

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料  
〔平成30年度研究進捗評価用〕

平成27年度採択分  
平成30年 3月15日現在

ウラン系重い電子物質の超伝導解明と新奇超伝導状態の探索

Understanding of the Superconducting Mechanism and Search for a Novel Superconducting State in Uranium Heavy-Fermion Compounds

課題番号：15H05745

石田 憲二 (Ishida Kenji)

京都大学・大学院理学研究科・教授



研究の概要

本研究はウラン系化合物で実現している非従来型超伝導の超伝導波動関数の同定および発現機構の解明、非従来型超伝導に起因する新奇超伝導現象の探索を目指す。ウラン系超伝導体の中でも強磁性状態で起こる「強磁性超伝導体」に研究の軸を置き、磁性を持つ超伝導を舞台として実現している「内部自由度を持つ超伝導の物理」を構築する。

研究分野：数物系科学

キーワード：物性物理学、強相関電子系、磁性、超伝導

1. 研究開始当初の背景

銅酸化物超伝導体の発見以降、様々な物質群で「非従来型の超伝導」が発見されている。しかし、その超伝導発現機構について、従来の電子-格子相互作用と異なると考えられるが、スピン、電荷、軌道のゆらぎなどの候補が挙げられているものの同定に到っていない。

このような状況の中、ウラン化合物で発見された「強磁性超伝導体」は新たな潮流を作りつつある。通常、超伝導と相容れない強磁性状態のもと超伝導転移を示し、強磁性と超伝導は微視的に共存している。また、強磁性超伝導体の特徴として、超伝導上部臨界磁場の異方性が非常に大きいこと、超伝導が磁場に対して強められたり、一度磁場で消えた超伝導が磁場を上げると再度現れる「リエントラント超伝導」の振る舞いをする。これは従来の超伝導のみならず、反強磁性と共存する超伝導体にも見られなかった大変特異な振舞いである。

2. 研究の目的

我々の研究の目的は、これらウラン化合物の強磁性超伝導体の超伝導特性を実験・理論の両面から明らかにし、超伝導発現機構を解明することである。特に強磁性超伝導体で実現している「スピン三重項超伝導状態」の理解につとめる。

3. 研究の方法

我々は、これらウラン化合物の強磁性超伝導体では、強磁性ゆらぎと超伝導が密接に関係していると考えている。現在までに報告の

ある強磁性超伝導体を調べ、共通点や相違点を調べる。核磁気共鳴(NMR)実験は、低エネルギーの強磁性ゆらぎを精度良くとらえることのできる数少ない実験手法の一つである。強磁性ゆらぎの温度・磁場依存性を希釈冷凍機温度域の低温まで調べ、超伝導との関係を探る。またウラン化合物の中には、多重相超伝導を持つものも知られている。これらの超伝導状態も様々な実験から調べる。本研究課題では良質な単結晶を用いた NMR 実験に重きを置き、理論と比較することから超伝導状態や発現機構の解明に努める。

4. これまでの成果

①UCoGe における強磁性ゆらぎによるスピン三重項超伝導

強磁性超伝導体UCoGe単結晶において、NMR、電気抵抗、熱伝導度、磁化の低温・強

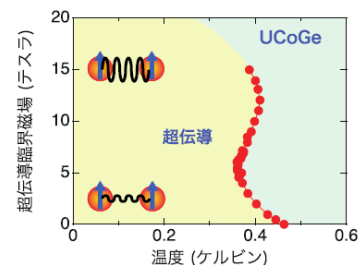


図1：磁場によって安定化する UCoGe の相図。磁場を加えると超伝導電子対が強められる。[2]

磁場までの精密測定から、強磁性の磁気モーメントと平行(c軸)方向に磁場を加えたとき

は超伝導電子対が弱められ、垂直( $b$ 軸)報告に磁場を加えたときは逆に強められることを示し、超伝導の引力が磁場によってチューニングできることが明らかになった。[1,2]

## ②URhGeにおける強磁性臨界ゆらぎにより強められる超伝導

URhGeで磁場を $b$ 軸に印加したときに見られるリエントラント超伝導の磁場領域での磁気励起をCoドーパしたURhGeの $^{59}\text{Co}$ 核のNMR実験から調べた。その結果、図2に見られるようにリエントラント超伝導が見られる磁場領域において印加磁場に平行な軸方向の磁気ゆらぎが異常に発達していることを明らかにした。URhGeのリエントラント超伝導に対しても特徴的な $b$ 軸方向の一軸的な磁気ゆらぎが超伝導出現に関して重要な役割を果

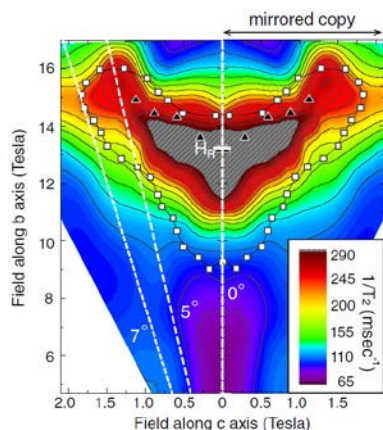


図2：URhGeにおける1.6 Kでの $1/T_2$ の値のカラープロット。リエントラント超伝導が観測されている磁場領域は□で示されている。超伝導が観測されている磁場領域で $1/T_2$ が増大していることが分かる [3]

たしていることを示した。[3,4]

## ③トポロジカル超伝導としてのU系超伝導

トポロジカル相の分類理論であるK理論を用い、第一原理計算と量子振動の測定により得られたバンド構造に基づいて、幾つかのウラン系超伝導体におけるトポロジカル超伝導の研究を行った。その結果、(a)  $\text{UPt}_3$ の高温相(A相)が非共型結晶対称性に守られた $Z_2$ トポロジカル超伝導であること[5]、(b)  $\text{UPt}_3$ の低温相(B相)が非共型結晶に特有のワイル超伝導であることが分かった。

## ④第一原理計算、および、多極子超伝導の観点から見たU系超伝導体

第一原理計算に基づいて  $\text{UPt}_3$ の電子状態を軌道分解し、その複雑な電子状態から演繹される超伝導ギャップ構造を世界で初めて明らかにした[6]。

## 5. 今後の計画

### ①UGe<sub>2</sub>における強磁性ゆらぎと超伝導

現在までに  $\text{UCoGe}$  と  $\text{URhGe}$  についてイジング異方性をもつ強磁性ゆらぎと超伝導の密接な関係が示された。最近、圧力下で超伝導を示す強磁性体  $\text{UGe}_2$  についても常圧下で

イジング異方性をもつ磁気ゆらぎの存在が示された。[7] 今後、超伝導を示す圧力領域でのゆらぎがどのように変化するか調べる。報告のあるすべての強磁性超伝導体で強磁性ゆらぎと超伝導の相関が見られれば強磁性ゆらぎが超伝導引力と同定出来る

### ②強磁性超伝導体の超伝導対状態の同定

強磁性ゆらぎが発現機構となる超伝導体ではスピン三重項超伝導状態が実現していると考えられる。ナイトシフトによる超伝導状態のスピン磁化率の測定から対状態を決定し、強磁性超伝導におけるスピン三重項超伝導の確証を得る。

今後、これらの研究を軸に行っていく。

## 6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

[1] M. Manago, K. Ishida, and D. Aoki, “Single ferromagnetic fluctuations in  $\text{UCoGe}$  revealed by  $^{73}\text{Ge}$ - and  $^{59}\text{Co}$ -NMR studies” *Phys. Rev. B* **97**, 075130 1-7 (2018)

[2] B. Wu, G. Bastien, M. Taupin, C. Paulsen, L. Howald, D. Aoki & J-P. Brison “Pairing mechanism in the ferromagnetic superconductor  $\text{UCoGe}$ ” *Nature Comm.* **8**, 14480 1-9 (2017)

[3] Y. Tokunaga, D. Aoki, H. Mayaffre, S. Krämer, M.-H. Julien, C. Berthier, M. Horvatić, H. Sakai, S. Kambe & S. Araki, “Reentrant Superconductivity Driven by Quantum Tricritical Fluctuations in  $\text{U RhGe}$ : Evidence from  $^{59}\text{Co}$  NMR in  $\text{URh}_{0.9}\text{Co}_{0.1}\text{Ge}$ ”, (Editors’ suggestion) *Phys. Rev. Lett.* **114**, 216401\_1-5 (2015)

[4] D. Braithwaite, D. Aoki, J.-P. Brison, J. Flouquet, G. Knebel, A. Nakamura, and A. Pourret, “Dimensionality Driven Enhancement of Ferromagnetic Superconductivity in  $\text{URhGe}$ .” *Phys. Rev. Lett.* **120**, 037001 1-5 (2018).

[5] Y. Yanase and K. Shiozaki, “Mobius topological superconductivity in  $\text{UPt}_3$ ” *Phys. Rev. B* **95**, 224514-1-19 (2017).

[6] T. Nomoto, and H. Ikeda, “Exotic multi-gap structure in  $\text{UPt}_3$  unveiled by the first-principles analysis”, (Cover of PRL),

*Phys. Rev. Lett.* **117**, 217002 1-6 (2016)

[7] Y. Noma, H. Kotegawa, Hideki Tou, Dai Aoki, 他10名

“Anisotropic Magnetic Fluctuations in Ferromagnetic Superconductor  $\text{UGe}_2$ :  $^{73}\text{Ge}$ -NQR Study at Ambient Pressure”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **87**, 033704/1-5 (2018). ホームページ等

フォースで目覚める超伝導 ～磁場誘起超伝導を力で制御～

<http://www.imr.tohoku.ac.jp/ja/news/results/detail---id-973.html>