

称号及び氏名	博士（工学）	末松	久孝
学位授与の日付	平成 20 年	3 月	31 日
論文名	「超伝導における新奇渦糸状態の準粒子構造」		
論文審査委員	主査	萱沼	洋輔
	副査	大同	寛明
	副査	石田	武和
	副査	森	茂生
	副査	加藤	勝

論文要旨

1986年に、銅酸化物高温超伝導体が発見されて以来、従来のフォノン媒介とするBCS理論では説明できない超伝導を示す物質が非常に多く発見されてきており、現在でもなお発見され続けている。しかし、そういった物質が増えているにもかかわらず、銅酸化物超伝導体の発現機構が何であるのか未だ意見の一致をみていないなど、新しい超伝導に対するBCS理論にかわる基礎理論は確立するには至っていない。

このような超伝導の性質において、重要な特性として渦糸状態の出現がある。外部磁場が下部臨界磁場を超えたときに磁束が量子化されて発生する渦糸は、その物質の超伝導対称性を反映するという点において重要である。それだけでなく、電線として利用する場合は渦糸のピンニングが重要であり、デバイスとして利用するには磁束の運動が重要となる。

また、メゾスコピック超伝導体についても注目が集まっている。とくに、バルクでは磁束が量子化されても $\Phi = \Phi_0$ の量子化された渦糸しか観測されてこなかったが、メゾスコピック系になると形状の対称性が強く効いてくる転移温度に近い領域で $\Phi = n\Phi_0 (n \geq 2)$ の磁束を持つ渦糸が観測できるということである。この渦糸はgiant vortexと呼ばれているが、未だ直接的には観測されておらず、存在できる温度領域などまだ解明されていないことが多い。

本研究の大きな主題は、その渦糸状態を研究することで、新しく見つかった現象をミクロスコピックな面から解明することである。本研究の第1の目的は、 Sr_2RuO_4 という銅酸化物超伝導体の発現機構との関連から集中して研究されてきた物質の超伝導対称性の解明である。その候補とされる対称性の局所状態密度を比較する事で、解明に迫るものである。第2の目的は、物性物理学の各分野の枠を超えて研究されようになったメゾスコピック系についてミクロスコピックな手法を適用するものである。メゾスコピック超伝導体に対して現象論から得られた結果はその新奇な物性を示すことは明らかにしても、それがどのようなミクロスコピックな起源を持つかまでは明らかにしはしない。本論文では以上の研究の結果をまとめたものである。

本論文は、全5章で構成されており、以下に章毎の概要を示す。

第1章では、超伝導における基礎理論を振り返るとともに、計算方法として用いる Bogoliubov-de Gennes 方程式の説明を行い、超伝導において準粒子励起がどのように渦糸状態と関連しているのか、実験においてどう観測されるのかを述べた。

第2章では、 Sr_2RuO_4 について超伝導対称性に関連する実験を紹介し、対称性の候補が p -波超伝導と f -波超伝導であることを導いた。これらの Bogoliubov-de Gennes 方程式を導出し、Fourier-Bessel展開をする事で、一本の渦糸周りの局所状態密度を示した。そして、これらを比較することで大きな特徴の差があるか検証を行ったが、 p -波に比べ f -波の変化が緩やかになるという結論を得た。この局所状態密度の結果が観測可能かどうかを議論した。

第3章では、メゾスコピック系における磁場下の超伝導体中の磁束構造の現象論的な Ginzburg-Landau 方程式による研究と実験を述べ、それらの問題点を指摘し、ミクロスコピックな計算の必要性を述べた。その上で、 s -波超伝導体についての Bogoliubov-de Gennes 方程式を有限要素法を用いて離散化することで低温での正形状の超伝導板で数値計算を行った結果を示した。このとき、形状の対称性が反映される、転移点近傍でのみ有効な Ginzburg-Landau 方程式の結果とは異なり、磁束構造は必ずしも対称性を反映するわけではないことが示される。

外部磁場が下部臨界磁場を超えないときであっても、超伝導体の表面には磁場により超伝導が壊される。このとき、超伝導ギャップ内のエネルギーで超伝導体表面に surface bound state (表面束縛状態) ができる。バルクの超伝導体ではこの効果は従来無視されてきたが、しかし、メゾスコピック系では表面も占める割合が大きくこの効果は無視で

きない。そのため、まず、渦糸がない場合にこのsurface bound state が超伝導状態にどのような効果を及ぼすかを述べた。超伝導板が正方形である事を反映し、surface bound stateができる領域は表面から一定の距離だけであり、ギャップ内に構造を持たない正方形の領域が残される。この領域が、バルクと同じ領域であるといえる。つまり、磁場の効果は渦糸を発生させる以外に超伝導領域のサイズを小さくする効果があることがわかった。

次に、渦糸が1本ある場合についての結果を示した。このとき、winding number が0のvortex bound state による局所状態密度は大きなピークを与える。しかし、それ以外のvortex bound state による局所状態密度はひろがりが大きく、熱的励起が大きいときはどの固有状態を反映したものか区別が難しい事が示唆された。

さらに、渦糸が2本ある場合についての結果を示した。通常、渦糸間にはその周りを流れる超伝導電流によるLorentz力による斥力が働くために、渦糸間の距離ができるだけ遠い対角線方向に渦糸が並ぶはずであるが、軸方向に並んだ。この状態の固有状態を調べてみると、渦糸を構成する2つのvortex bound stateが非常に近くにある事で干渉効果を起こし、結合状態、反結合状態を形成していることが明らかになった。これは2原子分子の構成と非常に似ている。渦糸を原子と考えれば、渦糸の周りを流れる遮蔽電流が価電子であり結合状態がより安定である事から、渦糸分子と呼べるものを形成しているといえる。このとき、渦糸間の距離は磁場の増大とともに線形に減少するので、磁場に閉じ込め効果が強く働いており、それにより、渦糸分子の形成が行われると結論づけた。

この章の最後では $\Phi = 2\Phi_0$ のgiant vortex stateについて求めた。 $\Phi = 2\Phi_0$ のvortex bound stateとはそれを形成する電子成分とホール成分の波動関数のwinding numberの差が2である事を示している。固有関数をみるとこの状態は保たれているが、それぞれの固有エネルギーの大きさが $\Phi = \Phi_0$ の渦糸とは異なる。この通常の渦糸でみられる固有エネルギーの変化は固有関数が完全な円対称の場合に現れるということ、giant vortexを形成する準粒子の運動エネルギーがsingle vortex よりも大きいことから、形状の円対称からのずれがgiant vortex stateの場合により影響したと結論した。

第4章では、最もよく知られた異方的超伝導体であるd波超伝導体のオーダーパラメータのノード中の準粒子構造に注目した。バルクのd波超伝導体では、ノード中の準粒子の分布が空間的に変化するの、渦糸中心や不純物による散乱によるときだけであり、その他では空間的に一様である。ここで、メゾスコピック系でこのノード中の準粒子にどのような変化があるのか調べるため、d波について、有限要素法により離散化した

Bogoliubov-de Gennes方程式を導出し、そのオーダーパラメータ、局所状態密度、固有状態を数値的に求めた結果を示した。

上で述べたようにこの条件のバルクでは本来は現れない空間的な変化が得られた。また、その変化はノードのある対角線方向に状態が多い構造だけでなく、ノードのある方向には状態が少ない、バルクでは得られない構造も得られた。これはFermi面上で散乱が可能なノード方向だけでなく、閉じ込められた事でx, y 軸方向にもある波数では散乱が有効になったと示唆される。また、オーダーパラメータの超伝導体の端からの回復長も非常に長くなっていた。これは閉じ込められたことによる固有関数の離散化とその振動が直接反映されている結果であった。従って、メゾスコピック系のオーダーパラメータのノード中の準粒子構造は、**surface bound state** や**vortex bound state**とは異なる形で特徴的な変化を示す。s-波で得られている結果と比較すれば、外部磁場中で新たな物性がd-波では見つかるかと期待できる。

第5章では、本研究で得られた結果の総括を行った。

審査結果の要旨

本論文は、異方的な超伝導体における渦糸の構造とメゾスコピック超伝導体の微視的な観点からの理解を目的としたものであり、そのための数値計算手法を開発するとともに、異方的 f-波超伝導体中の渦糸まわりの準粒子構造、メゾスコピック s-波超伝導正方形板の磁場中の渦糸構造、メゾスコピック異方的 d-波超伝導正方形板の準粒子構造などについて研究し、以下の成果を得ている。

1. Sr_2RuO_4 で生じているトリプレット超伝導に関して、その対称性がp-波であるかf-波であるかが問題となっている。それを明らかにする目的で、磁場中での磁束まわりの準粒子構造を、超伝導の微視的理論であるBogoliubov-de Gennes方程式を数値的に自己無撞着に解くことにより計算した。対称性の違いによる準粒子構造の相違を、走査トンネル分光等の実験で観測することにより、超伝導対称性を判定することが可能であるとの理論的結果を得た。
2. これまで、メゾスコピック超伝導体に対する理論的研究は、現象論的なGinzburg-Landau方程式を用いたもののみであったが、より微視的なレベルからの理解および新現象の発見を目指して、有限要素法を応用することにより、微視的理論であるBogoliubov-de Gennes方程式を様々な形状のメゾスコピック超伝導体に対して適用可

能とする新しい数値計算方法を開発した。

3. この方法を正方形の従来型 s-波超伝導体に対して適用し、これまで現象論で求められていた渦糸構造に加えて、渦糸分子と呼ばれる構造が安定になることを発見し、その準粒子構造を詳しく調べた。さらに、これまで現象論によってのみ求められていた巨大磁束状態の安定性を微視的理論で示し、準粒子構造を詳しく調べることで、巨大磁束が走査型トンネル顕微鏡等で観測可能であるとの結果を得た。

4. 異方的な d-波超伝導体に対して上記の方法を拡張し、正方形の d-波超伝導体に適用することにより、超伝導エネルギーギャップ中のノード方向の状態がナノサイズに閉じ込められるために空間変調を受けた状態になることを見出した。この結果は、エネルギーギャップ内の準粒子が超伝導対称性と超伝導体の形状に敏感であり、その変化を調べることが超伝導対称性の研究に役立つことを示している。

以上の成果は、ナノ構造超伝導体に対して申請者が開発した微視的な計算方法が有効であることを示すとともに、ナノ構造に特有の新奇な渦糸状態の出現を理論的に予言しており、物性物理学への貢献は大である。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。

本委員会は、本論文の審査および最終試験の結果から、博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。