

氏名（本籍地）	高橋 勇紀（神奈川県）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博甲第6841号
学位授与年月日	平成26年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	数理物質科学研究科
学位論文題目	

Theoretical Study on Vortex States in Unconventional Superconductors
(非従来型超伝導における磁束状態の理論的研究)

主査	筑波大学教授	理学博士	胡暁
副査	筑波大学教授	理学博士	宇治進也
副査	筑波大学教授	工学博士	迫田和彰
副査	筑波大学教授	工学博士	喜多英治

論文の要旨

近年「高温超伝導体」として話題を集めた MgB_2 や鉄系超伝導に共通して垣間見える性質として、複数のフェルミ面が超伝導に寄与した「マルチバンド性」が知られる。このようなマルチバンド超伝導に関する理論的な研究で特に注目されているのが、拮抗する超伝導成分間の相互作用によって発現する、位相のフラストレーションと時間反転対称性の破れた（TRSB）超伝導状態である。本研究ではマルチバンド超伝導を記述する多成分 Ginzburg-Landau (GL) 理論を枠組みとし、多成分 TRSB 超伝導特有となる磁気特性の理解を目指した。この系においては秩序変数の強度と位相が複雑に絡み、解析的な取り扱いが困難なことから、時間依存 GL (TDGL) 法による数値計算手法による取り組みを行った。

まず、多成分 TRSB 超伝導における単一磁束構造を解析した。その結果、各超伝導成分の秩序変数の「強度」と「位相」において、温度に対して発散する複数のコヒーレンス長が存在することを示し、従来型超伝導における磁束構造とは異なることを明らかにした。そのような多成分 TRSB 超伝導における非従来型磁束の相互作用を系統的に調べた結果、熱力学的臨界磁場 H_{c2} と核生成磁場 H_n が与える条件 $H_n \gtrsim H_{c2}$ を満たすようなパラメータ領域において、複数磁束がクラスターを形成する新奇磁束状態（磁束クラスター状態）を見出した。これは磁束クラスター内部において TRSR 状態、磁束クラスター外部の領域において TRSB 状態を示すような、TRSB/TRSR 超伝導状態の相分離が関与したものとして特徴付けられる。

このような新奇磁束状態を含む、多成分 TRSB 超伝導の分類をより明らかにするため、表面エネルギーの解析を行った。単成分超伝導の場合、この表面エネルギーの符号が反転する物質パラメータ κ と特性磁場で与えられる関係 $H_n = H_{c2}$ となる条件が一致し、それが GL パラメータ $\kappa = 1/\sqrt{2}$ として知られている。しかし一方、多成分 TRSB 超伝導の場合、表面エネルギーが符号

反転する物質パラメータ κ_1^{**} は常に特性磁場で与えられるパラメータ κ_1^* より大きい。かつ、この表面エネルギーの符号が正から負へ反転する κ_1 値をもって、磁束クラスター状態から磁束格子状態へと変化することを磁束状態計算からも確認している。これらの結果から、 H_{tc} および H_n の大小関係で導かれる物質パラメータの閾値(κ_1^*)と、表面エネルギーの符号反転から導かれるもの(κ_1^{**})は一致せず、この間の値を取る超伝導物質は磁束クラスターと呼ばれる特殊な混合状態を示すことが判明した。

またさらに磁束クラスター状態を示すパラメータ領域 $H_n \gtrsim H_{tc}$ に着目し、その磁場依存性を考察した結果、低磁場側では典型的な磁束クラスター状態が得られる一方、高磁場領域では磁束格子状態が現れる。これは磁場によって誘起された TRSB-TRSR 相転移を示唆する。

これらの考察を踏まえ、成分間相互作用がフラストレートした多成分超伝導について、マيسナー状態、磁束格子状態以外に、全く新しい超伝導状態を含む磁場-温度相図を構築した。第1種超伝導($H_n < H_{tc}$)の場合、単成分(または TRSR)超伝導同様マيسナー相と常伝導相をもち、その境界は1次相転移である。一方 $H_n \gtrsim H_{tc}$ (または $\kappa_1^* < \kappa_1 < \kappa_1^{**}$)を満たすパラメータ領域において、本研究で得られた新しい知見である磁束クラスター状態を含む $H-T$ 相図が得られる。下部臨界磁場 H_{c1} 直上の低磁場領域において、TRSB/TRSR 状態の相分離を伴う磁束クラスター相をもち、マيسナー相との境界は一般的な磁束侵入に伴う2次相転移とは異なることが期待される。高磁場側においては磁場によって誘起された TRSR 状態を伴う磁束格子相をとる。最後に第2種超伝導を示すパラメータ領域($H_n \gg H_{tc}$)については、磁気特性としては磁束格子状態のみであることから、実質的には単成分超伝導と変わらない。しかし、秩序変数間の位相差に着目すると、低磁場領域では TRSB 状態に基づく磁束格子相であるのに対し、高磁場領域では TRSR 状態に基づく磁束格子相である点に注意したい。以上のような多成分 TRSB 超伝導における磁気特性に関する結果は、単成分超伝導(または成分間相互作用にフラストレーションが無い場合)とは質的に異なり、秩序変数間の位相差が自由度として如実に現れたことに起因している。

以上の結果は、多成分 GL 理論に基づく磁束状態に関する数値計算から得られた結果であるが、超伝導のもう一つの基本理論である Bardeen-Cooper-Schriber (BCS) 理論に基づき、BCS ギャップ方程式から導かれる TRSB 状態の安定条件についても議論を加えている。

また一方で、結晶構造がもたらす「異方性」という観点からは、2次元的な超伝導層に対して平行に磁場を印加した、ジョセフソン磁束系における新しい磁束ダイナミクスについて考察した。銅酸化物超伝導体において実験的に観測した磁束フロー抵抗と、磁束のランジュバンダイナミクスシミュレーションとの比較の結果、ジョセフソン磁束フローの方位として層状構造に水平/垂直方位に加えて、回転格子型のフロー方位を初めて明らかにした。このような層状構造をもつ超伝導体は、銅酸化物系のみならず鉄系においても見られ、同様な議論が展開できることが期待される。

審 査 の 要 旨

[批評]

本研究は、非従来型超伝導の磁束状態に関する理論的研究である。特に成分間の相互作用が拮抗した多成分超伝導に於ける時間反転対称性の破れた状態が安定化する条件をBCS理論により導出した。また計算機シミュレーションを用いて外部磁場に誘起される磁束量子クラスターと呼ばれる新規な混合状態を見出し、新しい磁場-温度相図を提案した。多成分超伝導等の磁束量子状態に関する新しい知見をもたらした。

以上の理由から、本論文は博士論文として十分と判断された。

〔最終試験結果〕

平成 26年 2月 19日、数理物質科学研究科学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。