

重元素系固体物理研究グループの主な成果

Highlights of Research Group for Condensed Matter Physics of Heavy Element Systems

神戸 振作 グループリーダー
Shinsaku Kambe Group Leader



概要

過去5年間にわたり、重元素系 (f電子系) 化合物の新奇な物性を核磁気共鳴 (NMR) 法とミュオンスピン回転・緩和 (μ SR) 法を用いて集中的に研究してきた。特に重元素系化合物のf電子が持つ強いスピン-軌道相互作用と軌道自由度の関連する新奇物性に注目してきた。ここでは、それらの研究成果のうち、2つのトピックスすなわちPr化合物の多極子揺らぎ超伝導[1,2]と URu_2Si_2 の隠れた秩序の研究について紹介する[3,4]。本稿に述べた以外の主な研究としては、 AmO_2 のガラス的秩序状態[5]、 CePt_2In_7 の高圧下での非通常超伝導と反強磁性秩序の共存[6]、 YbRh_2Si_2 の新しい量子臨界現象[7]、 μ SRによる BaTiO_3 の水素不純物状態[8]の研究などが挙げられる。

トピックス 1 Pr化合物の多極子揺らぎ超伝導の研究

1. 研究の背景・経緯

重元素系化合物では、f電子の強いスピン-軌道相互作用のため、両者をつなぐ概念である多極子の自由度が重要な意味を持つてくる。最近、この多極子自由度の揺らぎを利用した新しい超伝導の可能性がPr1-2-20系化合物で議論されている。我々はそのPr1-2-20系化合物においてNMR法と μ SR法による研究を行い、この物質の超伝導の発現機構を探った。

超伝導の本質は電子対の形成である。超伝導の基本的な原理を明らかにしたBardeen-Cooper-Schrieffer (BCS)理論は、この電子対の形成に必要な引力の起源を電子と格子振動(フォノン)との相互作用に求めた。しかしその後のBCS理論の拡張によって、引力の起源は必ずしもフォノンである必要はなく、電子の持つ何らかの自由度の揺らぎを利用すれば、より高い転移温度を持った超伝導が実現可能であることが指摘されていた。その後、銅酸化物やf電子を含む化合物で超伝導が発見され、現在、それらの超伝導の機構が、電子の磁気揺らぎを利用したものであることがほぼ明らかになってきている。

ここで言う“磁気揺らぎ”とは、一般に、電子の磁気双極子の揺らぎを意味している。磁気双極子は、磁石が互いをくっ付けたり遠ざけたりする、巨視的な磁性の起源である。一方、スピン-軌道相互作用の存在によって、物質中には双極子より高次の電子の多極子自由度も存在

Abstract

In the last 5 years, the exotic behavior of heavy element (f-electron) systems has been studied intensively by means of NMR and μ SR. Particularly, exotic behaviors related with the spin-orbit coupling and orbital degeneracy are investigated.

Here two topics: 1) multipole-fluctuation mediated superconductivity in Pr-based compounds [1,2] and 2) hidden order in URu_2Si_2 [3,4] are chosen among them. In addition to the topics presented here, the following are the main results of our research in the last 5 years: the glassy ordered state of AmO_2 [5]; the coexistence of unconventional superconductivity and antiferromagnetic ordering under high pressure in CePt_2In_7 [6]; new quantum critical phenomena in YbRh_2Si_2 [7]; and the hydrogen impurity state in BaTiO_3 as clarified by μ SR[8].

Topic 1 Multipole-fluctuation mediated superconductivity in Pr-based compounds

1. Introduction

Heavy element systems possess multipolar degrees of freedom originating from the strong spin-orbit coupling of f-electrons. Recently, a novel mechanism of superconductivity (SC), mediated by the fluctuations of a higher order multipole, has been discussed for a series of Pr 1-2-20 compounds. In this study, by using μ SR and NMR techniques complementarily, we have explored their SC mechanism from a microscopic point of view.

Although the Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS) theory of superconductivity was initially established based on the electron-phonon interaction, a simple generalization of the BCS theory shows immediately that SC can also appear via other electronic fluctuations that provide an attractive interaction between quasiparticles. Because of the higher energies of such fluctuations, one can expect higher SC

する。四極子や八極子といったものがそれである。そのような高次の多極子も、場合によっては物質の性質そのものを決定する重要な物理量となることが最近強く認識されるようになってきている。特に局在したf電子を持つ化合物ではその傾向は顕著であり、ネプツニウム酸化物 (NpO_2) で出現する磁気八極子秩序はその代表例である。高次の多極子が双極子と同等に重要であるならば、当然その揺らぎを利用した超伝導も考えられる。実際、そのような新しい超伝導の可能性がPr1-2-20系という物質において提案され、研究が進められている。

2. 研究の内容

Pr1-2-20系の超伝導は、本当に新しい超伝導なのか？それを明らかにするため、我々はNMR法と μSR 法による実験を行った。両者は共に物質内部の状態を微視的に探る事が可能な測定手法で、電子系の静的な性質のみならず、動的な性質、すなわち揺らぎを直接観測できるという特徴を持つ。また両者は観測可能な揺らぎのエネルギー領域において互いに相補的である。我々はこの二つの測定法を利用して、特に物質内部の磁気的な揺らぎの変化に注目して、この系の微視的な電子状態を調べた[1,2]。

図1に $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ と $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ という2つのPr1-2-20系化合物で得られた、Al核のNMR緩和率 $(1/T_1)_f$ の温度依存性を示す。どちらの化合物も低温(0.2K)以下で超伝導転移を示す。 $1/T_1$ の値はどちらの化合物でも低温に向って急激に減少していることが分かる。この $(1/T_1)_f$ は主にf電子の磁気双極子の揺らぎの強さに比例する物理量であり、この結果はその双極子揺らぎが低温に向って

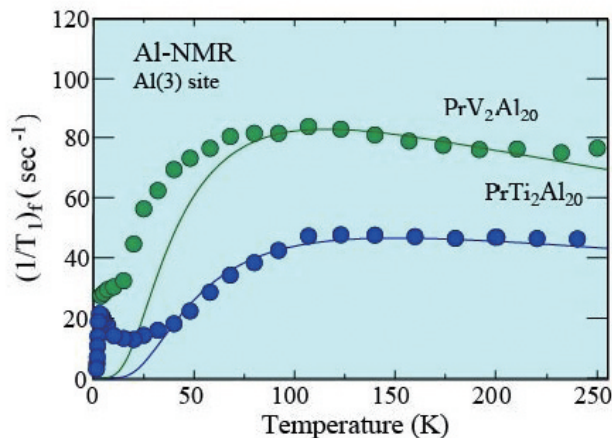


図1 $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ と $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ におけるNMR緩和率 $(1/T_1)_f$ の温度依存性
f電子による寄与を取り出したもの。実線は非磁性結晶場基底モデルによる解析の結果 [1]。

Fig.1 The temperature dependence of $(1/T_1)_f$ in $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ and $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$

Here, we have extracted the f-electron component. The solids lines are obtained from non-magnetic crystal electric field models [1].

transition temperatures than those given by the phonon-induced mechanism. Nowadays indeed, the magnetic fluctuation mediated SC is the most promising candidate mechanism for high- T_c copper oxides and certain heavy fermion superconductors.

In general, “magnetic fluctuations” means magnetic-dipole fluctuations. The magnetic dipole is well known as the origin of magnetism in ordinary magnets. During the last decade, however, it has been gradually recognized that the effect of higher order multipoles is not negligible, in particular, for heavy element materials. In these materials, the higher order multipoles often govern the electronic properties at low temperatures. Octupole order in NpO_2 highlights the importance of higher order multipoles as a textbook example. The recent discovery of heavy fermion SC in Pr1-2-20 systems has stimulated a renewed interest in the novel superconducting mechanism mediated by multipole fluctuations.

2. Results

We have performed NMR and μSR experiments on Pr1-2-20 compounds in an effort to elucidate the SC mechanism. Both NMR and μSR are microscopic techniques, which can probe static and dynamical electronic properties of materials. The application of these two techniques to the same material allows us to investigate the magnetic fluctuation properties over a wide range of frequencies.

Figure 1 shows the temperature dependences of the NMR longitudinal relaxation rate $(1/T_1)$ for $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ and $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ [1]. $1/T_1$ decreases rapidly with decreasing temperature in both materials, revealing strong suppression of dipole fluctuations at low temperatures where the SC transition appears. The NMR data also suggest the development of quadrupole (or octupole) fluctuations just above a quadrupole ordering temperature in $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ [1].

The origin of residual magnetic fluctuations at low temperatures was elucidated by μSR spectroscopy at dilution refrigerator temperatures. Figure 2 shows the muon spin relaxation rate $(1/T_{1\mu})$ in $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ at 0.1 K as a function of applied magnetic field [2]. The characteristic frequency of magnetic fluctuations at 0.1 K was estimated to be about 6 MHz from a fit of $1/T_{1\mu}$ to the Redfield model. This frequency is too low for electron spin fluctuations in a paramagnetic state, while it is too high for nuclear spin fluctuations. The intermediate-frequency magnetic fluctuations observed in $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ can be ascribed to hyperfine-enhanced nuclear magnetism of ^{141}Pr , which is a phenomenon where ^{141}Pr nuclear magnetism is effectively enhanced with the assistance of hyperfine-induced f-electron spins. The enhanced nuclear

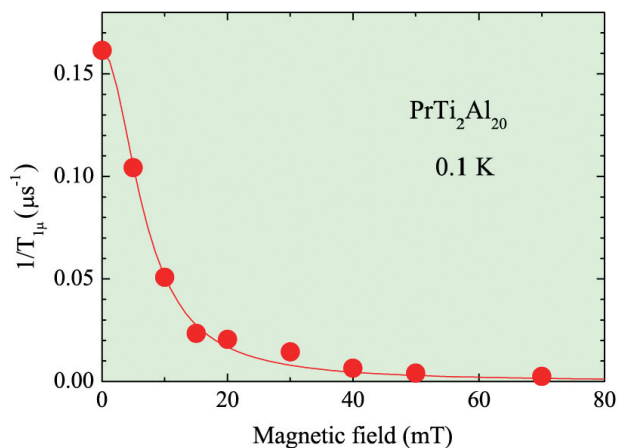


図2 PrTi₂Al₂₀の0.1 KにおけるμSR緩和率(1/T_{1μ})の磁場依存性
実線はRedfieldモデルによるフィット [2]。

Fig.2 The muon spin relaxation rate (1/T_{1μ}) in PrTi₂Al₂₀ at 0.1 K as a function of applied magnetic field
The solid curve represents the best fit to the Redfield model [2].

急激に抑制され、超伝導が出現する1K以下の温度領域では僅かな揺らぎが残るだけとなっている。また今回のNMR実験では、PrTi₂Al₂₀の四極子転移直上の温度領域で強い四極子（もしくは八極子）揺らぎが存在することも示唆されている。

さらに低温で僅かに残る磁気的な揺らぎの正体は、希釈冷凍機温度でμSR測定を行うことにより明らかになった。図2に0.1 Kで測定されたPrTi₂Al₂₀におけるミュオンスピン緩和率(1/T_{1μ})の磁場依存性を示す。Redfield理論に従ってこれを解析することにより、極低温で生き残っている磁気揺らぎの周波数は6 MHz程度であることが分かった。これは常磁性状態における電子スピン揺らぎとしては遅すぎるし、さりとて核スピン揺らぎとしては速すぎる。この中間的な周波数をもつ磁気揺らぎは、Prの核スピンのf電子のスピンを伴って、あたかも増強された核スピンとして振る舞う現象により説明できる。この核スピンの増強は磁気双極子自由度を持たない結晶場基底に特有の現象である。

3. 成果の意義と波及効果

NMRとμSRの実験結果より、超伝導が生じる極低温ではf電子の磁気双極子は不活性であること、すなわち磁気双極子の揺らぎが存在しないことが明らかになった。このことはPr1-2-20系の超伝導においてより高次の多極子の揺らぎが重要な役割を演じていることを強く示唆している。我々の実験の後、Pr1-2-20系化合物において高圧下で電気抵抗測定が行われ、超伝導転移温度が高圧下で急激に増大することが報告された。高圧下では四極子秩序の抑制も観測されており、このことから、この系の超伝導が四極子量子臨界点近傍の揺らぎを利用した新しい機構によるものであることが

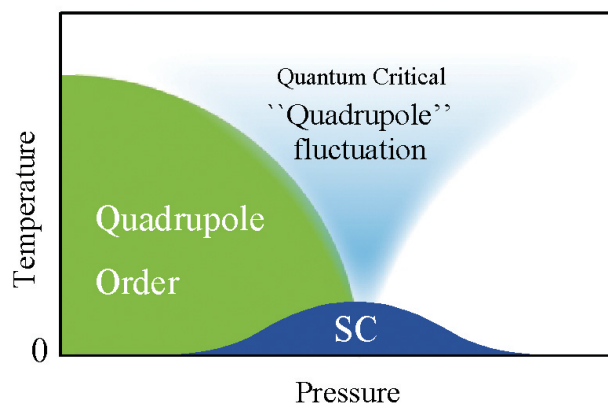


図3 Pr1-2-20系で予想されている四極子量子臨界点近傍の温度-圧力相図

Fig.3 A schematic temperature-pressure phase diagram near the quadrupole quantum critical point expected in the Pr1-2-20 system

magnetism is known to arise only in crystalline-electric-field ground states without magnetic dipole degrees of freedom. Therefore, magnetic dipoles are concluded to be inactive in the SC state of PrTi₂Al₂₀. Accordingly, our results of NMR and μSR measurements strongly suggest that fluctuations of higher-order multipoles play an important role in the SC of the Pr1-2-20 systems.

3. Importance of the result and its impact

The absence of dipole fluctuations at low temperatures, confirmed from our NMR and μSR experiments, has strongly suggested that the SC pairing in the Pr1-2-20 compounds is mediated, not by dipole fluctuations, but by the fluctuations of some other higher order multipoles. Very recently, a strong enhancement of the SC transition temperature under high pressures has been reported for PrTi₂Al₂₀. This finding implies that the pairing interaction of the SC state in the Pr1-2-20 compounds is mediated by quadrupole fluctuations induced near the quadrupole quantum critical point, since the suppression of quadrupole order has also been observed at similar pressures (Fig. 3). Clearly, we need a deeper understanding of multipolar physics to gain further insight into the exotic electronic states of heavy element systems.

4. Perspective

We are now preparing for further microscopic studies under high pressure.

期待される (図3)。

多極子揺らぎによる新しい超伝導の研究は、実験的にも理論的にもまだ始まったばかりである。多極子は強いスピン-軌道相互作用をその起源としており、重元素系化合物の電子状態を理解する上で欠くことの出来ないひとつの重要な鍵である。そのような多極子の物理の理解を進めることは、重元素系化合物の特異な物性の解明と、その先にある新しい機能性物質の開発につながっている。

4. 今後の予定

今後、多極子揺らぎによる超伝導機構の解明のため、圧力下における実験を行っていく予定である。

トピックス 2 URu₂Si₂の隠れた秩序の研究

1. 研究の背景・経緯

5fの電子のスピン/軌道と伝導電子間の相互作用を研究する対象として、重い電子系超伝導体URu₂Si₂は格好の化合物である。この化合物では、ゼロ磁場下T₀=17.5 Kでいわゆる「隠された秩序」(HO)状態が現れる。これまでの研究により、HO状態が単純な反強磁性 (AFM)ではなく、多極子秩序であろうと予測されている。過去の四半世紀にわたり、数多くの実験と理論研究がHO状態の秩序変数を突きとめるために行われているが、その秩序パラメータは、未知のままである。

URu₂Si₂は、重い電子系によく見られる正方ThCr₂Si₂型構造の結晶構造をもつ。ごく最近、このような構造の

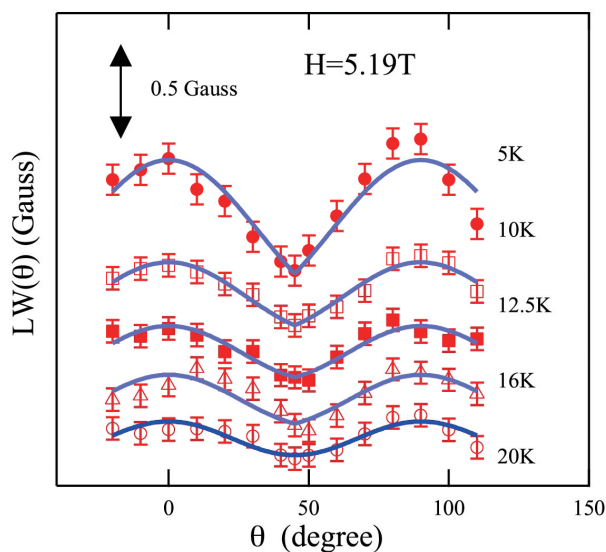


図4 URu₂Si₂のSi-NMR線幅の角度依存性
隠れた秩序相では45度に特徴的なピークが現れる [3]。

Fig.4 Angular dependence of the Si NMR linewidth in URu₂Si₂
A sharp minimum appears at 45 degree in the HO state [3].

Topic 2 Hidden order in URu₂Si₂

1. Introduction

As a target material to investigate the interplay between 5f electron spins/orbitals and conduction electrons, we have chosen the heavy-fermion superconductor URu₂Si₂. In this material, the so-called “hidden-order” (HO) state, which emerges below a zero field phase transition at T₀ = 17.5 K, has posed a long-standing mystery, particularly because of the mysterious nature of its order parameter. It has been evidenced that the HO state is “not a simple antiferromagnet” but is multipolar order. In the past quarter of a century, numerous experimental and theoretical programs have been undertaken to pin down what symmetry is broken in the HO state.

URu₂Si₂ crystallizes in the tetragonal ThCr₂Si₂-type structure. Very recently, the four-fold rotational symmetry of this structure was suggested to be broken mesoscopically in the *c*-plane to form two-fold symmetry within the HO phase [9]. This finding was a significant advance to solve the HO state, but posed an important question about domain effects.

2. Results

We have successfully addressed the broken symmetry by means of very accurate NMR linewidth measurements [3]. A single crystal sample has been prepared with the ²⁹Si isotope enriched to 53%, greatly improving the NMR sensitivity. This made it possible for the first time to resolve a domain-independent in-plane magnetic anisotropy. The NMR spectra were measured as a function of an applied field *H* rotated precisely in the (001) (basal) plane using a two-axis rotating goniometerstage. As shown in Fig. 4, the angular dependence of the linewidth executes a sharp cusp characteristically at θ=45° only in the HO state. Our analysis of this angular dependence has revealed that the two-fold anisotropy is surely nonzero in a large crystal, but much smaller than previously estimated from magnetic susceptibility measurements on a tiny single crystal [9].

Another interesting aspect of the HO state in URu₂Si₂ is that it is bounded by magnetic states in the phase diagram. It is also very important for understanding the nature of the HO state to determine what state will appear if the HO state is suppressed by pressure or magnetic field. For example, hydrostatic pressure of about 1 GPa is known to transform the HO state into a simple antiferromagnetic (AFM) phase with propagation vector Q₁ = (100) and magnetic moment of 0.4 μ_B/U [10]. Two well-split NMR

持つc面の4回転対称性がHO相では破れて、2回対称に下がることが示唆された[9]。この知見は、HO状態を解決するための大きな進歩だったが、今までマクロには観測されていなかったため、この2回対称性のドメイン依存性についての疑問も呼んだ。

2. 研究の内容

本研究では、非常に精密なNMR線幅の角度分解測定[3]を行い、秩序相のドメインに影響されない2回対称性を評価することに成功した。NMR感度を向上させるため、 ^{29}Si 同位体が53%に濃縮された単結晶試料を調製した。この試料を用いて、初めて面内磁気異方性を精密に評価できた。NMRスペクトルは、2軸回転ゴニオステージを用いて(001)面で正確に回転させ、印加磁場の関数として測定した。図4に示すように、線幅の角度依存性は、HO状態になると $\theta = 45^\circ$ で特徴的な先鋭化がおきる。この角度依存性の分析の結果、2回対称性の異方性は、以前に小さな単結晶で磁化率測定から見積もられた値よりもはるかに小さいことが明らかになった。

URu_2Si_2 におけるHO状態の別の興味深い問題は、その磁場または圧力相図の決定である。HO状態が圧力または磁場によって消失させたとき、どのような状態に相転移するかを理解することは非常に重要である。たとえば、1GPa程度の静水圧によってHO状態は、伝搬ベクトル $Q_1 = (100)$ 、 $0.4 \mu_B/U$ の磁気モーメントを持つAFM相へ相転移することが知られている[10]。NMR共鳴線はHO相[11]では1本であるのに対して、このAFM相では、内部磁場で2つに分離したNMR線が観察されている。

一方、磁場を掛けると、新たな相としてII、III、V相が現れる。上記臨界磁場 $H_c = 35.6 \text{ T}$ で T_0 は消失する(図5(b)) [12]。この相図は、主に抵抗率及びホール効果測定によって決定された。最近の熱膨張と磁歪実験にお

lines are observed in this commensurate (C-) AFM phase, confirming this propagation wave vector, whereas only a single NMR line is seen in the HO phase [11].

Another very effective tuning parameter for this compound is magnetic field. The HO phase can be monotonically suppressed to $T_0 \rightarrow 0$ at a critical magnetic field $H_c \sim 35.6 \text{ T}$, above which new phases labeled II, III, and V appear, as shown in Fig. 5(b) [12]. This phase diagram was determined mainly by resistivity and Hall effect measurements. Recent thermal expansion and magnetostriction experiments also confirmed the phase boundaries between HO-II, II-III, and III-paramagnetic (PM) phases above 2 K [13]. Shubnikov-de Haas (SdH) experiments revealed an anomaly in the Hall resistivity at $H^* \sim 22 \text{ T}$ within the HO phase, which is accompanied by the emergence of a new Fermi surface above H^* [14]. On the other hand, pulsed field magnetization measurements are not sensitive to this anomaly at H^* and the lowest temperature data suggest that the system undergoes a first-order metamagnetic phase transition at about 35 T [15].

Despite intense experimental efforts, microscopic investigations of URu_2Si_2 are lacking at high magnetic fields because of the inherent experimental complexity. In order to unveil the intriguing magnetic anomaly at H^* and the nature of the novel phases emerging in the high field limit, we have performed ultra high magnetic field ^{29}Si NMR experiments using a fully ^{29}Si -enriched URu_2Si_2 single crystal, internationally teaming up with Los Alamos National Laboratory (LANL) and National High Magnetic Field Laboratory (NHMFL) in the USA [4]. In addition, the interpretation of the experimental results has been confirmed by electronic band calculations by The Center for Computational Science & e-Systems (CCSE) at JAEA. It is worth briefly mentioning a few striking NMR results: at the low T , ^{29}Si NMR shift (K) anomaly around H^* and the critical increase of K towards $H_c \sim 35.6 \text{ T}$. Both results are evidently related to crucial changes in the Fermi surface of URu_2Si_2 . Another remarkable result is the first observation of the ^{29}Si NMR spectrum in the high-field paramagnetic (PM) phase at 40 T as well as the complex ^{29}Si NMR spectrum in magnetic phase II displayed in Fig. 5(a). This spectral shape can be understood in terms of an incommensurate (IC-) AFM (more exactly ferrimagnetic) ordering of Ising-type localized spin arrays with propagation vector $Q_2 = (2/3, 0, 0)$, as illustrated in Fig. 5(c). It is remarkable that the in-plane fourfold symmetry is spontaneously broken to form an orthorhombic phase under a non symmetry-breaking field along the c-axis. The ordered moment of $\sim 0.6 \mu_B/U$ in phase II is estimated by considering the hyperfine coupling constant $A_c = 3.4 \text{ kOe}/\mu_B$ obtained in the PM and HO phases. Our high field NMR results provide the first microscopic evidence of the change in the magnetic

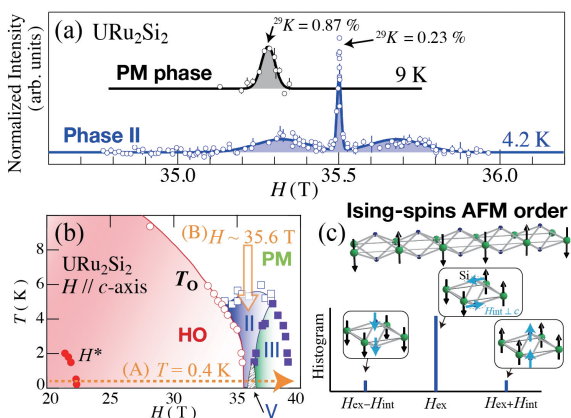


図5 (a) 常磁性状態とII相における ^{29}Si -NMRスペクトル、(b) URu_2Si_2 における温度-磁場相図、(c) II相におけるスピン配置の概略図 [4]

Fig.5 (a) ^{29}Si -NMR spectrum in the PM and II phases, (b) T-H phase diagram for URu_2Si_2 , and (c) Schematic spin arrangements in the II phase [4]

いても、2 K以上のHO、II、II、III及び常磁性 (PM) 相間の相境界は確認されている [13]。また最近のシュブニコフ・ド・ハース (SdH) 実験では、 $H^* \sim 22$ Tでの新たなフェルミ面の出現を伴うHO相内の異常が報告されている [14]。一方、パルス強磁場磁化測定は、約35 T [15]での一次メタ磁性相転移を起こすことを示唆しているが、 H^* では異常は見られていない。

これら多くの実験的な努力にもかかわらず、高磁場での微視的プローブによる測定はあまり行われていなかった。そこで、 H^* での興味深い磁気異常と高磁場相の性質を明らかにするために、 ^{29}Si 同位体をほぼ100%に濃縮した URu_2Si_2 単結晶を用いた高磁場 ^{29}Si -NMR実験をアメリカの国立強磁場研究所 (NHMFL) の世界最強定常磁石を利用して行った [4]。この研究は、NHMFL、ロスアラモス国立研究所 (LANL) との国際共同研究にて遂行された。また、実験結果は、原子力機構のシステム計算科学センターでの電子バンド計算に基づき解析された。いくつか注目すべきNMR結果を述べたい。 ^{29}Si -NMRシフト (K) は H^* でピークを持ち、また $H_c \sim 35.6$ Tに向かって急激に増加する。これらの現象は、フェルミ面の変化に関連している。他の注目すべき結果は、40 Tに高磁場常磁性 (PM) 相とII相の複雑な ^{29}Si -NMRのスペクトル図5 (a) を初めて測定したことである。

図5(c)に示すように、このスペクトル形状は、伝搬ベクトル $Q_2=(2/3,0,0)$ を持つイジング型局在スピンの不整合反強磁性フェリ秩序によって理解することができる。興味深いことに、ここでは対称軸である c 軸にかけた磁場で、面内の4回対称性が自発的に破れている。超微細結合定数 $A_c=3.4$ kOe/ μ_B を考慮するとII相の秩序モーメントは $\sim 0.6 \mu_B/U$ と見積もれる。このNMRの結果は、22 Tの H^* で磁化率に異常があることを初めて明らかにした。このことは、輸送現象測定ではわからなかったことである。さらに、 H_c が ~ 35.6 TにおけるHOからII相への磁場誘起相転移は、一次相転移であることを確認した。非磁性遍歴HO状態から局在イジング型のAFM (フェリ) II相が一次相転移で現れることになる、この挙動は、最近提案されたrank-5 (32極子) という非常に高次の多極子秩序の理論モデル [16] で良く説明できる。

3. 成果の意義と波及効果

隠れた秩序相と高磁場AFM II相で見られた自発的な面内4回対称性の破れは、密接に関連していると考えられる。今回の結果は、 URu_2Si_2 の隠れた秩序を同定に対して重要な貢献を与えた。隠れた秩序変数は、まだ完全に特定されていないが、近い将来における秩序パラメータを決めることを期待することができる。

4. 今後の予定

現在、 URu_2Si_2 の超伝導状態の研究を計画している。 URu_2Si_2 の超伝導状態は、非通常型と考えられているが、まだ良く理解されていないので、その解明を図る。

susceptibility around the anomaly observed at $H^* \sim 22$ T which, in turn, could not be unveiled by previous transport measurements. Furthermore, based on our NMR data, the transition between the HO and the novel field-induced phase at $H_c \sim 35.6$ T is found to be of first order. The U localized moments with Ising-type character suddenly emerge in the orthorhombic AFM phase II from the non-magnetic itinerant HO state. This behavior may find some connection with a recent proposed theoretical model of rank-5 multipolar ordering [16].

3. Importance of this result and its impact

The observed spontaneous breaking of the in-plane four-fold symmetry in the HO and the high field AFM II phases may be closely related. Our results may give significant evidence toward identifying the hidden-order in URu_2Si_2 . Although it is not yet completely identified, we can expect definite results for the order parameter in the near future.

4. Perspectives

Next we are going to study the superconducting state of URu_2Si_2 . This is considered to be unconventional, but still needs to be confirmed.

参考文献 References

- [1] Y. Tokunaga, H. Sakai, S. Kambe *et al.*, Phys. Rev. B. **88**, 085124 (2013).
- [2] T. U. Ito, W. Higemoto *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 113703 (2011).
- [3] S. Kambe, Y. Tokunaga, H. Sakai *et al.*, Phys. Rev. Lett. **110**, 246406 (2013).
- [4] H. Sakai, Y. Tokunaga, S. Kambe *et al.*, Phys. Rev. Lett. **112**, 236401 (2014).
- [5] Y. Tokunaga, T. Nishi, M. Nakada, A. Itoh, H. Sakai, S. Kambe *et al.*, Phys. Rev. B. **89**, 214416 (2014).
- [6] H. Sakai, Y. Tokunaga, S. Kambe *et al.*, Phys. Rev. Lett. **112**, 206401 (2014).
- [7] S. Kambe, H. Sakai, Y. Tokunaga *et al.*, Nature Physics **10**, 840 (2014).
- [8] T. U. Ito, W. Higemoto *et al.*, Appl. Phys. Lett. **103**, 042905 (2013).
- [9] R. Okazaki *et al.*, Science **331**, 439 (2011).
- [10] H. Amitsuka *et al.*, Phys. Rev. Lett. **83**, 5114 (1999).
- [11] K. Matsuda *et al.*, Phys. Rev. Lett. **87**, 087203 (2001).
- [12] K. H. Kim *et al.*, Phys. Rev. Lett. **93**, 206402 (2004).
- [13] V.F. Correa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **109**, 246405 (2012).
- [14] H. Shishido *et al.*, Phys. Rev. Lett. **102**, 156403 (2009).
- [15] K. Sugiyama *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **68**, 3394 (1999).
- [16] H. Ikeda *et al.*, Nature Physics **8**, 528 (2012).