの理論の結果の相違を分析し、London 理論において渦糸芯半径の寄与をカットオフ関数として考慮する拡張 London 理論の必要性を提案した。
- (2) 強いパウリ常磁性対破壊効果がある場合での物理量の磁場角度依存性を Eilenberger 理論で研究し、磁場角度が ab 面に近づいた時の上部臨界磁場の一次転移化に伴う影響について理論計算を実行して明らかにした。これより、超伝導体 Sr_2RuO_4 での渦糸状態の異常を説明するためにはパウリ常磁性効果が重要であることを指摘した。

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実施した。この学位論文の成果は、超伝導体の特性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。