

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名：三崎 航

超伝導は量子コヒーレンスが巨視的現象に現れる固体物理の主要な研究テーマの一つであるが、今なお様々な観点から研究が盛んに行われている。一つには2次元のクリーンな超伝導体において、磁場下でその電気抵抗が連続的に変化し低温極限でも有限にとどまる「異常金属」もしくは「量子金属」と呼ばれる相が存在するらしいことが実験的に明らかになってきたという進展があげられる。しかし、その理論的理解はいくつかの提案があるにせよ、未解決の問題として残されている。もう一つは、空間反転対称性が破れた物質における超伝導の問題で、特にその輸送現象が方向によって異なる非相反輸送現象の研究が進んでいる。磁場による時間反転対称性の破れと渦糸の生成がその機構として有力視されており、この問題は上記の量子金属の問題とも密接に関連している。

このような背景下、三崎氏は、量子力学における位相のダイナミクスにおける電子相関と量子摩擦という基本的な問題意識に立ち戻り、(i)渦糸のコアに存在する常伝導状態が渦糸の運動における量子摩擦として働くという前提から出発し、散逸を伴うボゾンとしてモデル化してそのボーズ凝縮の抑制と金属状態の出現についての検討を行い、(ii)ジョセフソン接合におけるチャージングエネルギーの非対称性とシャント抵抗があるときの電流・電圧特性における非相反性を解析した。

以下、博士論文の構成ごとにその内容を述べる。本文は英語で書かれており、4つの章と2つの付録からなる。

Chap.1 Introduction では上記の背景につき簡潔にレビューを行い、基本的な問題意識が述べられている。

Chap.2 Suppression of superfluidity by dissipation は、上記の(i)の問題が3つの方法により検討されている。2.1で乱れの強い薄膜系における超伝導・絶縁体転移と最近のクリーンな2次元超伝導体における量子金属との対比を行いながら、実験結果のまとめを行っている。さらに、位相と電荷との共役関係、ガリレイ対称性と超流動密度の関係などが紹介されている。さらにFeynmanによるヘリウムの超流動転移の理論が簡潔に解説されている。2.2では上記の前提が示され、超伝導体がdirty, clean, super-cleanの3つに分類され、cleanな超伝導体に対して、摩擦力を受けた量子渦糸のモデルが適用できると述べられている。2.3ではCaldeira-Leggettによる量子摩擦を含んだモデルが具体的に提示され、2.4以降がその解析に充てられている。2.4では、Feynman理論に散逸を含める議論がなされており、1粒子の密度行列の非対角項が粒子の交換過程を支配しており、それが運動量の量子揺らぎ $\langle p^2 \rangle$ によって決まること、そして $\langle p^2 \rangle$ が散逸によって絶対零度まで有限に残ることが示されている。この事実から、摩擦がある臨界値を超えると絶対零度でも超流動が消えることを結論した。2.5では、

第一量子化の世界線量子モンテカルロ法により数値的に 2 次元、3 次元の双方に対して超流動密度を計算し、十分低温でも散逸が大きいと超流動密度がほぼ消えることを示した。2.6 では、第二量子化に基づく場の理論に散逸を導入して、その超流動密度を自己無撞着に決めるという近似理論を構築している。2.7 はこの章の議論に充てられ、この理論を実験的に検証する方法、特に super-clean の超伝導体における量子金属の不在についての予言が述べられている。

Chap. 3 Theory of nonreciprocal Josephson effect では上記の(ii)の内容が述べられている。3.1 は、この章の導入部で、実験結果の紹介とジョセフソン接合の標準理論が解説されており、3.2 で解析の前提と目的が述べられている。続く 3.3 では、クーロンエネルギーとジョセフソンエネルギーの大小に応じて 2 つのモデルが導入されている。3.4 がこの章の主要部で、2 つのモデルに対する理論解析が詳細に述べられている。クーロンエネルギーが位相の「運動エネルギー」に対応することから、そのダイナミクスが電流・電圧特性を決定するという立場から、クーロンエネルギーの左右非対称性を取り入れたダイナミクスが丁寧に解析されている。非線形力学系としての解析、Fokker-Planck 方程式を用いた有限温度効果の理論、Zener トンネル効果における非相反効果の解析、などが述べられている。これらの解析によって、単一のジョセフソン接合において、磁場などの時間反転対称性の破れがなくとも非相反電流・電圧特性が現れることを結論し、従来のジョセフソン効果の実験結果解析に一石を投じている。3.5 ではクーロンエネルギーの非対称性が量子キャパシタンスから生じることが述べられ、そのオーダー評価とともに非相反電流・電圧特性の観測可能性を論じている。

Chap. 4 Summary and perspectives は全体のまとめと今後の展望を述べて全体を総括している。2 つの Appendix では Chap. 2 で用いた Keldysh 形式と Chap. 3 で用いた Fokker-Planck 方程式と Zener トンネルの理論の詳細が示されている。

今回得られた成果は、超伝導体における電子相関と量子摩擦という基本的な問題意識の下に、量子金属相とジョセフソン接合の非相反輸送現象の理論的解析を通じて、物性科学・物理工学の今後の発展に大きく寄与すると期待され、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。