

平成 21 年 5 月 19 日現在

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2006～2009

課題番号：18340106

研究課題名(和文) ウラン化合物重い電子超伝導体の核磁気共鳴による超伝導状態の解明と対パリティ決定

研究課題名(英文) Superconducting characteristics and pairing symmetry in uranium based heavy fermion superconductors studied by nuclear magnetic resonance

研究代表者 藤 秀樹 (TOU HIDEKI)

神戸大学・大学院理学研究科・教授・

研究者番号：60295467

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：低温・超伝導・スピン三重項超伝導・核磁気共鳴

1. 研究計画の概要

立方対称構造をもつ UBe_{13} は、1982年に発見された重い電子超伝導体である。電子比熱係数は 1000mJ/molK^2 と極めて大きく、様々な研究から、スピン三重項超伝導状態の可能性が議論されているが、明確な証拠は得られていない。常伝導状態では非フェルミ流体的な振る舞いが報告されており、 $5f$ 電子由来の多極子自由度が関与した多チャンネル近藤効果による可能性が理論的に議論されている。この物質は、 U サイトを Th で置換すると、超伝導 2 段転移を示すことから、縮退した超伝導秩序変数の存在が考えられており、多極子自由度との関係に興味を持たれている。

UBe_{13} の物性研究における大きな問題点は、良質な試料ができないという点であり、超伝導対パリティ決定も含め、これまでに大きな進展はなかった。芳賀らにより純良単結晶試料の合成が行われ、精密ナイトシフト実験による超伝導状態の解明がこの系の課題である。

本研究の目的は、純良単結晶試料を用いた極低温下での角度依存 NMR 実験を行い、多極子自由度による重い電子超伝導発現機構の可能性について明らかにすることである。

2. 研究の進捗状況

(1)2006 年度

①極低温下での RF 表面インピーダンス測定(交流磁化測定)を行い、超伝導上部臨界磁場を調べ、これまでに報告されている超伝導相図を再現し超伝導相内に異常な磁束ピンング領域が存在することを明らかにした。

②磁場角度分解 NMR をおこない、超微細相

相互作用の異方性は、 Be-2p 軌道の局所スピン密度によって理解され、 $2p$ 軌道が伝導バンドに寄与していることを明らかにした。

(2)2007 年度

①超伝導状態で、軸方向によりナイトシフトの異方性が確認され新たな知見を得た。

②関連物質であるスクッテルダイト超伝導体 $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ の NMR 実験についてスピン格子緩和率の異常な磁場依存性を確認し多極子自由度が緩和に重要であることを明らかにした。

(3)2008 年度

①非フェルミ流体状態について調べるため緩和率の磁場依存性を測定した。低磁場では、 2K 以上で $1/T_1 \propto T^{1/2}$ の温度依存性を示し、 30K 以上で $1/T_1 = \text{一定}$ となるが、高磁場では幅広い温度範囲で $1/T_1 \propto T^{1/4}$ の温度依存性が見られ、スピン揺らぎによる量子臨界点近傍において理論予想と良く一致し、磁場誘起非フェルミ流体状態を示唆する結果を得た。

②比較として非フェルミ流体的挙動を示す YbRhSb の Sb-NMR 緩和率の温度依存性を調べた。ゼロ磁場では $1/T_1 \propto T^{1/2}$ の振る舞いが見られたが、磁場を印加すると、 UBe_{13} とは異なり $1/T_1 \propto T$ の関係が見られ、磁場によって非フェルミ流体状態が抑えられ、フェルミ流体状態となることを示唆する。

3. 現在までの達成度

②おおむね順調に進展している

理由は以下の通り次の 4 項目についておおむね目標を達成しているからである。

(1) 常伝導・超伝導特性

UBe_{13} の常伝導状態の Be 原子の電子状態を明らかにした。また表面インピーダンス

実験より超伝導相図を見だし、超伝導相内で、異常な磁束ピンニングがあることを見いだした。(論文 3,4,6)

(2) 超伝導対パリティ

H//[001]方向の超伝導状態でのナイトシフト温度依存性から、スピン 3 重項超伝導と矛盾しない結果を報告し(論文 2)、現在さらに実験を継続している。

(3) 非フェルミ流体状態

2007-2008 年度に常伝導状態での緩和率実験から非フェルミ流体状態に関する情報を得ており(学会発表 1)、比較物質として非フェルミ流体と考えられている Yb 系で相補実験を行い、物性の違いを明らかにした

(4) 多極子自由度

関連物質である $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ において多極子が関与する重い電子状態に関する情報を得た。(論文 1,学会発表 3)

(5) $(\text{U,Th})\text{Be}_{13}$ の超伝導状態

試料作製上の問題のため現時点で良質な試料は得られておらず進展がない。

4. 今後の研究の推進方策

代表者の広島大学から神戸大学への異動(2007年10月)に伴い、低温・強磁場 NMR 実験環境の立ち上げに 1 年ほどかかったが、これと並行し遂行可能な高温での実験を行った。前項目 3.(5)の $(\text{U,Th})\text{Be}_{13}$ は現時点で試料の問題で進展が見込まれない、一方で非置換 UBe_{13} において、表面インピーダンス実験から超伝導状態で異常が観測されるなど Th 置換系と類似した新しい展開がみられた。そこで、今後は非置換系を柱に過去に報告された Th 置換系の物性と比較しつつ、以下の研究を実施し UBe_{13} および関連物質の常伝導・超伝導状態を明らかにする。

- (1) H20 年度に見いだされた緩和率の非フェルミ流体的異常を明らかにするため、緩和率の実験を行うが、特にこれまで行われていない Be(I)サイトの実験より非フェルミ流体異常の起源を明らかにする。
- (2) 超伝導状態の対パリティについて低温・高磁場で対パリティがいかなる状態かを NMR により明らかにする。特に、低温での異常について、非ユニタリー相の可能性について考察を行う。

5. 代表的な研究成果

(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 9 件)

1. Y. Inaoka, H. Tou, M. Sera, H. Sugawara, H. Sato, Sb nuclear spin-lattice relaxation rate in filled skutterudite superconductor $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$, J. Mag. Mag. Mater., Vol.310 (2007)596-598 (査読有り)
2. H. Tou, N. Tsugawa, M. Sera, Y. Haga, Y.

Onuki, ^9Be -NMR studies of the heavy-Fermion superconductor UBe_{13} , J. Mag. Mag. Mater., 310 (2007): 706-708 (査読有り)

3. H. Tou, N. Tsugawa, M. Sera, H. Harima, Y. Haga, Y. Onuki, Hyperfine interactions in the heavy-fermion superconductor UBe_{13} : ^9Be NMR, J. Phys. Soc. Jpn., 76 (2007) 024705 (9pages) (査読有り)
4. H. Tou, Y. Nakai, M. Doi, M. Sera, H. Sugawara, H. Sato, Surface impedance studies of $\text{PrT}_4\text{Sb}_{12}$ ($T = \text{Os, Ru}$), Physica B: Condensed Matter, 378-380, (2006) p.p.209-210. (査読有り)
5. N.Tsugawa, H. Tou, M. Sera, H. Harima, Y. Haga and Y. Onuki, NMR Study of Single Crystal UBe_{13} : ^9Be Knight Shifts in the Normal State, J. Phys. Soc. Jpn., 75, Suppl. (2006) p.p.107-109. (査読有り)
6. H. Tou, N. Tsugawa, M. Doi, Y. Nakai and M. Sera, Surface Impedance Studies of Heavy Fermion Superconductors, $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ and UBe_{13} , J. Phys. Soc. Jpn., 75, Suppl. (2006) p.p.201-203. (査読有り)

[学会発表] (計 18 件)

1. 藤秀樹, UBe_{13} 、 UPT_3 の現状と今後の展開, 第 1 回新学術領域研究会「重い電子系の形成と秩序化」, 2009.3.9, 東京大学物性研究所
2. 藤秀樹, UBe_{13} の Be-NMR Knight shift, 物性研究所短期研究会「重い電子系研究の新展開」, 2008.7.25, 東京大学物性研究所
3. 稲岡慶彦, 藤秀樹, ほか 3 名, スクッテルダイト超伝導体 $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ の Sb-NMR による研究, 日本物理学会第 62 回年次大会, 2007.9.21, 北海道大学
4. 藤秀樹, ほか 4 名, 単結晶 UBe_{13} を用いたナイトシフトと超微細相互作用の研究, 日本物理学会春季大会 2007.3.21, 鹿児島大学
5. H. Tou, Spin-Triplet Superconductivity in UBe_{13} : ^9Be -NMR studies (Oral), International Conference on Magnetism, 20-25 Aug. 2006, Kyoto Japan,.

[その他] 研究室ホームページ情報

http://www.phys.sci.kobe-u.ac.jp/~wdweb/Tou_top.html