

本論文は五章からなる。第一章は緒論である。研究対象としての強結合超伝導についてこれまでの研究について簡潔に述べたあと、本研究の目的と本論文の構成について述べられている。第二章では本論文で使用する理論的枠組みが記されている。はじめに超伝導体に対する準古典理論を経路積分の定式化の下で導出したあと、フォノンによる超伝導体の理論の定式化が与えられている。つづく第三章では準古典理論を用いた渦の解析手法 (Kramer-Pesch 近似) が詳述されている。第四章では数値計算の詳細を述べられていたあと、超伝導体中の孤立量子渦を解析した結果が述べられている。第五章では本研究の成果が総括されたあと、今後の展望について述べられている。

これまで超伝導体の多くの理論研究では、電子間有効相互作用に働くフォック項はその効果が化学ポテンシャルへの繰り込めるとしてあらわには扱われてこなかった。実際バルク (空間的に一様で系の大きさも十分大きく熱力学極限にあるとみなせる系) の超伝導体の転移温度はフォック項を取り入れても大きく変わらないことが知られている。しかし空間的に不均一な系、たとえば界面近くの超伝導状態、接合系、量子渦状態では、フォック項が無視しうるかどうかは明らかではない。空間不均一な系では物理量が空間の各点で異なる値をとりうるため、理論的に扱う際に計算が困難であり、これまで調べられてこなかった。本研究では電子間相互作用におけるフォック項を取り入れると、2次元カイラル P 波超伝導体において準安定な孤立量子渦が分裂し、回転対称性を失うことを見出した。フォック項の重要性—すなわち、その項の有無で系の性質が質的に変わるはじめての例を論文提出者は本研究で見出した。

扱う系は 2次元電子系であり、P 波チャンネルにのみ働くボソンを媒介として引力相互作用している系である。フェルミ面近傍の状態だけで超伝導特性が記述できるとして超伝導の準古典方程式を導出し、量子渦のまわりで凝縮体の空間構造や電子構造を数値的に調べた。その際、グリーン関数に対する方程式、ペアポテンシャルに対する方程式、マクスウェル方程式を自己無撞着に解き、与えられたモデルについて信頼性の高い数値的結果を得ている。

本研究の成果は、超伝導状態においてフォック項が本質的な役割を果たす初めての例を見出しただけでなく、量子渦の新たな分裂現象の発見という点でも意義が認められる。これまでも、ヘリウム 3 超流動相や重い電子系超伝導体に対して、孤立量子渦の分裂が理論的に予言されてきた。それらの先行研究はギンツブルグ・ランダウ (GL) 理論に基づく解析であるか、微視的な計算によるものであっても GL 理論で解釈されうるものに限られていた。それに対して、論文提出者は、より広い温度領域で量子渦の構造を調べ、低温で分裂する量子渦も、(GL 理論が適用可能な) 高温領域では分裂しないことを見出している。

本研究では実験での観測可能性についても論じている。カイラル P 波超伝導体の候補としては Sr_2RuO_4 が挙げられる。量子渦の分裂の検出は、外部磁場がゼロの下で降温してドメイン構造を生成し、そこで外部磁場を印加し、走査型トンネル顕微鏡/分光法で観測すると、量子渦のまわりの電子構造が特徴的な空間パターンを示すことで検証できると論文提出者は主張している。分裂の空間スケールは現時点での実験の空間分解能で十分識別できるものである。なお、フォック項を無視すると、この分裂の空間スケールは著しく小さくなり、実験では観測され得えない程度の効果となる。

超伝導体におけるフォック項の重要性を初めて示した点と、平衡状態における超伝導量子渦の新たな分裂現象の発見、それらが現実の系とも関連するという点に本研究の成果の意義を認めることができる。本論文第四章の一部は加藤雄介氏との共同研究であるが、論文提出者が主体となって分析及び検証を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって博士（学術）の学位を授与できるものと認める。