

平成 30 年 5 月 17 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05152

研究課題名(和文) 量子臨界点近傍のフェルミ・非フェルミ液体共存新奇状態

研究課題名(英文) Coexistence of non-Fermi and Fermi liquid near quantum critical point

研究代表者

神戸 振作 (Kambe, Shinsaku)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 先端基礎研究センター・研究主席

研究者番号：40224886

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：重い電子系YbRh<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>のスピンエコー減衰の磁場・温度依存を、<sup>29</sup>Si 同位体を52%濃縮した高品質の単結晶試料を用いて測定した。この単結晶試料を用いて、NMRスピンエコー減衰の測定を行った。減衰曲線には、通常のGauss型、Lorentz型の減衰に加えて、明確な振動項が現れた。これはRK相互作用と擬双極子相互作用によるものと考えられる。この振動数には低温20K以下で大きな温度変化が見られた。これは、20K以下でフェルミ面の大きな変化あることを示している。YbRh<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>では、70mKまで大きなフェルミ面の変化はないと考えられてきたが、本研究により、高温から変化があることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The magnetic field and temperature dependence of spin echo decay of heavy electron system YbRh<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> were measured using high quality single crystal samples. A high quality single crystal YbRh<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> sample was prepared by concentrating the <sup>29</sup>Si isotope by 52%. Since the natural abundance ratio of <sup>29</sup>Si isotope is about 4%, this enrichment can shorten the measured integrated time to about one hundredth. Using this single crystal sample, NMR spin echo decay was measured. In the decay curve, an ordinary Gauss type and Lorentz type decays are observed, in addition, a clear oscillation term appeared. This is thought to be due to the RK interaction and quasi-dipolar interaction. A significant frequency change was observed below 20 K. This indicates that there is a large change in the Fermi surface at 20 K or less. In YbRh<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>, though it was thought that there is no large Fermi surface change down to 70 mK, this study revealed that there is a change from higher temperature.

研究分野：固体物性物理

キーワード：量子臨界 NMR

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19(共通)

### 1. 研究開始当初の背景

量子臨界ゆらぎが支配する  $T=0\text{K}$  での相転移は、量子相転移と呼ばれ、従来の相転移と異なった様相を示すため、精力的に研究が行われている。また量子臨界点付近で超伝導が誘起される場合もあり、超伝導機構解明の観点からも興味を持たれている。

典型的な量子相転移系のひとつが、重い電子系の磁気相転移である。近藤効果と RKKY 相互作用が拮抗するため、磁気相転移が低温になりやすいからである。実際、多くの重い電子系 Ce 化合物で量子相転移現象が報告されている。一方、2002 年、ドレスデンのグループが、重い電子系  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  の磁気誘起量子相転移では磁気秩序と同時に電子の局在化がおきるため、従来と異なる新奇の量子相転移：“局所量子相転移”になっている可能性を報告した。その後、多くの研究がなされ、量子相転移の様相は明らかになってきたが、局所量子相転移の決定的な証拠は得られていなかった。

### 2. 研究の目的

申請者は、この化合物の NMR 研究を行い、量子臨界点近傍で新奇な電子状態を見いだした。磁気相転移では、磁気揺らぎが相転移点にむけて増大していく。通常の場合、均一な電子状態全体で磁気揺らぎの増大が見られる。従って、重い電子系の磁気誘起量子相転移の場合、高磁場下でフェルミ液体基底状態が、磁場を下げて量子臨界点に近づくにつれて非フェルミ液体基底状態にクロスオーバーしていく様子が見られる

例： $\text{CeCoIn}_5$ 。しかし  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  の場合、量子臨界点近傍では非フェルミ液体的励起とフェルミ液体的励起を持つ 2 つの状態が共存し、磁場が臨界磁場にちかづくとき非フェルミ液体的状態の比率が増大することが見いだされた。この状態は、局所量子相転移と関連するが、その描像だけでは説明できない新しい状態と考えられる。そこで本研究では、NMR 法により新しく見いだされた共存状態をより幅広い磁場・温度領域で評価し、新奇量子相転移現象を解明することを第一の目的とする。

### 3. 研究の方法

NMR 核である  $^{29}\text{Si}$  同位体を 5.2% 濃縮した高品質の単結晶試料  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  (結晶構造 図 1) を作成した。 $^{29}\text{Si}$  同位体の自然存在比は、4% 程度なので、この濃縮により測定積算時間を 100 分の 1 程度に短縮できる。この単結晶試料を用いて、図 2 に示す NMR スピンエコー減衰の測定を行った。

### 4. 研究成果

図 3 に示すように、スピンエコー減衰関数は、Gauss 型がメインで、Lorentz 型の寄与は少なかった。また RK 相互作用に起因する振動項が観測された。このスピンエコー減

衰結果から、Gauss 型減衰時間 T2G と RK 相互作用 J、および擬双極子相互作用 B の温度依存を明らかにした (図 4)。これらの量は全て 300-20K まではほとんど温度依存がなかった。これは、局所的な電子に近い状態であることを示している。しかし 20K 以下では顕著な温度依存を示した。RK 相互作用は、伝導電子を介した相互作用である。従ってこの結果は、Fermi 面が 20K 以下で変化していることを示している。一方、光電子分光 (ARPES) の実験では、1K 付近まで Fermi 面の変化は観測されなかった。これは、光電子分光は電子の波数空間のプロブであり、NMR は局所電子のプロブであることに起因すると考えられる。電子状態はむしろ局所的に変化していて、波数空間では幅広い領域の小さい変化になっているため、光電子分光では捉えにくかったものと思われる。これは  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  が局在電子系的であることを矛盾しない。このように、本研究は  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  の局所的な要素の強い Fermi 面の温度依存を初めて明らかにした。これは量子相転移解明のための重要な知見である。

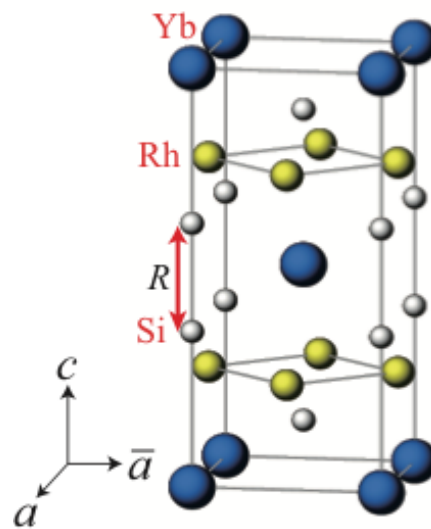


図 1  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  の結晶構造

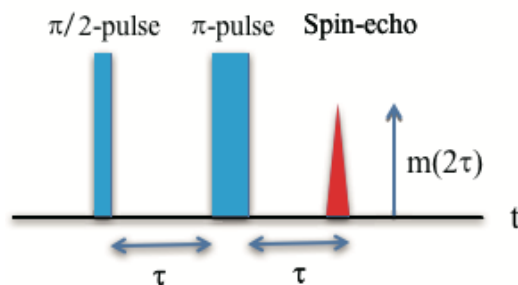


図 2 スピンエコー

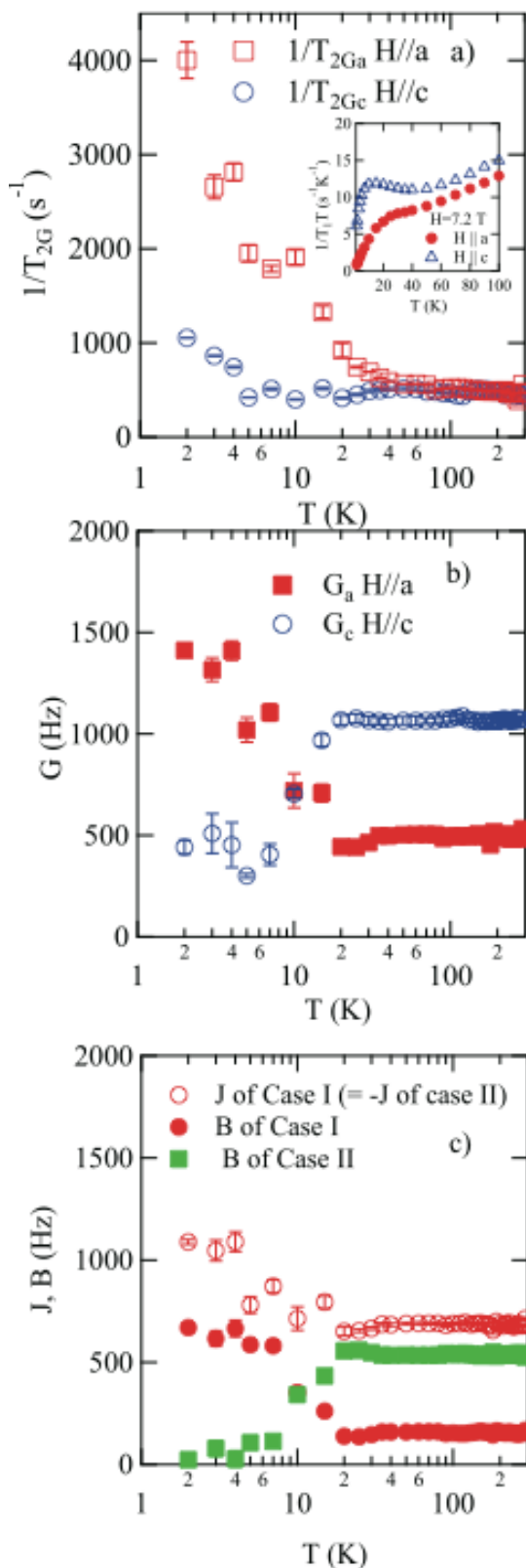
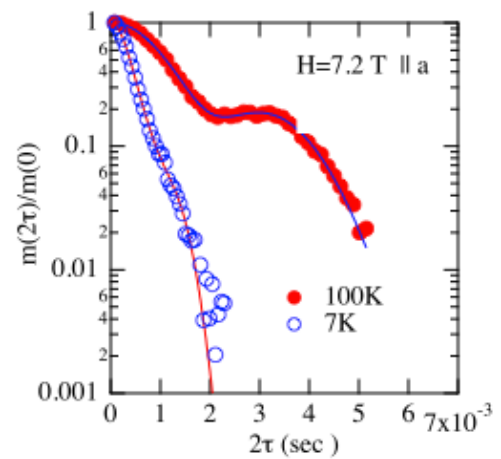
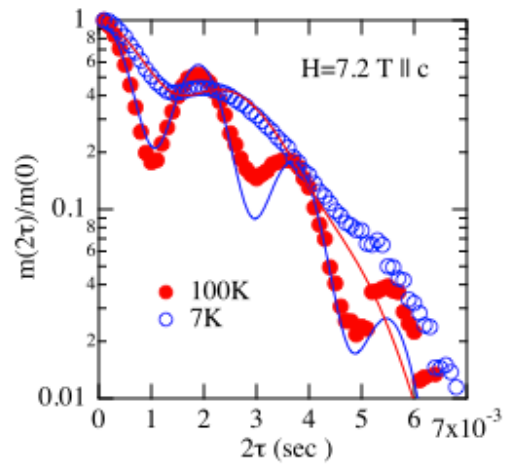


図3 T<sub>2G</sub>, J, B の温度依存



スピンエコー減衰結果 (H//c)

図4 スピンエコー減衰結果 (H//a)

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① T-dependence of nuclear spin-echo decay at low temperatures in YbRh<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>, S. Kambe, H. Sakai, Y. Tokunaga, T. Hattori, G. Lapertot, T.D. Matsuda, G. Knebel, J. Flouquet and R.E. Walstedt, Phys. Rev. B95, (2017) 195121-1-8.  
DOI:10.1103/PhysRevB.95.195121.  
査読有

- ② <sup>29</sup>Si NMR spin-echo decay in YbRh<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>, S. Kambe, H. Sakai, Y.

Tokunaga, T. Hattori, G. Lapertot,  
T.D. Matsuda, G. Knebel, J.  
Flouquet and R.E. Walstedt, J.  
Phys. Conf. series 683, (2016)  
012006.  
DOI:10.1088/1742-6596/683/1/012  
006. 査読有

- ③ Anisotropic energy scale for degenerate Fermi and non-Fermi liquids near a quantum critical phase transition in  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$ , S. Kambe, H. Sakai, Y. Tokunaga, G. Lapertot, T.D. Matsuda, G. Knebel, J. Flouquet and R.E. Walstedt, Phys. Rev. B 91 (2015) 161110(R). DOI:10.1103/PhysRevB.91.161110. 査読有

[学会発表] (計 4 件)

- ①  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  における Fermi 面の温度依存、神戸振作、酒井宏典、徳永陽、服部泰佑、Gerard Lapertot 松田達磨、Georg Knebel, Jacques Flouquet、Russell E. Walstedt 日本物理学会 2017 春, 2017
- ②  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  の NMR スピンエコー減衰、神戸振作、酒井宏典、徳永陽、服部泰佑、Gerard Lapertot 松田達磨、Georg Knebel, Jacques Flouquet、Russell E. Walstedt 日本物理学会 2016 春, 2016
- ③ 単結晶  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  の NMR (H//a)、神戸振作、酒井宏典、徳永陽、服部泰佑、Gerard Lapertot 松田達磨、Georg Knebel, Jacques Flouquet、Russell E. Walstedt 日本物理学会 2015 秋, 2015
- ④ “NMR study of novel quantum critical behavior in “ $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$ ”, S. Kambe (Toyota Riken international workshop Nagoya), 2015

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

神戸 振作 (Kambe, Shinsaku)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構  
構・原子力科学研究部門 先端基礎研究センター・研究主席

研究者番号：40224886