

(続紙 1)

京都大学	博 士 (理 学)	氏名	水上 雄太
論文題目	Effect of impurity scattering and electron correlations on quasiparticle excitations in iron-based superconductors (鉄系超伝導体における不純物散乱と電子相関の準粒子励起への影響)		
(論文内容の要旨)			
2006年に発見された鉄系超伝導においては、その発見当初よりその超伝導発現機構を解明するための実験が数多く行われてきた。超伝導状態における電子対形成機構を明らかにする上で、最も重要な物理量の一つが超伝導ギャップであり、超伝導ギャップは超伝導の対形成相互作用の対称性を反映する。鉄系超伝導においては様々な実験手法により、超伝導ギャップ構造や対称性の検証が行われてきており、そのギャップ構造はギャップのゼロ点であるノードを持つものから持たないものまで多様性に富むことが明らかとなってきた。一方、理論的な立場から主にスピン揺らぎ、或いは軌道揺らぎを媒介とした電子対形成機構により、<i>s</i>波や<i>d</i>波、更には時間反転対称性を破るような超伝導ギャップが提唱されてきた。これは<i>d</i>波超伝導であることが実験、理論両面より概ね合意に至っている銅酸化物高温超伝導体における状況とは異なっており、鉄系超伝導体の特徴の一つであると言える。鉄系超伝導体の超伝導発現機構を明らかにするためには、これら超伝導ギャップ対称性を決定することが非常に重要である。 このような背景のもと、本論文では (1) 電子線照射を用いた鉄系超伝導BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂の超伝導ギャップ構造における不純物効果を報告している。 本研究においては、鉄系超伝導における超伝導対称性を実験面より決定するために電子線照射を利用した点欠陥導入という手法により、鉄系超伝導体であるBaFe₂(As_{1-x}P_x)₂の超伝導ギャップ構造における不純物効果を明らかにした。これまでに、不純物効果の実験は主に化学元素置換という手法により行われており、これは結晶の一部の元素を他の元素で置き換え、その置換量に対し主に超伝導転移温度に与える影響を調べるといったものである。一方、電子線照射を用いた不純物導入においては、元素置換では避けられない格子定数やキャリア密度といった量の変化が比較的小さくすみ、主に不純物散乱の効果のみを議論することができる。更に、同一試料に対して逐次点欠陥を追加しながら測定を行うことができるという利点がある。本論文では、電子線照射を逐次行った試料に対する、磁場侵入長の温度依存性の変化を報告している。磁場侵入長は超伝導ギャップ構造を最も直接的に反映する物理量の一つである。未照射の試料は温度に比例する磁場侵入長を示すことが知られているが、これは超伝導ギャップにおいてノードが存在することを反映している。これに点欠陥を導入すると、不純物散乱により束縛状態が形成され、<i>T_c</i>の温度依存性が出現する。更に欠陥量を増やすと極低温での温度依存性はほぼ消失し、ギャップの開いた熱活性型の温度依存性が出現した。これはこの系におけるノードが不純物散乱により消失することを示しており、これは<i>s</i>波の場合にのみ期待される。従って、この系における超伝導対称性は<i>s</i>波対称性であることが本成果により明らかとなった。ここで興味深いことに、より照射量を増大させると再び<i>T_c</i>の温度依存性が出現することが観測された。これは、不純物散乱により再び束縛状態が形成されていることを示している。本論文では、この磁場侵入長の不純物散乱に対する全体の変化を定性的に理解するため、超伝導ギャップに符号反転がない場合とある場合の<i>s</i>波をモデルとした計算を行っている。その結果、			

符号反転を有する s 波の場合で観測された非単調な磁場侵入長の変化を定性的に説明可能であることが分かった。このように、バルク試料に対して電子線照射を行い、超伝導ギャップにおける不純物効果からその超伝導対称性を決定することは前例がなく、未だ対形成機構が明らかとなっていない他の非従来型超伝導においても本手法が応用されることが期待される。

高温超伝導を含むいわゆる非従来型の超伝導はしばしば反強磁性秩序といった他の長距離秩序相近傍で出現する。その秩序相を圧力や化学組成といったパラメータで制御しそれが完全に消失する点を、秩序相への相転移が二次相転移の場合、量子臨界点と呼ぶ。この量子臨界点近傍では、強い量子揺らぎが発達し、従来の金属理論であるフェルミ液体論では説明できない異常物性が出現することが数多く報告されている。更に、特にこの量子臨界点近傍で非従来型超伝導が発現するといった報告がなされている。このような議論は、重い電子系超伝導体、銅酸化物高温超伝導体や鉄系超伝導体といったいわゆる強相関電子系において発現する超伝導において広くなされており、固体物理学の中心的課題となっている。しかしながら、この量子臨界点近傍における量子揺らぎが超伝導状態における性質にどのような影響を及ぼすかはまだあまり知られていなかった。このような背景のもと、本論文では

(2) 鉄系超伝導体 $A\text{Fe}_2\text{As}_2$ ($A=\text{K}, \text{Rb}, \text{Cs}$) における準粒子励起の変化を報告している。

近年、鉄系超伝導体 $A\text{Fe}_2\text{As}_2$ ($A=\text{K}, \text{Rb}, \text{Cs}$) で、 A サイトの元素をよりイオン半径の大きな元素で置換すると通常状態における電子の有効質量が大きく増大されることが報告されており、量子臨界点との関係性が盛んに議論されている。また、この系の中で有効質量が最も小さい $A=\text{K}$ においては、大きくバンド依存する超伝導ギャップ構造が実現されていることが報告されている。このような系において、超伝導状態における準粒子励起が有効質量の増大と共にどのように変化するかを明らかにすることは上記課題を明らかにする上で非常に重要である。本論文では、既に報告されている $A=\text{K}$ の磁場侵入長に加え、 $A=\text{Rb}, \text{Cs}$ の磁場侵入長測定を新たに行い、超伝導電子密度の温度依存性を $A=\text{K}$ と合わせて議論している。これらの物質における超伝導電子密度の超伝導転移温度以下での全体的な振る舞いはほぼ一致している一方、極低温における超伝導電子密度の温度依存性が異なることが明らかとなった。特に、電子の有効質量が最も大きいと報告されている $A=\text{Cs}$ においては、 $A=\text{K}$ と比較して準粒子励起の磁場侵入長への寄与が大きく減少していることが明らかとなった。この結果は、これまでに重い電子系超伝導体において超伝導電子密度が有効フェルミ速度の波数依存性を導入して説明できるという報告を、多バンド系に拡張することで理解される。実際、 $A\text{Fe}_2\text{As}_2$ ($A=\text{K}, \text{Rb}, \text{Cs}$) において超伝導状態における有効フェルミ速度に波数依存性を導入し、超伝導ギャップの $1/2$ 乗に比例するような関係性を仮定し、多バンドで解析することで、 $A=\text{K}$ と Cs における超伝導電子密度の変化を再現することができる。この結果は、超伝導ギャップと超伝導状態における有効フェルミ速度に新たな関係性を打ち立てるものである。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

鉄系超伝導体は強相関電子系において最も盛んに研究されているテーマの一つであり、高温超伝導、量子臨界点やBCS-BECクロスオーバーといった固体物理学における主要課題を数多く含んでいる。

鉄系超伝導体においては、同一の結晶構造を持つような非常に近い系においても、その超伝導ギャップにノードを持つものや持たないものなど、様々な実験結果が報告されてきた。このような超伝導ギャップを統一的に説明するような超伝導対称性を決定することが重要課題であった。水上氏はこの問題に取り組むために、超伝導対称性に対して敏感な手法である不純物効果を研究した。特に、電子線照射という手法を用い超伝導ギャップ構造における不純物効果を系統的に調べるという新しい手法を確立したことは高く評価できる。本論文の研究成果により、鉄系超伝導の発現機構の理解が大きく進展することが期待される。

一方、強相関電子系において量子臨界点と非従来型超伝導の関係性が盛んに研究されているが、量子臨界点が超伝導状態における性質にどのような影響を及ぼすかはあまり分かっていなかった。そのような中、水上氏は鉄系超伝導体の中でも特に電子相関が強いことが報告されている $A\text{Fe}_2\text{As}_2$ ($A=\text{K}, \text{Rb}, \text{Cs}$) の超伝導電子密度の変化を明らかにした。本結果は、先行研究の重い電子系超伝導体における超伝導ギャップと有効フェルミ速度との関係を、非常に複雑な超伝導ギャップ構造を有する系に拡張することで説明できる。このような、超伝導状態における量子臨界点の影響を系統的に調べた結果はこれまでにあまりなく新しい成果と言える。

このように、本論文の研究成果は近年盛んに研究されている鉄系超伝導体を理解する上で、大きく貢献するものであると認められる。よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成28年1月20日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った。なお水上氏は、博士課程を2年で中退し東京大学の助教になっていたため、論文博士であるが、論文博士に要求される学識は十分にあることを審査員全員が認め、学位審査は合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降