

論文審査の結果の要旨

氏名 永井 佑紀

本学位論文は6章からなり、1章は鉄系超伝導体についての序論および本論文の概要、2章は鉄系超伝導体の核磁気共鳴および超流動密度の解析、3章は多バンド超伝導体の界面状態の解析、4章は s_{\pm} 波をもつ超伝導体における渦糸での散乱の解析、5章は一般の超伝導体における回転磁場中での比熱および熱伝導率の理論、6章は本論文の結論および今後の展望を述べている。

超伝導は、物性物理学のなかでも重要なテーマの一つであるが、特に1980年代に銅酸化物において高温超伝導が発見されたことに端を発し、遷移金属化合物における、従来とは異なる超伝導が物性物理学の新たな分野として注目されてきた。高温超伝導においては、単に超伝導転移する温度が高いだけでなく、電子間のクーロン斥力相互作用の効果として超伝導が起きる可能性が指摘され、超伝導の電子機構という点でも興味をもたれている。特に、2008年に我が国の細野のグループによるブレークスルーが起き、鉄化合物（鉄と砒素等の化合物を基本とする）において、絶対温度50Kを超える温度での超伝導が発見された。鉄は、磁石になることから分かるように、普通は強磁性と関連した物質であり、超伝導とはあまり縁が無いというのが常識であったので、新たなテーマとして多くの研究が興った。一つの焦点は、銅化合物と鉄化合物に対して、似た点および相違点は何か、という点である。銅酸化物のときには電子のもつバンド構造（波数の関数としてのエネルギー）が比較的簡単であったのとは対照的に、鉄系超伝導体のバンドは鉄化合物であることを反映して複数のバンドが関与する。理論的には、鉄化合物に対して黒木等により電子機構が提案され、スピン揺らぎ媒介という点では銅化合物と似た機構であるとしても、鉄化合物では多バンド構造のために複数のバンドが超伝導に関与し得ることが示されている。特に、電子機構超伝導では、超伝導を記述するギャップ関数が、波数の関数として符号を変える「異方的超伝導」という特徴をもつと考えられており、銅系超伝導体ではそれが観測されてきたのに対し、鉄系超伝導体では、各バンドではギャップ関数は定符号であるが、異なるバンドの間では反対符号をとる、「 s_{\pm} 」と現在呼ばれる新奇な可能性が理論的に指摘された。これを実験的に観測できるか、というのが次の重要な問題となる。

以上の背景のもとに、本論文は、このような超伝導対称性の同定を行うためには、どのような実験的をどのように解析すればよいかを理論的に研究したものである。眼目としては、多バンドをもつ系に特徴的な s_{\pm} という超伝導が実験結果にどのように表れるかという点である。具体的には、まず、核磁気共鳴における緩和率及び超流動密度の温度依存性が、鉄系化合物に対して理論的に提案されている5バンド・モデルを用いて計算された。結果として、 s_{\pm} 超伝導では、核磁気緩和率 $1/T_1$ が超伝導転移温度 T_c 直下で、異方的超伝導を特徴付けるコヒーレンス・ピークを持たず、低温で温度の逆冪乗則で減少し、超流動密度が低温で平坦になり得ることが示された。

鉄系超伝導体にたいしての実験結果は現在のところ、実験グループや試料によりばらつきがあるものの、おおむね、この理論と整合する。

次に、超伝導ギャップ関数の符号に敏感な現象として、超伝導体に、別の系を接合させた界面にできる Andreev 束縛状態と呼ばれる状態に着目した。実験的にはポイントコンタクト・スペクトロスコピーによって検出可能である。界面に対する従来の準古典近似を多バンド系へ拡張することにより、多バンド系における界面のスペクトル、特にゼロバイアス・コンダクタンスピークという特徴が出現する条件が導出された。その条件は、超伝導秩序変数の大きさには依存せず相対的な位相に依存することが見いだされた。 s_{\pm} 超伝導体に対しては、スペクトルに細かい構造はあるものの、直接これを判定するのは難しい、という結果が得られた。

さらに、超伝導ギャップ関数の符号に敏感な別の現象として、様々な超伝導状態にたいする、磁場中超伝導体に存在する渦糸における不純物効果が調べられた。これは、走査型トンネル顕微鏡・分光 (STM/STS) により測定可能である。渦糸まわりにできる低エネルギー Andreev 束縛状態が非磁性不純物によってどのように散乱されるかが、低エネルギー領域で有効な Kramer-Pesch 近似を用いて調べられた。それにより、多バンド系の渦糸中では、単一バンド系には存在しない符号反転前方散乱が生じることが見出された。特に、電子的フェルミ面とホール的フェルミ面という複数のフェルミ面を持つ鉄系超伝導体の場合、 s_{\pm} 波超伝導を仮定すると、波数の関数としての散乱強度に対して、特徴的なアーク状ピークが現れることが見出された。

最後に、超伝導ギャップが符号を変える箇所 (ノード) の運動量空間中の位置を実験的に検出できる方法の一つである回転磁場の中の比熱・熱伝導率が、低磁場領域で Kramer-Pesch 近似を導入して解析された。一般的な定式化が行われたあと、複雑なフェルミ面を持つ系への適用例として、 $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$ という化合物が解析され、実験結果が再現できることが見だされた。

以上のように、本学位論文では、鉄系超伝導体が提案されている s_{\pm} 波超伝導をもつか否かを実験的に調べる手段についての理論的な知見が得られた。さらに本研究は、多バンド超伝導の解析ととらえることもでき、鉄系超伝導体以外のより一般的な超伝導体の物性に関する示唆も含まれている。これらが鉄系超伝導体について実験とどこまで合致するか、また他の超伝導体に対してどの程度普遍的であるか、という点は今後の研究をまつ必要があると思われるが、本学位論文で得られた成果は、多バンド超伝導体の理解に重要な貢献をするだけでなく、将来的にも、多彩な超伝導体の物理の発展にも資することが期待される。

なお、本論文の一部は加藤雄介准教授および、林伸彦、中村博樹、町田晶彦、奥村雅彦、中井宣之の各氏との共同研究であるが、論文提出者が主体となって研究したものであり、論文提出者の寄与が十分であると判断される。

したがって、審査員全員により、博士 (理学) を授与できると認める。