

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	山下卓也
論文題目	Study of superconducting gap structure in prototype heavy fermion CeCu_2Si_2		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>強相関電子系の物理は、現代の固体物理学におけるホットトピックであり、理論・実験の両面から盛んに研究が行われている。実際、強相関電子系においては非フェルミ液体、超伝導と磁性・新奇秩序相の共存、非従来型超伝導などが観測されている。例えば、ある種のU系化合物では時間反転対称性の破れた超伝導状態の実現が示唆されており、興味を持たれている。また、強相関電子系においてはしばしば秩序相の消失点(量子臨界点)近傍で非従来型超伝導が発現することが知られており、磁気揺らぎ等を媒介とした超伝導が実現すると示唆されている。山下氏は、非従来型超伝導の性質を調べる上で非常に強力な測定手法であるネルンスト係数測定と熱伝導率測定を駆使し研究を行った。ここでネルンスト係数測定は、超伝導転移温度T_c以上における超伝導揺らぎを捉える上で強力なプローブとして知られている。また、熱伝導率測定は低エネルギーの準粒子励起に対して敏感であり、超伝導ギャップ構造を調べる上で強力なプローブとして知られている。ここで、超伝導ギャップ構造は超伝導電子対の対形成機構と密接に関連しているため、これを調べることは非常に重要である。</p> <p>博士論文の主題である「重い電子系超伝導体CeCu_2Si_2における超伝導ギャップ構造の研究」は第5章に記述されている。CeCu_2Si_2は1979年にSteglich氏らにより発見された初の重い電子系超伝導体である。実際、電子比熱係数γは約1 J/molK^2であり、有効質量が自由電子の1000倍程度に達した重い電子状態となっている。また、T_cにおいて大きな比熱の跳びが観測されていることから重い電子がクーパー対を形成することが示唆される。またNMRのナイトシフトがT_c以下で減少していることから、スピン-重項超伝導であることが分かる。さらに、γと電気抵抗率ρの温度依存性がそれぞれ$T^{1/2}$、$T^{3/2}$となることから、3次元の反強磁性量子臨界点近傍で超伝導が発現することを示唆している。このことから、磁気揺らぎを媒介とした非従来型超伝導が実現していると考えられている。実際、NMR実験によるとT_cでコヒーレンスピークがなく、またT_c以下で$1/T_1$の温度依存性がT^{-3}であることが報告されている。さらに中性子散乱実験により、ギャップ関数に符号反転のある超伝導体に特徴的な共鳴ピークが観測されている。これらの結果より、CeCu_2Si_2はラインノードのあるd波超伝導体であると考えられてきた。一方で、最近の比熱測定によるとフルギャップ超伝導であるとの報告がなされている。しかしながら、この系はLDA+U法による計算から重い電子面と軽いホール面が存在することが知られている。ここで比熱測定は重い準粒子からの寄与が支配的となるため、単に重い電子面にノードが入る可能性を排除したに過ぎず、軽いホール面にノードが入る可能性が依然として残ったままである。</p> <p>そこで山下氏は、軽いバンドからの準粒子励起に敏感な測定手法である熱伝導率測定を行なった。測定の結果、ゼロ磁場における残留熱伝導率は無視できるほど小さ</p>			

く、また磁場依存性はノードのある超伝導体とは全く異なる振る舞いを示したことから、軽いホール面にノードが存在しないことを明らかにした。また共同研究者である東大の竹中氏による磁場侵入長測定の結果も、軽いホール面にノードが存在しないことを示唆する結果となっており、山下氏による熱伝導率測定の結果を支持している。また山下氏は独自に比熱測定も行ない、先行研究と同様に重い電子面にノードがないことを明らかにした。以上より、 CeCu_2Si_2 はフェルミ面全体でギャップが開くフルギャップ超伝導であることを初めて明らかにした。さらにギャップ関数における符号反転の有無を議論するため、フランスのエコールポリテクニクにて電子線照射による点欠陥の導入を行い、位相敏感なプローブである対破壊効果の研究も行った。その結果、 CeCu_2Si_2 の超伝導はギャップ関数に符号反転のある超伝導体と比べ、不純物に対して非常に強いことが分かった。以上より CeCu_2Si_2 はギャップ関数に符号反転のない、フルギャップの s_{++} 波超伝導体であることを明らかにした。山下氏の結果は、長年の考えとは異なり、非常に斥力の強い電子同士がオンサイトでの引力相互作用を通じて超伝導に凝縮するという結果を与える。

上記の内容に加え、第3章において、(1)重い電子系超伝導体 URu_2Si_2 の超伝導揺らぎの研究が記載されている。 URu_2Si_2 は、角度回転熱伝導率や比熱測定、さらにはカー効果の実験から時間反転対称性の破れたカイラル d 波超伝導が実現していると示唆されている。したがって、山下氏はそのエキゾチックな超伝導状態に関わる超伝導揺らぎを研究するため、 URu_2Si_2 の超純良単結晶試料を用いてネルンスト係数測定を行った。その結果、 T_c よりも3倍程度高い温度からネルンスト係数が急激に増大することがわかった。これは超伝導揺らぎによるものであると考えられる。重要なことに、この超伝導揺らぎに起因したネルンスト係数の増大は、試料の純良性が増すほど顕著に現れた。これは通常のカウ型超伝導揺らぎの理論において記述される振る舞いとは異なる。さらに、ペルチェ係数の大きさはカウ型超伝導揺らぎの理論から予想される値の100万倍にも達することがわかった。冒頭でも述べたように、 URu_2Si_2 では時間反転対称性の破れたカイラル d 波超伝導が実現していると考えられており、山下氏が観測した異常なネルンスト効果はこのカイラル超伝導に起因したものであるといえる。実際、山下氏の結果は時間反転対称性の破れた超伝導に特有なBerry位相の揺らぎに基づく最近の理論において良く説明される。

また同じく第3章において、(2) BiS_2 系超伝導体 $\text{Nd}_{0.71}\text{F}_{0.29}\text{BiS}_2$ の超伝導ギャップ構造の研究が記載されている。 BiS_2 系超伝導体は、最近首都大の水口氏らにより発見された二次元 BiS_2 層を有する新規超伝導体である。この BiS_2 系超伝導体の中には T_c が10 Kを超える物質もあり、また結晶構造と電子構造における鉄系超伝導体との類似性から、その超伝導発現機構に興味を持たれている。山下氏は BiS_2 系超伝導体 $\text{Nd}_{0.71}\text{F}_{0.29}\text{BiS}_2$ の超伝導ギャップ構造を決定するため、熱伝導率測定を100 mKの極低温まで行った。測定の結果、ゼロ磁場における残留熱伝導率は無視できるほど小さく、また磁場依存性はノードのある超伝導体とは全く異なる振る舞いを示したことから、ノードを持たないフルギャップ超伝導であることを明らかにした。さらにこの系は残留電気抵抗率が大きく、不純物による対破壊効果が弱いという事実を加味することにより、通

常の s 波超伝導であると結論付けた。山下氏の結果は、 BiS_2 系超伝導体の超伝導発現機構を決定する上で非常に重要な結果であると考えられる。

これらの 3 章の研究内容は、 CeCu_2Si_2 のギャップ構造を決定するために開発された実験手法で山下氏が中心となって行った研究であるので、本博士論文に関連する内容である。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

超伝導は電子対の形成により起こるが、ほとんどの超伝導体では電子対形成は格子振動により起こる。CeCu₂Si₂は1979年に発見された初めての重い電子系超伝導体であり、初めての磁気揺らぎを媒介とした非従来型超伝導体であると考えられてきた。その強い証拠となったのが超伝導の対称性が超伝導ギャップにノードを持つ*d*波であるとする実験結果である。本研究で山下氏は、超純良単結晶に対し、比熱、熱伝導率、磁場侵入長測定の多角的な測定を行い、どのフェルミ面にノードが存在しないことが分かり、フルギャップ超伝導であることを初めて明らかにした。さらにギャップ関数における符号反転の有無を議論するため、電子線照射を用いた対破壊効果の研究も行った。その結果、ギャップ関数に符号反転のある超伝導体と比べ、CeCu₂Si₂の超伝導は不純物に対して非常に強いことが分かった。以上よりCeCu₂Si₂はギャップ関数に符号反転のない、フルギャップの*s*₊₊波超伝導体であることを明らかにした。この結果は、長年の考えとは異なり、非常に斥力の強い電子同士がオンサイトでの引力相互作用を通じて超伝導に凝縮するという結果を与える。

電子が強いクーロン斥力で相互作用する強相関電子系における超伝導発現機構は、現代物理学における最重要課題の一つである。強相関電子系では磁気揺らぎ等を媒介とした非従来型の対形成機構を持つと30年近く信じられてきた。本論文の結果は、このような非従来型超伝導体の対形成機構について、従来の概念を覆すものであり、その学術的価値は高く、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29年1月13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結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降