

氏 名	あ だ ち ひろ と 安 立 裕 人
学位の種類	博 士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 2712 号
学位授与の日付	平 成 15 年 11 月 25 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	理 学 研 究 科 物 理 学 ・ 宇 宙 物 理 学 専 攻
学位論文題目	超伝導渦糸状態へのパウリ常磁性の効果に関する理論的研究

論文調査委員 (主 査) 助教授 池 田 隆 介 教 授 大 見 哲 巨 教 授 水 崎 隆 雄

論 文 内 容 の 要 旨

安立裕人氏の学位論文は、磁場下におかれたバルクの超伝導体が示す相図と相転移現象へのパウリ常磁性の効果に関する理論研究の成果をまとめたものである。近年研究対象とされている超伝導体の多くは、磁場下では磁場が誘起する渦糸の多体系のとり状態でその物性が決まる第二種超伝導体に属するため、論文題目にある「超伝導渦糸状態」とは「磁場下の第二種超伝導体における各相」を総称したものである。

超伝導体に磁場をかけると超伝導自体が抑制される傾向にある。その原因のひとつが渦糸の生成であり、磁場がクーパ対を組む電子の重心運動（軌道対破壊）を必然的にもたらし超伝導を弱める。もう一つがスピンへの磁場効果（パウリ常磁性効果）で、多くの超伝導体でのクーパ対はスピン一重項であるためスピンを揃えることがクーパ対自体の破壊（スピン対破壊）をもたらす。磁場下の超伝導の理論研究においてはこれまで、上記の二つの磁場対破壊効果の一方のみを考慮した理論がほとんどであり、両方の対破壊効果を考慮した数少ない理論計算の全てが平均場近似内で行われている。しかし、それら過去の仕事は同じ平均場近似内でさえ相反する結果を与えている（明確な例を挙げれば、後述のFFLO状態への転移が連続転移か不連続（一次）転移かに関する不一致である）。また、スピン対破壊を無視した超伝導渦糸状態のここ10数年にわたる研究を通して、相図に関する正しい記述を平均場近似は近似的にさえ与えていないことがわかっている。こういった背景から、超伝導渦糸状態へのスピン対破壊（パウリ常磁性）効果を調査することは理論的には、超伝導渦糸状態の統計力学的研究の極めて自然な拡張という動機に基づくものである。

また、いわゆる強相関電子系に属する超伝導体における最近の実験事実からも本研究は次のように動機付けられている。まず、銅酸化物高温超伝導体に属する物質の多くは10オングストローム程度の短いコヒーレンス長を持ち、そのためスピン対破壊効果が顕著に現れると期待できるが、平均場近似が予言するそういった現象はそこでは全く報告されていない。同じことが有機超伝導体に関しても言える。他方で、2K程度のゼロ磁場転移温度を持つCeCoIn5という重い電子系超伝導体においては、最近実験的に評価されたその $H_{c2}(T)$ 線の形などから磁場の方向に関係なく強いスピン対破壊効果が期待されている。特に、その後の熱伝導率や磁化の測定から低温・高磁場の $H_{c2}(T)$ 上で強い一次転移を示唆する跳びが観測されている。 H_{c2} 線上での転移が存在すれば平均場理論が近似ではないという見解にもつながるため、前述の渦糸状態に関して近年発展した理論結果と抵触する恐れもあり、確実に理論的整備が必要である。重い電子系では、温度スケールが低いだけでなく状態密度が極端に大きいため、銅酸化物や有機物質とは反対に超伝導揺らぎは極端に弱い。しかし、超伝導転移現象は物質に固有ではなく普遍的な現象であるため、上記の両極端にある現象は同一の理論内で説明されるべきものである。

こういった背景を動機にして本論文では、d波対状態を仮定した弱結合BCSモデルから出発してギンツブルク-ランダウ汎関数を導出し、平均場近似における相図と渦糸格子の応答の考察とともに、対応する分配関数に関するモンテカルロシミュレーションが行われている。前者が微視的な側面の考察であり、後者が統計力学的側面の調査である。この研究での特色のひとつは、前述の二つの対破壊効果を近似なしに同列に取り扱う点で、過去の類似の理論研究ではこの点を解析的にまと

もに取り入れるのは困難なため何らかの正当化できない近似を通して処理されていた。さらに、スピン対破壊の影響はわずかな不純物の存在で現れなくなるという予測が立つため、弱い不純物をボルン近似で取り入れて計算されている。CeCoIn5などの準二次元的フェルミ面をもった系を念頭に置き、その面に垂直な磁場下の状況に限って解析されている。

微視的側面に関する主要な結果は次の通りである。まず、十分低温・高磁場の $H_{c2}(T)$ での平均場超伝導転移は一次転移であり、スピン対破壊効果を直接反映した現象である。 $H_{c2}(0)$ がスピン対破壊が全く無視できる場合に比べ $1/4$ 程度に抑えられるほどまで対破壊効果を考慮した場合、上記一次転移が現れ始める温度 T^* がゼロ磁場転移温度の $1/3$ 程度となり CeCoIn5 の現象と比較できる値となっている。また、磁化の跳びの大きさも実験値と同じオーダーが見積もられている。 T^* は不純物による電子の平均自由行程がコヒーレンス長の10倍程度まで短くなるとゼロになることがわかり、このスピン対破壊に起因する現象にとって十分きれいなサンプルが要求されることがわかる。加えて、 T^* よりずっと低温では磁場方向に秩序パラメタの変調をもった FFLO 状態と呼ばれる新奇な渦糸格子への二次の構造相転移線の存在が可能であることが結論されるが、この FFLO 状態実現のためにはコヒーレンス長の50倍以上の平均自由行程が要求される。面に垂直磁場下の CeCoIn5 では FFLO 転移の明確な実験的証拠は見られていないことを考慮して、この系が上記の極端にクリーンな系の範疇に属しているかは微妙であると結論された。

微視的調査から得られたギンツブルク-ランダウ汎関数を超伝導層4層からなる準二次元の状況に拡張したシミュレーションを実行して、渦糸ピンニング効果のない系の真の相図を検討した。その結果、ある程度熱的超伝導揺らぎの強さを高めていくと平均場一次転移の跳びはブロードになり、一次転移は実際には起こっていないことが確認できた。より低磁場にある渦糸固体-液体間の弱い（別の）一次転移が唯一の相転移とわかる。この揺らぎによる H_{c2} での一次転移の振る舞いの消失は、スピン対破壊効果のない場合の理論的考察を拡張して予見できる結果であり、これが銅酸化物や有機物質などの超伝導揺らぎ効果の強い系ではパウリ常磁性効果を示唆する報告がないことの端的な説明となる。しかし、十分低温で熱的揺らぎの弱い系を仮定すると一次転移を示唆する跳びとともにヒステリシスも数値データに見られる。しかしこのヒステリシスは、ギンツブルク-ランダウ汎関数の非線形項のポテンシャル障壁が降温とともに有効的に高くなり、実際の数値実験で熱平衡に達しない状況で生じる現象で、モンテカルロステップ無限大で達する熱平衡では相転移がないとわかっている系においても数時間、数週間の計算では容易に起こるものである。CeCoIn5の実験では、面に垂直磁場下という揺らぎ効果の比較的強い状況では磁化の跳びは極めてシャープだが渦糸ピンニングと無関係なヒステリシスは観測されていない。一方でより、揺らぎの弱い面に平行磁場下では FFLO 転移現象が現れ始める温度よりわずかに高温側でヒステリシスが見られており、熱平衡系の H_{c2} での一次転移の存在を否定する現在の結果が、様々な磁場方向での CeCoIn5 の現象に対してもコンシステントな説明を与える唯一の理論と考えられる。

論文審査の結果の要旨

論文審査は、理論計算とその結果の新奇性や実験事実を矛盾なく説明できているかについて重点を置いて行われた。

理論計算の出発点は弱結合 BCS モデルという、現実の系との対応を考えると単純すぎるモデルであるが、これまでの類似の研究がこのモデルの枠内においても成功を収めていなかったこともあり、より現実の系に即した複雑なモデルを扱う際に今後指針になることが期待され、博士学位論文としては十分である。ギンツブルク-ランダウ (GL) 汎関数導出の際に適用したパラメタ積分を用いた数値計算法はアイデアに富んでおり、応用範囲も広い。この手法を通して軌道対破壊効果が摂動としてではなくフルに取り入れられており、平均場一次転移のオンセット T^* 温度が FFLO 状態への転移線が位置する温度領域より高温に位置するという、CeCoIn5 の実験事実とコンシステントな結論を得るには、この非摂動的な磁場対破壊の導入が不可欠であったと思われる。この点が、類似の他の理論と比べて本研究が優れていると考えられる理由のひとつである。実際、過去の類似の題材を扱った理論は全て T^* よりも FFLO 転移線がより高温に位置するという結果を出しており、それらの結果に基づいて実験研究者は実験データを解釈せざるを得なかったため、 T^* がより高温に位置するという CeCoIn5 の一次転移現象の原因がパウリ常磁性によるか否かに関してもコンセンサスがない状態に陥っていたようである。本論文に関連する仕事の内容を公表後、米国の複数の実験グループから本研究は注目され意見交換が盛んに行われたが、理由はそのあたりにあるようである。また別の重要な点として、GL 汎関数の導出の際に不純物効果も考慮した点が挙げられ

る。これにより FFLO 状態ばかりでなく Hc2 での平均場一次転移がいかに系のクオリティーのわずかな低下に対して脆弱であるかを実感できるようになった。

別の重要な側面は、モンテカルロシミュレーションという統計力学的調査もあわせて行ったことにより、揺らぎの弱い CeCoIn5 におけるパウリ常磁性に起因する現象の理解とともに、揺らぎの効果の強い銅酸化物超伝導体において同様の現象が見られない理由を矛盾なく理解する方向を示した点である。論文内容の説明にある通り、安立氏のおこなったシミュレーション結果に基づくと、CeCoIn5 において起きていると見られていた低温 Hc2 (T) 上での一次転移は厳密にはクロスオーバーであり、揺らぎが強まるほどブロードな連続的振る舞いになる、と結論される。これに加えて FFLO 状態が実現する磁場領域は平均場近似においても高磁場の隅に限られ、揺らぎの強い系では渦糸液体領域内に入ることを想定すると、面に平行磁場下の有機超伝導体や銅酸化物系といったパウリ常磁性効果と超伝導揺らぎの両方が強い系において FFLO 状態や Hc2 上の一次転移的振る舞いが全く見られなかったという実験事実がすっきりと理解できる。つまり、シミュレーションを用いた統計力学的調査により、様々な超伝導体における類似の状況での一見矛盾しあう実験事実を矛盾なく説明できている。

安立氏は解析的手法だけでなく、計算機を利用した研究手法を数多く身につけ積極的に取り入れ、研究の幅を広げている。また、周囲の同世代の大学院生ばかりでなく、研究会などを通して多くの実験研究者との議論を重ね、実験データとの比較も積極的に行っている。学位公聴会においては理論、実験両面からかなり突っ込んだ試問が数多く向けられたが、無難に返答ができており、学識も十分持ち合わせていると判断した。これらの結果から、本論文は本学理学博士の学位論文として十分価値あるものと認め、論文の内容と試問の結果を通して、合格と判定した。