

氏 名	いし だ ひで はる 石 田 英 一
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 2423 号
学位授与の日付	平 成 14 年 3 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	二次元超伝導体における磁場誘起超伝導—絶縁体転移現象の研究

論文調査委員 (主 査) 助教授 池 田 隆 介 教 授 大 見 哲 巨 教 授 山 田 耕 作

論 文 内 容 の 要 旨

この申請論文は、乱れの無視できない2次元薄膜における磁場誘起超伝導—絶縁体転移（以下、FSI 転移と略す）という凝縮系物理において重要な問題の解明を目的に書かれている。近年の銅酸化物高温超伝導体の研究以前から2次元金属薄膜における超伝導転移では熱的超伝導揺らぎが重要で、平均場近似を越えた取り扱いによる相図と物理量の考察が必要とされていたが、磁場下での超伝導現象に関する理論は進んでいなかった。ところが高温超伝導体における現象解明が動機となり、磁場中超伝導体の相図の平均場近似を越えた理論的理解が進んだ。それに依れば、磁場下における超伝導相は磁場がもたらしたボルテックス（量子渦）多体系が乱れによるピニング効果で凍結し電気抵抗ゼロとなった相であることがわかり、ボルテックスガラス（VG）と呼ばれる。この VG 相は2次元系の有限温度では存在し得ないが、絶対零度では存在すべきと予言され、磁場の増大とともに絶縁体相へ2次転移すると期待される。この2次量子相転移に伴う臨界現象として電気抵抗が降温とともに、転移磁場 B_c 直上では温度に依らない一定値に近づき、より高（低）磁場では増大（減少）し、しかもその磁場・温度変化はあるスケーリング則に従う。そして特に、上記 B_c 直上での抵抗の一定値は物質パラメタに依らない普遍値をとる。FSI 転移現象を VG 量子相転移の現われとするこのシナリオを、フィッシャーが12年程前に絶対零度でのみ正しい非散逸のモデルに基づき提案した。FSI 転移を VG 転移と仮定する点自体は正しいと思われ、現にこの提案と符合する抵抗データが繰り返し報告された。しかし近年、 B_c での抵抗値の物質依存性などを示すデータもまた数多く報告されるようになり、フィッシャーのシナリオが疑問視され始めている。実際、フィッシャーのモデルに基づく有限温度での抵抗の計算は報告されたことがなく、実験事実と比較できる計算を伴った理論が望まれていた。

申請論文ではまず、フィッシャーのモデル設定や普遍抵抗値の主張が実験の行われる有限温度には適合しない点を客観的に指摘した上で、相転移に関わる現象の記述に必要なギンツブルク—ランダウ（GL）作用を現象論的ではなく微視的に（電子状態のモデル化の観点から）導出することから始める必要があることを説明している。そして、非磁性不純物散乱（乱れ）の効果と電子間の短距離斥力を含み s 波クーパー対形成の場合に正しい BCS モデルを電子状態に関するハミルトニアンとして用いて、高磁場かつ低温での超伝導秩序パラメタに関する時間依存 GL 方程式を数多くのファインマン・ダイアグラムの計算を行って微視的に導出した。FSI 転移現象自体はミクロな対状態とは本質的に無関係だが、この現象の具体的な調査が薄膜サンプル作成の可能な s 波対状態を持つ物質に限られていたため、ここでは s 波対状態を仮定してある。この GL 方程式の線形項導出の結果、平均場近似で（実際には転移線ではないが）転移磁場として導出される $H_{c2}(T)$ が電子間斥力の増大とともに減少し、その温度依存性は磁場・温度相図において上に凸の曲率を示すことがわかる。この結果は過去の他の論文での結論を覆すもので、実際申請者のこの論文発行の2年後にスミス、アムベガオカーらの計算でも追認された。また、GL 方程式の非線形項導出の結果、量子超伝導揺らぎは乱れの増大により強まるだけでなく、電子間斥力の増大によっても強まることが示された。この電子間斥力の増強は、より現実的な乱れによる遮蔽効果のある準2次元系でのクーロン斥力を斥力として用いた場合における膜厚の減少と同一視できることがゼロ磁場での過去の仕事等を通してわかっているた

め、乱れのある薄膜の膜厚の減少とともに量子揺らぎの効果が強まり $H_{c2}(0)$ が減少する、ことがわかったことになる。

次に申請者は、GL 作用において磁場誘起ボルテックスの乱れによるピニング効果につながる項を微視的に導出するためのダイアグラム計算を行った。これは通常の GL 作用の導出においては無視される、乱れによる（ゼロ磁場転移温度などの）超伝導物質パラメタの空間変化を考慮に入れることに相当し、VG 転移を微視的に調べるのに不可欠な作業である。このボルテックスピニングの効果は磁場中でのゼロ抵抗（つまり、VG 秩序化による超伝導）に有利に働き、乱れの増強とともに強まるので、乱れによる超伝導揺らぎの増強と競合する効果である。さらにこの計算を実行して得られた量子 GL 作用を使って、VG 転移磁場 B_c の計算を VG 秩序パラメタに関するガウス近似内で実行している。2 次元 VG 量子転移は、線状欠陥が磁場に平行にランダムに含まれた 3 次元系における有限温度での VG 転移と形式的に等価であり、後者の題材で上記の近似を用いて得られた転移線が実験事実を良く説明していたことが、ここでのこの近似の適用理由で、 B_c を解析的に得ることができる。得られた表式は、前述のピニング効果と量子揺らぎ効果の増強の競合がそのまま反映された形をしており、 B_c は $H_{c2}(0)$ より下にはあるが、実験的に見出されていた膜厚の減少による B_c の減少自体は電子間斥力を考慮して始めて説明できることが示された。

さらに、この得られた量子 GL 作用を B_c 周辺の磁場領域に適用して、有限温度における量子 VG 臨界領域での抵抗の温度変化を調べた。具体的には、伝導度の超伝導成分 G_s に久保公式を適用し、特にその VG 揺らぎから生じる寄与 G_{VG} を表すダイアグラム構造を具体的に調べて、FSI 転移現象が G_{VG} の温度・磁場変化の反映であることを示した。フィッシャーの概念的モデルとは違って、量子超伝導揺らぎが散逸的ダイナミクスに従うことがこの結果にとって本質的である。そして、転移磁場での値 $G_{VG}(B_c)$ の温度依存性は無視できるが、原理的には普遍的定数にはならないことがわかる。ただし、電子間斥力を無視するダーティー極限では、揺らぎとピニングの強さの微視的パラメタ依存性の間にある特有な関係式が成り立つ結果、 $G_{VG}(B_c)$ は普遍的定数になることがわかる。電子間斥力が考慮されるとこの普遍性は厳密には破れるが、その普遍性の破れが効いてくる（ G_{VG} を表す）ダイアグラムは全ダイアグラムの中のほんの一部である理由から、 $G_{VG}(B_c)$ の普遍的定数値からのずれは小さいと予想される。この理論的帰結は、乱れが特に強い系では B_c での抵抗値が典型的に量子抵抗値 $6.45(k\Omega)$ のオーダーで物質依存性が弱いという、実験事実と関係があるように思われる。また、フィッシャーのモデルとは違って散逸ダイナミクスの結果、伝導度の準粒子からの寄与 G_n とそれへの超伝導揺らぎによるバーテックス補正 δG_s 、さらにはボルテックスフロー伝導度に相当する寄与 $G_s - G_{VG}$ もまた全伝導度に寄与する。このことから、乱れの十分弱い系ではこれらの残りの寄与への量子補正が無視でき温度依存性が弱いので、転移磁場 B_c での抵抗値が量子抵抗値より十分低いという結果や、またある程度乱れが強い系では上記残りの寄与が量子効果で降温とともにゼロに向かう様子が転移磁場での抵抗値の温度依存につながること等、冒頭に述べた近年のデータに見られる物質依存性も定性的にはあるが包括的に説明することが出来る。

このように、本申請論文は膜に垂直な磁場下にある乱れの無視できない超伝導薄膜において共通に見られる FSI 転移抵抗現象を、現象論的なモデルではなく微視的なレベルから出発して理論を定式化することで説明したものである。

論文審査の結果の要旨

本申請論文は、1) 平均場近似でも必要となる超伝導性の微視的計算、2) ボルテックスピニングの寄与の微視的計算とその結果のボルテックスグラス (VG) 転移磁場の計算への適用、3) 1), 2) で得た量子ギンツブルク-ランダウ (GL) 作用に関する知識に基づいた VG 量子転移近くの臨界現象とその伝導度への影響の調査と実験データの説明、の三部に分かれており、その各々が公表論文で報告されている。通常、高磁場下の超伝導現象に関する微視的理論研究は 1) の、それも $H_{c2}(T)$ 線の計算程度にとどまる場合が多い。ここで行われた $H_{c2}(T)$ に関する結果自体、過去の結論を覆す新しい結果でスミスら（公表論文 2 の ref. 19）により後に追認されている。ここではこの平均場近似での考察にとどまらず GL 作用の非線形項にまで考察は進められているため、単なる計算問題ではなく、物理現象の説明を後の目標に据えた仕事に仕上がっている。また、計算問題という面でも 1) で行われた電子に関する大量のダイアグラム計算はかなり労力を要する。ここに、申請者の高い理論計算能力が伺える。実際、申請者自身が見出した、3つの部分ダイアグラムの和の相殺に関する規則のおかげで斥力に関して低次の摂動計算を通して無限次まで正しい結論を得ることが可能になり、量子超伝導揺らぎの斥

力による増強など、鍵になる理論的供述につながっている。

2) のボルテックススピニングにつながる GL 作用への付加項の計算は類似の仕事は前例のないもので、独創性を十分認めることが出来る。この計算においても、1) で見出された部分ダイアグラムの和の相殺規則のためにスピニングの強さの非磁性不純物強度 (E_{FT})⁻¹ 依存性が明瞭な形で得られている。この2) の物理的に重要な主題は、同じ非磁性不純物が量子超伝導揺らぎとボルテックススピニングという互いに競合する特徴の両方を強めるために、計算される VG 転移点が実験結果と合致する物質依存性を得ることが自明ではないという点であり、電子間斥力を考慮しないと VG 転移磁場に関する実験事実は説明できないという明快な結論にまとまっている。

1), 2) の結果を準備として、本題の磁場誘起超伝導 - 絶縁体転移 (FSI 転移) 現象を説明する理論計算が3) で行われている。ここでは、超伝導揺らぎに関するダイアグラムのルールを調べ久保公式により伝導度を計算する作業が理論解析において鍵になる点で、本質的な結果の抽出が手際よく実行できている。そして、実験データの説明の個所は、この題材の性格上議論は定性的なレベルにとどまっているが、見かけ上定性的に異なって見える FSI 転移現象の多くのデータを申請者が展開した単一の理論により包括的に説明できている、と判断できた。また、電子間斥力の効果が無視できる場合には伝導度の VG 揺らぎに関する寄与が転移磁場で普遍定数に帰着するという結果は、理論的にみても興味ある発見で、微視的モデルの拡張により今後この結果がどこまで有効かがわかれば、伝導度値の物質依存性の予言にもつながる可能性もあり、今後興味を持たれるところである。

そもそもの FSI 転移現象は、ある程度乱れの強い超伝導薄膜であれば共通して見られるかなり一般的な現象であるが、対象がランダム系であることもあり有限温度の抵抗データ自体との比較ができる理論はこれまで全く提出されておらず、理論の題材としては難解なものである。こういった題材に真正面から取り組み、実験事実を説明する理論に仕上げるまでにはかなりの時間と労力を要したことは容易に想像できる。

また、口頭発表に対する質問を通して、学識も十分得ていると判断した。

以上の理由で、本申請論文は学位論文に十分値するものと考ええる。