

機関番号：12608

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21740250

研究課題名 (和文) 熱伝導率による重い電子系超伝導状態における超伝導マルチギャップ効果の解明

研究課題名 (英文) Multigap effect on the heavy-fermion superconductors revealed by thermal conductivity

研究代表者

町田 洋 (MACHIDA YO)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：40514740

研究成果の概要 (和文)：

近年、鉄砒素系超伝導体を始め多くの物質で見出されているマルチギャップ超伝導性について、その効果における電子相関の影響を重い電子系を含む相関電子もつ系における超伝導体を対象に研究を行った。その結果、鉄元素を含むマルチギャップ超伝導体では、鉄の $3d$ 電子に起因した異常に増強された熱伝導が明らかになった。また、Yb元素を含む初めての重い電子系超伝導体である β -YbAlB₄ では超伝導転移近傍の常伝導状態において、非従来型の量子臨界点の存在を示唆する特異な熱輸送特性を見出した。

研究成果の概要 (英文)：

Effect of the electronic correlation on the multigap superconductivity has been investigated on the correlated electron system, including the heavy fermion system. The results have revealed the enhanced heat conduction in the Fe-based multigap superconductor Lu₂Fe₃Si₅ due to the dominant contribution of Fe $3d$ -electrons to the gap bands. Moreover, the anomalous heat transport phenomena as an indication of unconventional quantum criticality has been found in the first heavy-fermion superconductor β -YbAlB₄.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性Ⅱ

キーワード：熱伝導率、マルチギャップ超伝導、重い電子系超伝導

1. 研究開始当初の背景

フェルミ面上に大きさの異なる複数のギャップをもつ超伝導体をマルチギャップ超伝導体と呼ぶ。この現象は、BCS理論で良く理解されるいわゆる従来型の超伝導に限らず、重い電子系超伝導体などの非従来型超伝

導にも広く見られる現象である。また、最近盛んに研究されている鉄系超伝導体でも、その超伝導発現機構においてマルチギャップの重要性が指摘され、注目を集めている。このようにマルチギャップ超伝導は多くの系に共通して見られる普遍的な現象であるが、

マルチギャップ超伝導の特性について詳細はあまり良く分かっていない。特に系の電子相関とマルチギャップの関係は、異方的超伝導を理解する上でも重要なテーマであるが未解明な点が多い。

2. 研究の目的

このような背景を踏まえ、本研究では電子相関のある系におけるマルチギャップ超伝導性を明らかにし、超伝導準粒子状態における低エネルギー励起構造への影響を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

電子相関とマルチギャップの関係を明らかにするために、本研究ではまずFeの3d電子が超伝導の発現に関わるとされるマルチギャップ超伝導Lu₂Fe₃Si₅に注目し、熱伝導率測定から3d電子がマルチギャップ超伝導にもたらす影響を調べた。次に、Yb元素を含む初めての重い電子系超伝導体であるβ-YbAlB₄の極低温下における熱伝導率を測定し、量子臨界点における重い準粒子状態と超伝導の関係を調べた。

4. 研究成果

Lu₂Fe₃Si₅は転移温度を6 Kにもつ超伝導体である。鉄元素は正方晶の結晶中でc軸方向への一次鎖と、ab面内に平行な四角格子を形成している。このような特徴的な結晶構造を反映して、次元性の異なるいくつかのフェルミ面をもつことがバンド計算から明らかにされている。Lu₂Fe₃Si₅が大きさの異なる2つの超伝導ギャップをもつことは、比熱測定から初めて明らかにされた。比熱の温度依存性に、超伝導転移にともなう飛びに加えて、T_c/5付近に小さな肩状の構造が観測され、その解析から大きさの比が4:1の2つのギャップをもつことが見出された。我々は、Lu₂Fe₃Si₅の低エネルギー励起構造をより詳細に明らかにするために、希釈冷凍機を用いた極低温・磁場中熱伝導率測定を行った。ここで、熱伝導率は非局在の準粒子励起のみを見るため、低エネルギー励起を調べる上で非常に有効なプローブである。

図1にゼロ磁場での熱伝導率κ/Tの温度依存性を示す。T_c ~ 6 Kで超伝導転移にともなう異常と、3 K付近に肩状の構造を観測した。超伝導状態では、ギャップが開くことで電子の状態密度が下がるために、通常、熱伝導に対する電子の寄与は減少する。一方、フォノンの熱伝導への寄与は、電子による散乱が抑

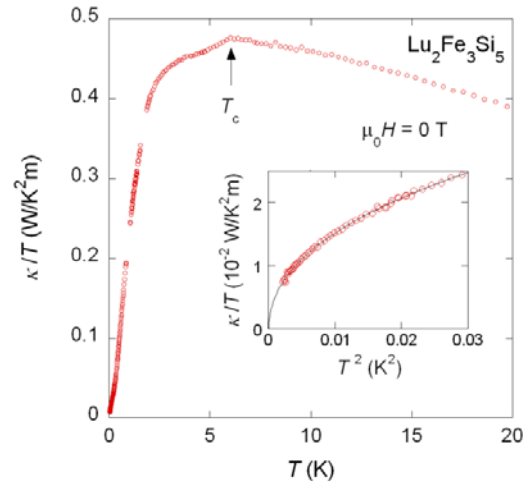


図1: Lu₂Fe₃Si₅の熱伝導率κ/Tの温度依存性。挿入図: κ/TのT²に対するプロット。

制されるため増加する。3 K付近に観測された構造は、このフォノンの寄与の増大により出現したと理解される。次に、挿入図で示す低温部分に目を向けてみる。低温極限における超伝導状態での熱伝導率は、 $k/T = k_0/T + bT^\alpha$ と表される。ここで、第一項は電子、第二項はフォノンの寄与を表す。挿入図に実線で示すように、 k_0/T 、 b 、 α をパラメータとしてフィッティングを行った結果、 $k_0/T = 0.000 \pm 0.005 \text{ W/K}^2\text{m}$ 、 $b = 0.11 \text{ W/K}^2 \cdot \text{m}$ 、 $\alpha = 1.8$ のときに実験結果を最もよく再現した。一般的に、ギャップにノードをもたないフルギャップ超伝導の場合 k_0/T はゼロとなるが、ノードをもつ場合はノード付近の準粒子の励起により k_0/T は有限の値をとる。Lu₂Fe₃Si₅において k_0/T は限りなくゼロに近いことから、フルギャップの超伝導であることが導かれる。一方、フォノンの関しては、試料境界で散乱されるようなバリスティックな伝導で期待される温度の3乗に比例した振る舞いとは異なり、冪 α は3より小さい。これは試料表面でフォノンの鏡面散乱が起こる場合に期待される現象である。

次に、熱伝導率の磁場依存性に議論を移す。図2は各温度で測定したκ/Tの磁場依存性である。特徴的な点として、低磁場での熱伝導率の急激な増加と、高磁場域での飽和現象が観測されたことが挙げられる。この傾向は温度の降下とともにより顕著になる。挿入図に示すように0.1 Kでは、1 T ($H/H_{c2} \sim 0.2$)程度の低磁場でκ/κ_nはノーマル状態の8割程度まで回復する。このような振る舞いは、マ

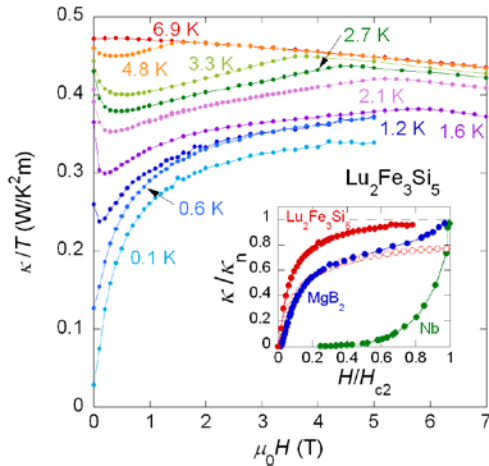


図2: $\text{Lu}_2\text{Fe}_3\text{Si}_5$ の熱伝導率 κ/T の磁場依存性。挿入図: 0.1 Kのデータと他物質との比較。縦軸はノーマル状態の熱伝導率 κ_n で規格化している。

ルチギャップ超伝導体の典型例である MgB_2 と類似しているが、フルギャップ超伝導体 Nb に見られる低磁場での磁場に鈍感な振る舞いとは対照的である。ここで、 $\text{Lu}_2\text{Fe}_3\text{Si}_5$ に見られる κ/κ_n の増大は MgB_2 のそれと比較してより顕著であることを強調しておく。 MgB_2 の κ/κ_n の磁場依存性は、マルチギャップ超伝導の特徴として捉える事ができる。低磁場での急激な上昇は、小さなギャップが磁場で抑制されたことによる準粒子励起の増加によって引き起こされる。そのため、低磁場域の肩構造が見られる磁場は仮想的な“上部臨界磁場 H_{c2}^s ”と捉える事ができ、大小のギャップの比 Δ_s/Δ_1 とギャップが開くそれぞれのバンドのフェルミ速度の比 $v_{F,1}/v_{F,s}$ で与えられる($H_{c2}^s/H_{c2} \sim (\Delta_s/\Delta_1)^2(v_{F,1}/v_{F,s})^2$)。一方、 κ/κ_n が飽和傾向を示す中間磁場域(“仮想的なノーマル状態”)での κ/κ_n の値は、 $v_{F,1}/v_{F,s}$ の2乗に逆比例する。ここで、 Δ_s/Δ_1 は $\text{Lu}_2\text{Fe}_3\text{Si}_5$ と MgB_2 の両者で同程度($\sim 1/4$)、 $v_{F,1}/v_{F,s}$ は MgB_2 で1であることが実験的に分かっている。従って、 $\text{Lu}_2\text{Fe}_3\text{Si}_5$ と MgB_2 の κ/κ_n の磁場依存性の定量的な違いは、ただ一つのパラメーター $v_{F,1}/v_{F,s}$ の違いによって説明できるはずである。挿入図に白丸で示すデータは $v_{F,1}/v_{F,s}$ をチューニングパラメータにして $\text{Lu}_2\text{Fe}_3\text{Si}_5$ のデータを MgB_2 のそれに重なるようにスケールさせたものである。その結果、 $v_{F,1}/v_{F,s} \sim 0.8$ のときにより一致が得られ、 $\text{Lu}_2\text{Fe}_3\text{Si}_5$ ではバンド毎に有効質量が異なる

こと、そして軽いバンドに小さいギャップが開くことが分かった。

さらに興味深いことに、バンド毎の有効質量の違いは、混合状態での熱伝導率の温度依存性に非常に特異な現象をもたらすことが分かった。 H_{c2} 以下の磁場下での κ/T には低温で顕著な増大が見られ、磁場の増大とともに明瞭になっていく様子が観測された。この現象は、軽いバンドに開いた小さなギャップを超えた準粒子励起の影響が、軽いバンドに敏感な熱伝導率により顕著なかたちとなって表れた結果である。

このようにして、 $\text{Lu}_2\text{Fe}_3\text{Si}_5$ においてバンド毎に有効質量が異なることが見出されたわけであるが、このことは3d電子の各バンドへの寄与が異なることを示唆している。従って、今回観測された混合状態における熱伝導率の特異な増大は、3d電子の存在がマルチギャップ超伝導性に如実に反映された結果であると言える。

この結果を踏まえ、さらに重い電子状態におけるマルチギャップ効果を明らかにすべく、Yb元素を含む初めての重い電子系超伝導体 $\beta\text{-YbAlB}_4$ の極低温熱伝導率測定を行った。その結果、超伝導転移近傍において非従来型の量子臨界状態に起因した異常な熱輸送現象を見いだした。現在、より詳細な解析を進行中である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計15件)

- ① Y. Machida, S. Sakai, K. Izawa, H. Okuyama, and T. Watanabe, “Enhanced Quasiparticle Heat Conduction in the Multigap Superconductor $\text{Lu}_2\text{Fe}_3\text{Si}_5$ ”, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 107002 (2011), 査読有り
- ② Rieko Ishii, Dixie Gautreaux, Keisuke Onuma, Yo Machida, Yoshiteru Maeno, Satoru Nakatsuji, and Julia Y. Chan, “Low-Dimensional Structure and Magnetism of the Quantum Antiferromagnet $\text{Rb}_4\text{Cu}(\text{MoO}_4)_3$ and the Structure of $\text{Rb}_4\text{Zn}(\text{MoO}_4)_3$ ”, *J. Am. Chem. Soc.* **132**, 7055 (2010), 査読有り
- ③ Yo Machida, Satoru Nakatsuji, Shigeki Onoda, Takashi Tayama, and Toshiro Sakakibara, “Time-reversal symmetry

breaking and spontaneous Hall effect without magnetic dipole order”, Nature **463**, 210 (2010), 査読有り

[学会発表] (計31件)

- ① 町田洋, 伊藤淳史, 宗義尚, 井澤公一, 芳賀芳範, 山本悦嗣, 木村憲彰, 大貫惇睦 “熱伝導率でみたUPt₃の超伝導ギャップ構造”、日本物理学会年次大会、2011年3月25日、新潟大学
- ② 町田洋 “熱輸送係数からみた重い電子系Yb化合物の量子臨界性”、新学術領域研究ワークショップ、2011年1月8日、姫路市商工会議所
- ③ 町田洋, 小椋千花子, 井澤公一, 久我健太郎, 中辻知 “熱伝導率からみた重い電子系 β -YbAlB₄の量子臨界性”、日本物理学会秋期大会、2010年9月23日、大阪府立大学
- ④ Y. Machida, C. Ogura, K. Izawa, K. Kuga, and S. Nakatsuji, “Thermoelectric coefficients of the quantum critical β -YbAlB₄”, ICHE2010, 2010/09/18, Tokyo, Japan
- ⑤ Y. Machida, C. Ogura, K. Izawa, K. Kuga, and S. Nakatsuji, “Low-temperature thermal transport coefficients of heavy fermion β -YbAlB₄”, SCES2010, 2010/07/01, Santa Fe, USA
- ⑥ 町田洋, 小椋千花子, 井澤公一, 久我健太郎, 中辻知 “重い電子系 β -YbAlB₄の低温熱輸送係数”、日本物理学会年次大会、2010年3月21日、岡山大学
- ⑦ 町田洋, 酒井翔, 井澤公一, 渡辺忠孝, 奥山浩朗 “鉄珪化物超伝導体Lu₂Fe₃Si₅の熱伝導率”、日本物理学会秋期大会、2009年9月28日、熊本大学
- ⑧ Y. Machida, K. Tomokuni, T. Isono, K. Izawa, Y. Nakajima, and T. Tamegai, “Thermal transport studies on Co-doped BaFe₂As₂”, M2S, 2009/09/09, Tokyo, Japan
- ⑨ 町田洋, 酒井翔, 井澤公一, 渡辺忠孝, 奥山浩朗 “マルチギャップ超伝導体Lu₂Fe₃Si₅の熱伝導率”、新学術領域研究第2回研究会、2009年8月19日、広島大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

町田 洋 (MACHIDA YO)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：40514740

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：