

# 論文の内容の要旨

論文題目 強結合超伝導体における渦の研究

氏名 黒澤 範行

## 背景と目的

超伝導を記述する理論において、多くの場合興味の対象となるのは常伝導状態との差異である。そのため、Bardeen-Cooper-Schrieffer 理論 (BCS 理論)[1] においては、常伝導状態にも存在している Fock 項は、化学ポテンシャルに既にくりこまれているとし無視することが通常である。実際には常伝導状態と超伝導状態の化学ポテンシャル  $\mu_F$  の間にはバルクのペアポテンシャルの大きさを  $\Delta$  として  $\Delta^2/\mu_F$  程度の差が存在していることが知られているが [2], 通常の超伝導ではこの値は非常に小さく無視ができる。

しかし非一様系においても上記が成立するかどうかは明らかではない。例えば非一様系として量子渦を考えた場合、渦の内部に存在する低エネルギー束縛状態に対して、一様系と全く同じ形で自己エネルギーの化学ポテンシャルへのくりこみが成立しているかは、決して自明ではない。

Eliashberg らによる強結合超伝導の理論 (Eliashberg 理論)[2,3] は、Cooper 対の糊となる Bose 粒子を明示的に扱った理論であり、定量性を持つ超伝導の記述だけでなく、奇周波数超伝導のような、電子間有効相互作用の遅延効果が本質である現象を記述するために必須の理論となっている。Eliashberg 理論は電子間有効相互作用の遅延が重要であり、弱結合理論 (BCS 理論) と異なり、一様系においても Fock 項を明示的に取り入れる理論となってい

る。よって強結合理論の場合は、非一様系に対しても当然 Fock 項を考える必要がある。

しかし、強結合理論による非一様系の解析、あるいは強結合理論の弱結合極限として、明示的に Fock 項を取り入れたままで非一様系の解析を行なった研究は、これまでのところほとんど報告されていない。そこで、本研究では非一様系の典型として量子渦に着目し、微視的な超伝導の理論を用いて、渦における Fock 項および強結合性の効果を調べることを目的とした。

カイラル  $p$  波超伝導・超流動は超流動  $^3\text{He A}$  相および  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  で実現されていると考えられている超伝導秩序であり、Intrinsic Magnus 効果や Majorana 粒子の存在といった興味深い物理現象の舞台となるため、注目を集め続けている系である。本研究では、それ自身が興味深い物理対象である点に加え、最も単純な異方的超伝導の一つであるという点から、 $s$  波超伝導に加えてカイラル  $p$  波超伝導に着目し、対象とした。

## 手法

本研究では、Eilenberger による準古典理論 [4] を用いて、主に  $s$  波および二次元カイラル  $p$  波超伝導体における孤立渦を調べた。まず Kramer と Pesch による準古典理論における摂動的な手法 [5]、およびそれによる渦芯近傍の準古典 Green 関数の摂動解を用いて、解析的に Fock 項の影響を議論し、次に数値計算を行なった。数値計算は準古典理論の基礎方程式である Eilenberger 方程式と Fock 項を取り入れたギャップ方程式 (Eliashberg 方程式)、および電磁場に関して Maxwell 方程式を自己無撞着に解き、南部空間の自己エネルギー非対角成分であるペアポテンシャルおよび対角成分である Fock 項を求めた。得られた自己エネルギーを従来の弱結合理論によるものと比較し差異を議論した。また非自明な効果として渦に対する不純物効果も調べた。

## 結果

本研究において得られた結果は以下ようになる。まず  $s$  波、あるいはより一般には偶パリティ超伝導の渦においては、弱結合においては Fock 項は出現せず、また強結合の効果も小さい。よってこの場合には、Fock 項や強結合効果を考えていない従来の研究結果が、ほぼそのまま適用可能であると考えられる。

一方、カイラル  $p$  波、あるいは多くの奇パリティ超伝導での渦においては、弱結合極限であっても  $\Delta$  と同じ程度の、無視できない大きさの Fock 項が出現することが解析計算・数値計算の両者から分かった。さらに、出現した項は系が円筒対称であるならばその効果は大

きくないと考えられる一方で、カイラル  $p$  波においては Fock 項の存在によって渦が円筒対称性を自発的に破る場合があり、さらに強結合性の導入によりその破れの傾向が強まることを発見した。この渦は二次元カイラル  $p$  波超伝導のカイラルドメインの検出に利用できると考えられるため、実験的にも重要であると考えられる。

異方的超伝導では、対称性によってはしばしば渦が円筒対称性を自発的に破ることが知られている。しかしこれまで知られていた例は、実質的に Ginzburg-Landau (GL) 方程式によって記述されている。今回考えている系は、転移点近傍では Fock 項を考えない弱結合の系と同じ GL 方程式に従うことが示せる。また弱結合に相当する GL 方程式によって得られる渦は円筒対称であることが、先行研究 [6] によって示されている。すなわち本研究で得られた対称性が破れた渦は、Ginzburg-Landau 理論を用いては記述できない。この点で、この渦はこれまでにない新奇な量子渦であると言える。

本研究で得られた、渦が円筒対称性を破る効果は、カイラル  $p$  波超伝導に限らずスピン偏極した  $p$  波超伝導や  $^3\text{He B}$  相などでの渦においても生じうると考えられる。すなわち、 $p$  波あるいは  $f$  波超伝導体・超流動体における渦を研究するに当たって、弱結合・強結合問わず、一般に Fock 項は無視できない場合があることが、本研究によって示された。

- [1] J. Bardeen, L. N. Cooper, J. R. Schrieffer, Phys. Rev. **108**, 1175 (1957).
- [2] D. J. Scalapino, “The electron-phonon interaction and strong-coupling superconductors”, in *Superconductivity*, edited by R. D. Parks (Marcel Dekker, New York, 1969) Chap. 10.
- [3] G. M. Eliashberg, Sov. Phys. JETP **11**, 696 (1960).
- [4] G. Eilenberger, Z. Phys. **214**, 195 (1968).
- [5] L. Kramer, W. Pesch, Z. Phys. **269**, 59 (1974).
- [6] T. A. Tokuyasu, D. W. Hess, J. A. Sauls, Phys. Rev. B **41**, 8891 (1990).