

強相関電子系の量子臨界点近傍の磁気励起と 量子相分離の解明

(研究課題番号 15340118)

平成15年度～16年度科学研究費補助金(基盤研究(B)(2))

研究成果報告書



平成17年3月

研究代表者 石田 憲二

(京都大学大学院理学研究科)

強相関電子系の量子臨界点近傍の磁気励起と 量子相分離の解明

(研究課題番号 15340118)

平成15年度～16年度科学研究費補助金(基盤研究(B)(2))

研 究 成 果 報 告 書

平成17年3月

研究代表者 石 田 憲 二

(京都大学大学院理学研究科)

1. はしがき

本研究「強相関電子系の量子臨界点近傍の磁気励起と量子分離の解明」は平成15-16年度の文部科学省科学研究費補助金(基盤研究(B)(2))の援助を受けて行われた。

本研究の目的は、強相関電子系物質、中でも銅、コバルト、ルテニウムの酸化物や、Ce, Yb, U化合物の重い電子物質で見られる「量子臨界点近傍の磁気励起を微視的な実験手法により調べる」ことである。ここでいう量子臨界点とは物理パラメータにより引き起こされる絶対零度での磁気転移点のことであり、その近傍では通常の金属状態で成り立つフェルミ液体状態とは大きく逸脱した非フェルミ液体的振る舞いが観測されている。また最近では非従来型超伝導が量子臨界点近傍で数多く発見され、超伝導発現機構の関係からも量子臨界点の磁気励起は大変興味をもたれている。また微視的な実験としては核磁気共鳴(NMR)や、ミュオンスピン共鳴(μ SR)を用いた。特にNMRの実験が行えない条件下(NMRの観測限界を超える短い緩和時間や極端な低磁場下)で行ったミュオン共鳴の実験は、両実験手段が相補的であることを示した。さらに、微視的な実験の特徴を生かし、強相関電子系超伝導体で見られる磁性と超伝導の関係についても、微視的な観点から調べた。

これらの研究を通し、本研究課題期間中に大別して以下の成果が得られた。

(1) 量子臨界点近傍での磁気励起

今まで量子臨界点はドーピングにより実現されていた。しかしこの場合、ドーピングにより系が乱され、不純物誘起の磁気励起なのか、本質的な量子臨界ゆらぎなのか区別することが難しい。我々は量子臨界点近傍に位置するstoichiometric物質、 YbRh_2Si_2 と $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ に着目し、磁気励起をNMR、 μ SRを用い調べた。前者では、70 mKの低温で磁気秩序を起こし、磁気秩序モーメントは $10^{-2}\mu_B$ 以下の小さなものであることを μ SR実験から明らかにした。またNMRの実験から、臨界点近傍では色々な波数を持った磁気ゆらぎが成長し中でも反強磁性ゆらぎが低温に向かって増大し反強磁性秩序をすることを明らかにした。

Bi-layeredルテニウム酸化物 $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ では、一次のメタ磁性転移の臨界点によって引き起こされた量子臨界点であることがGrigera *et al.*により示され、2次相転移の場合の量子臨界点との比較やそこでの磁気励起の性質について興味を持たれている。我々は、この物質で ^{17}O -NMRを行うことにより、臨界磁場での磁気励起の振る舞いを調べた。その結果、核スピン-格子緩和率を温度で割った $1/T_1T$ は、臨界磁場では低温まで増大を続け、 $T=0$ での臨界点を示唆する振る舞いをする。この振る舞いは、量子臨界点の時に理論的に予想されていた振る舞いと一致する。また $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ では臨界磁場の上下で、同様のフェルミ液体状態が実現しており、臨界点の上下で相の異なる2次の量子臨界点と性質が異なることも示した。

スピン三重項超伝導体と考えられている Sr_2RuO_4 において、CaやTiを添加することにより磁性が現れることが、Nakatsuji *et al.*, Minakata *et al.*により示された。我々はこれらの系においてSr-NMRを行い、それぞれ強磁性、反強磁性ゆらぎがそれぞれ増大されることを示した。

(2) 磁性と超伝導の競合、共存問題

強相関電子系超伝導において超伝導と磁性の共存、競合問題は超伝導のメカニズムを考える上からも大変興味深い問題である。

重い電子系超伝導体 CeCu_2Si_2 において磁性と超伝導の移り変わりを圧力、Geのドーピングにより調べた。Geを僅か2%ドーピングした試料では、弱い磁気転移とともに超伝導転移を起こすようになる。この試料に圧力を加えると、磁気秩序は消え超伝導性も回復する。Geドーピングは負の圧力効果に相当し、Geドーピングによって引き起こされる乱れの効果は小さいと考えられる。また境界領域の磁性相と超伝導相の相図を、圧力、Geドーピング濃度をパラメータにして作成した。また磁性相と超伝導相が共存する $\text{Ce}_{0.99}\text{Cu}_{2.02}\text{Si}_2$ では磁気相のNMR信号は、緩和時間が短いため観測されない。しかし我々は横磁場ミュオン共鳴法を用いることにより磁気相の超伝導状態のKnight-shiftを測定した。その結果磁気相のKnight-shiftは T_c 以下減少することを観測し、超伝導と磁気秩序がミクロに共存することを示した。

また $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ (LSCO)の磁性と超伝導の臨界濃度($x = 0.06$)近傍の $x = 0.07$ の試料において、磁性と超伝導の関係を調べた。横磁場ミュオン共鳴を高均一、高磁場超伝導磁石で行うことにより、微視的帯磁率の測定を2 Kまで行った。その結果、超伝導転移温度($T_c \sim 17$ K)以下の十分低温 $T_M \sim 4$ Kで静的磁気秩序を起こすこと、磁気秩序状態では90%以上が内部磁場を感じていること、100 K以下の温度で、変調を受けた反強磁性相関が発達することなどを明らかにした。これらの微視的な結果と中性子散乱実験の結果を考慮し、磁性と超伝導が共存する状態として変調したストライプ状態を提案した。

(3) 超伝導状態のナイトシフト測定

超伝導電子対の対称性を知るためには、超伝導状態でスピン帯磁率を測定する必要がある。しかし超伝導反磁性のため通常の磁化測定では超伝導状態の帯磁率は測定できない。電子スピンの核の位置に作る磁場を測定するナイトシフトの測定は、超伝導状態でのスピン帯磁率を精度よく知ることが出来る。

重い電子超伝導体 UNi_2Al_3 において、超伝導状態のナイトシフトの測定を行い面内方向のスピン帯磁率が変化しないことからスピン三重項超伝導体である可能性を指摘した。またパイロクロア化合物で最初に見つかった超伝導体 $\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$ についても超伝導状態のナイトシフトの測定を行い、スピン帯磁率が超伝導状態で減少することからスピン一重項超伝導体であることを示した。

スピン三重項超伝導体 Sr_2RuO_4 において磁場中でのスピン状態を知るためには、ナイトシフトの方向依存性を測定する必要がある。今まで面内のナイトシフトは測定されていたが、c軸方向の測定は臨界磁場が小さいため行われていなかった。今回NQR信号に弱磁場をc軸方向に印加する方法で、c軸方向のシフトを測定した。その結果c軸方向のナイトシフトも200 Oeの磁場以上では超伝導転移で変化しないことを示した。この結果は超伝導 d -vectorは外部磁場下で、容易に方向を変えることを意味している。

(4) 水和コバルト酸化物における超伝導と磁性

本研究課題期間中に、水和コバルト酸化物の超伝導が報告され、室町英治、桜井裕也氏(物材機構)、吉村一良教授(京大理化)のグループと共同実験を始めた。Co核の $1/T_1$ の振る舞いから、この超伝導体が強相関電子系物質で見られている異方的超伝導体であることを示した。またこの物質の常伝導状態の磁気相関は、高温超伝導体に見られた強い反強磁性相関とは異なり、むしろ強磁性ゆらぎに近いことを指摘した。またこの超伝導体の T_c には水の含有量が重要であることを示し、様々な水の濃度の試料の測定から、この物質の超伝導相は磁気相と接しており、強相関電子系超伝導に共通に見られる相図がこの超伝導体においても成り立っていることを明らかにした。実験的な物理量の核四重極共鳴周波数(ν_Q)をパラメータに取りこの物質の相図を作り、この物質では CoO_2 block-layerのc軸の長さが基底状態を決定付ける重要なパラメータであることを指摘した。

母物質であり水を含んでいない $\text{Na}_{0.7}\text{CoO}_2$ についてもNa-NMRを行い、この物質では強磁性相関が支配的な金属状態が成り立っていることを示した。それぞれの成果を発表した主な論文は本冊子に収録した。

これらの成果をまとめることが出来たのは、ひとえに多くの研究協力者、研究室の大学院生のお陰である。特に、北岡 良雄 教授(阪大基礎工)、前野 悦輝 教授(京大国際融合セ、理)には、研究を行う上での多大の援助や協力、議論を頂いた。これらの研究は、矢口宏、中辻知、菊川直樹[現St.Andrews大]、R. Perry[現St.Andrews大]、毛志強[現Tulane大]、深澤英人[現千葉大](京大理)、鄭国慶[現岡大理]、徳永陽[現原研]、棕田秀和、小手川恒[現岡大理]、川崎祐[現徳島大](阪大基礎工)、吉村一良、道岡千城、加藤将樹[現同志社工](京大理化)、髭本亘[現原研]、幸田章宏、大石一城、門野良典(KEK)、Douglas E. MacLaughlin、Ben-Li Young[現Los Alamos](UC Riverside, USA)、Octavio Trovarelli, Christoph Geibel, Frank Steglich (MPI Dresden, Germany)、桜井裕也、室町英治、高田和典(物材機構)の各氏との共同研究である。ここに深く感謝し、厚くお礼申し上げます。最後に、実験をともに行った阪大基礎工の大学院生の岡本薫[現キャノン]、南友樹登[現キーエンス]、綾英則[現観音寺高校教諭]に、京大理の大学院生の北川健太郎、村川寛、井原慶彦の諸兄に、日頃から事務処理を行って下さった袋谷孝子さん(阪大基礎工)、伊藤直子さん(京大IIC)に深く感謝申し上げます。

平成17年(2005年)3月

研究代表者：石田 憲二
(京都大学大学院理学研究科 助教授)

石田 憲二

1. Preface

The Research Program entitled "A study on magnetic excitation and phase separation in the vicinity of the quantum critical point (QCP) in the strongly correlated electron system (SCES)" was supported by the Japanese Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, Grant-in-Aid for Scientific Research (B)(2) from 2003 to 2004.

The aim of this programme is to investigate the magnetic fluctuations around QCPs in cuprate, cobaltate, and ruthenate compounds, and heavy-fermion compounds including Ce, Yb and U ions using microscopic experimental techniques. Here, the QCP is the physical condition where the phase transition temperature is suppressed to the absolute zero by varying a physical parameter. Near the QCP, non-Fermi-liquid behavior is observed, which deviates from ordinary behaviors seen in normal metals. Quite recently, unconventional superconductors have been discovered in the vicinity of QCPs, so that the understanding of magnetic fluctuations near the QCP has become important to elucidate the mechanism of unconventional superconductivity. We use nuclear magnetic resonance (NMR) and muon spin resonance/rotation (μ SR) as our microscopic experimental techniques. We have emphasized the use of μ SR experiments when an NMR experiment is impossible due to the short relaxation time beyond the NMR experimental limit or in extremely low fields. We showed that the two experimental techniques are quite complementary to each other. In addition, we investigated the interplay between magnetism and unconventional superconductivity in the SCES from the microscopic point of view using NMR and μ SR measurements.

During the research period, we investigated the following subjects,

- a) magnetic fluctuations near the QCP
- b) the relation between magnetism and superconductivity in cuprate and HF compounds.
- c) Knight shift measurements in recently discovered superconductors
- d) Hydrate cobaltate superconductor.

The results during the period are summarized, and are published in scientific journals. Some of them, which are considered to be important, are referred to in this report.

The above studies were performed in collaboration with Y. Maeno, H. Yaguchi, S. Nakatsuji, Z.Q. Mao (Dept. of Phys., Kyoto Univ.), Y. Kitaoka, G.-q. Zheng, Y. Tokunaga, Y. Kawasaki, H. Mukuda, H. Kotegawa, (Osaka Univ.), K. Yoshimura, C. Michioka, M. Kato, (Dept. of Chemistry, Kyoto Univ.), R. Kadono, W. Higemoto, A. Koda, K. Ohishi (KEK), D.E. MacLaughlin, B. L. Young (UCR), O. Trovarelli, C. Geibel, F. Steglich (MPI,

Dresden), and Y. Sakurai, E. Takayama-Muromachi (NIMS). We would like to thank all the collaborators. Particularly I thank Prof. Y. Kitaoka and Prof. Y. Maeno for their supports, collaboration, and discussions. I also thank graduate students K. Okamoto, Y. Minami, H. Aya, K. Kitagawa, H. Murakawa, Y. Ihara for their collaboration, and thank Ms. T. Fukuroya and Ms. N. Ito for their secretary assistance.

March, 2005

A handwritten signature in cursive script, reading "Kenji Ishida".

Kenji Ishida
Department of Physics,
Graduate School of Science,
Kyoto University

2. 研究組織

研究代表者： 石田 憲二 (京都大学大学院理学研究科 助教授)

606-8502 京都市左京区北白川追分町

TEL:075-753-3752, FAX:075-753-3783, E-mail: kishida@scphys.kyoto-u.ac.jp

研究分担者： 中辻 知 (京都大学大学院理学研究科 講師)

606-8503 京都市左京区北白川追分町

TEL:075-753-3793, FAX: 075-753-3783, E-mail: nakatsuji@scphys.kyoto-u.ac.jp

研究代表者： 門野 良典 (高エネルギー加速器研究機構 物質構造化学研 教授)

305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

TEL: 0298-64-5625, FAX: 0298-64-5623, E-mail: ryosuke.kadono@kek.jp

研究代表者： 髭本 亘 (特殊法人日本原子力研究所 ・ 副主任研究員)

319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

TEL:029-284-3873, FAX:029-282-5927, E-mail: higemoto@popsvr.tokai.jaeri.go.jp

Research Coordinator: Kenji Ishida (*Department of Physics, Kyoto University*)

Research Member: Satoru Nakatsuji (*Department of Physics, Kyoto University*)

Research Member: Ryosuke Kadono

(*Muon Science Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization*)

Research Member: Wataru Higemoto

(*Japan Atomic Energy Research Institute*)

研究経費(Grant)

平成 15 年度 (FY2003) :	13,100 千円	(¥13,100,000)
平成 16 年度 (FY2004) :	3,800 千円	(¥ 3,800,000)
計 (Total) :	16,900 千円	(¥16,900,000)

3. 主な研究協力者：国内 (Main Collaborators: Domestic)

(京都大学大学院理学研究科物理 *Dept. of Physics, Kyoto Univ.*)

前野悦輝 (Y. Maeno), 矢口宏 (H. Yaguchi), 毛志強 (Z. Q. Mao),
菊川直樹 (N. Kikugawa), 深澤英人 (H. Fukazawa), Robin Perry

(大阪大学大学院基礎工学研究科 *Dept. of Physical Science, Osaka Univ.*)

北岡良雄 (Y. Kitaoka), 鄭国慶 (G.-q. Zheng), 椋田秀和 (H. Mukuda), 徳永陽
(Y. Tokunaga), 川崎祐 (Y. Kawasaki), 小手川恒 (H. Kotegawa)

(京都大学大学院理学研究科化学 *Dept. of Chemistry, Kyoto Univ.*)

吉村一良 (K. Yoshimura), 道岡千城 (C. Michioka), 加藤将樹 (M. Kato)

(高エネルギー加速器研究機構 *High Energy Accelerator Research Organization*)

幸田章宏 (A. Koda), 大石一城 (K. Ohishi)

(物質材料研究機構 *National Institute for Material Science*)

桜井裕也 (H. Sakurai), 室町英治 (E. Takayama-Muromachi), 高田和典 (K.
Takada)

主な研究協力者：海外 (Main Collaborators: International)

(*Department of Physics, University of California, Riverside*)

D. E. MacLaughlin, Ben-Li Young, M. S. Rose

(*Max-Planck Institute for Chemical Physics of Solid*)

O. Trovarelli, C. Geibel, F. Steglich

(*School of Physics and Astronomy Univ. of St. Andrews*)

S. A. Grigera, A. P. Mackenzie

4. 発表論文 会議での発表 (List of Publications and Presentation)

(1) 量子臨界点近傍での磁気励起 (Magnetic Excitations in the vicinity of the QCP)

- [1-1] “**YbRh₂Si₂: Spin Fluctuations in the Vicinity of a Quantum-Critical Point at Low Magnetic Field**”,
K. Ishida, K. Okamoto, Y. Kawasaki, Y. Kitaoka, O. Trovarelli, C. Geibel, and F. Steglich,
Physical Review Letters 89, 107202-1-4 (2002).
- [1-2] “**Quantum criticality in YbRh₂Si₂**”,
J. Custers, P. Gegenwart, K. Neumaier, H. Wilhelm, N. Oeschler, K. Ishida, Y. Kitaoka,
C. Geibel, and F. Steglich,
Journal of Physics-Condensed Matter 15 (28), S2047-S2053 Sp. Iss. (2003).
- 1-3 “ **μ SR and NMR in f-electron non-Fermi liquid materials**”,
D.E. MacLaughlin, M.S. Rose, B.L. Young, O.O. Bernal, R.H. Heffner, G.D. Morris,
K. Ishida, G.J. Nieuwenhuys, and J.E. Sonier,
Physica B-Condensed Matter 326, 381-386 (2003).
- 1-4 “**Spin dynamics in a structurally ordered non-Fermi-liquid compound: YbRh₂Si₂**”,
K. Ishida, D.E. MacLaughlin, O.O. Bernal, R.H. Heffner, G.J. Nieuwenhuys, O. Trovarelli,
C. Geibel, and F. Steglich,
Physica B 326, 403-405 (2003).
- 1-5 “ **μ SR and low-temperature antiferromagnetism in the ordered non-Fermi-liquid compound YbRh₂Si₂**”,
K. Ishida, D.E. MacLaughlin, K. Okamoto, Y. Kawasaki, Y. Kitaoka, G.J. Nieuwenhuys,
O.O. Bernal, A. Koda, W. Higemoto, R. Kadono, C. Geibel, and F. Steglich,
Physica B 329-333, 589-590 (2003).
- [1-6] “**Low-temperature magnetic order and spin dynamics in YbRh₂Si₂**”,
K. Ishida, D.E. MacLaughlin, Ben-Li Young, K. Okamoto, Y. Kawasaki, Y. Kitaoka,
G.J. Nieuwenhuys, R.H. Heffner, O.O. Bernal, W. Higemoto, A. Koda, R. Kadono,
O. Trovarelli, C. Geibel, and F. Steglich,
Physical Review B 68, 184401-1-14 (2003).
- 1-7 “**Disorder effects near a magnetic instability in CePtSi_{1-x}Ge_x (x = 0, 0.1)**”,
B.L. Young, D.E. MacLaughlin, M.S. Rose, K. Ishida, O.O. Bernal, H.G. Lukefahr, K. Heuser,
G.R. Stewart, N.P. Butch, P.C. Ho, and M.B. Maple,
Physical Review B 70 (2), 024401-1-14 (2004).
- 1-8 “**²⁹Si nuclear spin-lattice relaxation in CePtSi_{1-x}Ge_x near a magnetic instability**”,
B.L. Young, D.E. MacLaughlin, M.S. Rose, K. Ishida, O.O. Bernal, H.G. Lukefahr, K. Heuser,
and G.R. Stewart,
Physical Review B 70 (17), 174430-1-13 (2004).
- 1-9 “**Disorder, inhomogeneity and spin dynamics in f-electron non-Fermi liquid systems**”,
D.E. MacLaughlin, R.H. Heffner, O.O. Bernal, K. Ishida, J.E. Sonier, G.J. Nieuwenhuys,
M.B. Maple, and G.R. Stewart,
Journal of Physics-Condensed Matter 16 (40), S4479-S4498 Sp. Iss. (2004).
- 1-10 “**Multiple First-Order Metamagnetic Transitions and Quantum Oscillations in Ultrapure Sr₃Ru₂O₇**”,
R.S. Perry, K. Kitagawa, S.A. Grigera, R.A. Borzi, A.P. Mackenzie, K. Ishida, and Y. Maeno,
Physical Review Letters 92 (16), 166602-1-4 (2004).
- [1-11] “**Metamagnetic Quantum Criticality Revealed by ¹⁷O-NMR in the Itinerant Metamagnet Sr₃Ru₂O₇**”,
K. Kitagawa, K. Ishida, R.S. Perry, T. Tayama, T. Sakakibara, and Y. Maeno,
Submitted to Physical Review Letter
- [1-12] “**Evolution of normal-state magnetic fluctuations by Ca and Ti substitutions in Sr₂RuO₄: ⁸⁷Sr-NMR study**”,
K. Ishida, Y. Minami, Y. Kitaoka, S. Nakatsuji, N. Kikugawa, and Y. Maeno,

- Physical Review B* 67, 214412-1-6 (2003).
- [1-13] **“Ferromagnetic Correlations in Ca-doped Sr_2RuO_4 : ^{87}Sr NMR study”**,
K. Ishida, Y. Minami, Y. Kitaoka, S. Nakatsuji, and Y. Maeno,
Journal of Low Temperature Physics 131, 1227-1236 (2003).
- (2) 超伝導と磁性 (Superconductivity and Magnetism)
- 2-1 **“Cu-NQR study of $\text{CeCu}_2(\text{Si}_{0.98}\text{Ge}_{0.02})_2$ under hydrostatic pressure”**,
Y. Kawasaki, K. Ishida, K. Obinata, T. Mito, G. Q. Zheng, Y. Kitaoka, C. Geibel,
and F. Steglich F,
Physica B 312, 428-430 (2002).
- [2-2] **“Evidence for the Coexistence of Superconductivity and the Magnetic A-Phase in CeCu_2Si_2 Proved by Muon Knight Shift”**,
A. Koda, W. Higemoto, R. Kadono, Y. Kawasaki, K. Ishida, Y. Kitaoka, C. Geibel,
and F. Steglich,
Journal of the Physical Society of Japan 71, 1427-1430 (2002).
- 2-3 **“Coexistence of antiferromagnetism and superconductivity in heavy-fermion systems”**,
Y. Kitaoka, Y. Kawasaki, T. Mito, S. Kawasaki, G. Q. Zheng, K. Ishida, D. Aoki, Y. Haga,
R. Settai, Y. Onuki, C. Geibel, and F. Steglich,
Journal of Physics and Chemistry of Solids 63, 1141-1146 (2002).
- [2-4] **“Exotic magnetism and superconductivity in Ge-substituted CeCu_2Si_2 : A Cu NQR study”**,
Y. Kawasaki, K. Ishida, K. Obinata, K. Tabuchi, K. Kashima, Y. Kitaoka, O. Trovarelli,
C. Geibel, and F. Steglich,
Physical Review B 66, 224502-1-8 (2002).
- [2-5] **“Exotic Superconductivity in the Coexistent Phase of Antiferromagnetism and Superconductivity in $\text{CeCu}_2(\text{Si}_{0.98}\text{Ge}_{0.02})_2$: A Cu-NQR Study under Hydrostatic Pressure”**,
Y. Kawasaki, K. Ishida, S. J. Kawasaki, T. Mito, G. Q. Zheng, Y. Kitaoka, C. Geibel,
and F. Steglich,
Journal of the Physical Society of Japan 73 (1), 194-197 (2004).
- [2-6] **“Novel Phase Separation and Spin Dynamics of Lightly Doped $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ Probed by La-Nuclear Quadrupole Resonance”**,
K. Ishida, H. Aya, Y. Tokunaga, H. Kotegawa, Y. Kitaoka, M. Fujita, and K. Yamada,
Physical Review Letters 92 (25), 257001-1-4 (2004).
- [2-7] **“Coexistence of Static Magnetism with a Modulated Stripe Structure and Superconductivity Revealed by μSR Measurements in Underdoped $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ ”**
K. Ishida, W. Higemoto, K. Ohishi, A. Koda, R. Kodono, H. Goka, M. Fujita, and K. Yamada,
To be submitted
- (3) 超伝導状態のナイトシフト (Knight-Shift Measurements in the SC state)
- [3-1] **“Spin-Triplet Superconductivity in UNi_2Al_3 Revealed by the ^{27}Al Knight Shift Measurement”**,
K. Ishida, D. Ozaki, T. Kamatsuka, H. Tou, M. Kyogaku, Y. Kitaoka, N. Tateiwa, N. K. Sato,
N. Aso, C. Geibel, and F. Steglich,
Physical Review Letters 89, 037002-1-4 (2002).
- 3-2 **“Al Knight-shift measurement in the superconducting state of UNi_2Al_3 ”**,
K. Ishida, H. Tou, N. Tateiwa, Y. Kitaoka, K.N. Sato, N. Aso, C. Geibel, and F. Steglich,
Physica C 388-389, 535-536 (2003).
- 3-3 **“Odd-parity superconductivity in UPt_3 and UNi_2Al_3 -NMR studies”**,
H. Tou, K. Ishida, and Y. Kitaoka,
Physica C – Superconductivity and its Applications 408-10, 305-308 (2004)
- 3-4 **“Al Knight-shift measurement in the superconducting state of UNi_2Al_3 ”**,
K. Ishida, H. Tou, N. Tateiwa, Y. Kitaoka, K.N. Sato, N. Aso, C. Geibel, and F. Steglich,

- Physica C* 388-389, 535-536 (2003).
- [3-5] “Decrease in ^{111}Cd Knight Shift in Superconducting $\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$: Evidence for Spin-Singlet Pairing”,
H. Sakai, Y. Tokunaga, S. Kambe, K. Kitagawa, H. Murakawa, K. Ishida, H. Ohno, M. Kato, K. Yoshimura, and R.E. Walstedt,
Journal of the Physical Society of Japan 73 (11), 2940-2943 (2004)
- [3-6] “Measurement of the ^{101}Ru -Knight Shift of Superconducting Sr_2RuO_4 in a Parallel Magnetic Field”,
H. Murakawa, K. Ishida, K. Kitagawa, Z.Q. Mao, and Y. Maeno,
Physical Review Letters 93 (16), 167004-1-4 (2004).
- (4) $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ に於ける超伝導と磁性 (Superconductivity and magnetism in $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$)
- [4-1] “Unconventional Superconductivity and Nearly Ferromagnetic Spin Fluctuations in $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ ”,
K. Ishida, Y. Ihara, Y. Maeno, C. Michioka, M. Kato, K. Yoshimura, K. Takada, T. Sasaki, H. Sakurai, and E. Takayama-Muromachi,
Journal of the Physical Society of Japan 72, 3041-3044 (2003).
- [4-2] “Correlation between Superconducting Transition Temperature T_c and Increase of Nuclear Spin-Lattice Relaxation Rate Devided by Temperature $1/T_1T$ at T_c in the Hydrate Cobaltate $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ ”,
Y. Ihara, K. Ishida, C. Michioka, M. Kato, K. Yoshimura, K. Takada, T. Sasaki, H. Sakurai, and E. Takayama-Muromachi,
Journal of the Physical Society of Japan 73 (8), 2069-2072 (2004).
- [4-3] “Magnetic Fluctuations in the Metallic State of $\text{Na}_{0.7}\text{CoO}_2$ Revealed by ^{23}Na Nuclear Magnetic Resonance”,
Y. Ihara, K. Ishida, C. Michioka, M. Kato, K. Yoshimura, H. Sakurai, and E. Takayama-Muromachi,
Journal of the Physical Society of Japan 73 (11), 2963-2966 (2004).
- [4-4] “Possible unconventional superconductivity in $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ probed by muon spin rotation and relaxation”,
W. Higemoto, K. Ohishi, A. Koda, S. R. Saha, R. Kadono, K. Ishida, K. Takada, H. Sakurai, E. Takayama-Muromachi, and T. Sasaki,
Physical Review B 70, 134508-1-5 (2005).
- [4-5] “Weak Magnetic Order in Bilayered-Hydrate $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ Structure Probed by Co Nuclear Quadrupole Resonance -Proposed Phase Diagram in Superconducting $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ - “
Y. Ihara, K. Ishida, C. Michioka, M. Kato, K. Yoshimura, K. Takada, T. Sasaki, H. Sakurai, E. Takayama-Muromachi,
Journal of the Physical Society of Japan 74 (3), 867-870 (2005)

[] の論文は本冊子に含む。 (The papers shown by [] are included in this report.)

5. 口頭発表

[海外国際会議, Workshop : 招待講演]

"NMR in Sr_2RuO_4 "

K. Ishida

Japan-French Colloquium "Quantum complex systems"

21st – 24th, July, '04 ILL Grenoble, France

"Spin Fluctuations in YbRh_2Si_2 probed by a Si-NMR study: Field-Induced Quantum Criticality"

K. Ishida

3rd March '03, American Physical Society Meeting, Austin Texas, USA

[国内国際学会 : 一般講演]

"Co-NQR Study in Superconducting $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ and Related compounds"

K. Ishida

2nd Nov., 2004, YKIS 2004 Physics of Strongly Correlated Electron Systems

"Nuclear-Magnetic Resonance Studies in Sr_2RuO_4 "

K. Ishida

25 Oct., 2004, Clock Tower Centennial Hall, Kyoto University, Kyoto, Japan.

"Unconventional Superconductivity and Nearly Ferromagnetic Spin Fluctuations in $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ "

K. Ishida

5th -8th, Nov. '03, The 3rd International Workshop "Novel Quantum Phenomena in Transition Metal Oxides" and The 1st Asia-Pacific Workshop on "Strongly Correlated Electron Systems"

"c-axis Knight Shift Measurement in the Superconducting State of Sr_2RuO_4 "

K. Ishida

5th -8th, Nov. '03, The 3rd International Workshop "Novel Quantum Phenomena in Transition Metal Oxides" and The 1st Asia-Pacific Workshop on "Strongly Correlated Electron Systems"

[国内学会 : 招待講演]

重い電子化合物 YbRh_2Si_2 における磁気量子臨界点近傍の磁気励起

石田憲二

日本物理学会第 59 回年次大会 (九州大学箱崎キャンパス, 2004. 3. 27)

[国内学会 : 一般講演]

低ドーピング領域 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ ($x=0.07$) における超伝導と磁性の共存(II) (μSR 実験)

石田憲二, 髭本亘, 門野良典, 幸田章宏, 大石一城, 藤田全基, 山田和芳

日本物理学会第 60 回年次大会 (東京理科大学野田キャンパス, 2005. 3. 25)

超伝導体 $\text{LaFe}_4\text{P}_{12}$, $\text{LaOs}_4\text{Sb}_{12}$ の NMR

中井祐介, 石田憲二, 菅原仁, 菊池大輔, 佐藤英行

日本物理学会第 60 回年次大会 (東京理科大学野田キャンパス, 2005. 3. 25)

三角格子超伝導体 $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ のいろいろな原子核を用いた核磁気共鳴
道岡千城, 伊藤豊, 和氣剛, 吉村一良, 加藤将樹, 石田憲二, 井原慶彦, 桜井裕也, 室町英治, 高田和典, 佐々木高義
日本物理学会第 60 回年次大会 (東京理科大学野田キャンパス, 2005. 3. 25)

超伝導体 $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ および周辺物質の核磁気共鳴による研究
太田寛人, 道岡千城, 伊藤豊, 和氣剛, 吉村一良, 加藤将樹, 石田憲二, 井原慶彦, 桜井裕也, 室町英治, 高田和典, 佐々木高義
日本物理学会第 60 回年次大会 (東京理科大学野田キャンパス, 2005. 3. 25)

$\text{Na}_x\text{Co}^{17}\text{O}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ の ^{17}O -NMR
井原慶彦, 石田憲二, 道岡千城, 加藤将樹, 吉村一良, 高田和典, 長田実, 佐々木高義, 桜井裕也, 室町英治
日本物理学会第 60 回年次大会 (東京理科大学野田キャンパス, 2005. 3. 25)

低ドーピング領域 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ ($x = 0.06$) における超伝導と磁性の共存 (μSR 実験)
石田憲二, 藤田全基, 山田和芳, 大石一城, 幸田章宏, 髭本亘, 門野良典
日本物理学会 2004 年秋季大会 (青森大学, 2004. 9. 14)

遍歴メタ磁性酸化物 $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ の ^{17}O -NMR を用いた量子臨界ゆらぎの観測
北川健太郎, 石田憲二, R. S. Perry, 前野悦輝
日本物理学会 2004 年秋季大会 (青森大学, 2004. 9. 14)

$\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ の遍歴メタ磁性:RuO₂ 面に平行な磁場中での多段転移
Robin S. Perry, 田山孝, 北川健太郎, 榊原俊郎, 石田憲二, 前野悦輝
日本物理学会 2004 年秋季大会 (青森大学, 2004. 9. 14)

Co 酸化物超伝導体 $\text{Na}_{0.35}\text{CoO}_2 \cdot 1.35\text{D}_2\text{O}$ の重水素 NMR
道岡千城, 吉村一良, 加藤将樹, 石田憲二, 井原慶彦, 桜井裕也, 室町英治, 高田和典, 佐々木高義
日本物理学会 2004 年秋季大会 (青森大学, 2004. 9. 14)

三角格子コバルト酸化物 Na_xCoO_2 ($x \sim 0.7$) の異常金属状態
井原慶彦, 石田憲二, 道岡千城, 加藤将樹, 吉村一良, 高田和典, 佐々木高義, 桜井裕也, 室町英治
日本物理学会 2004 年秋季大会 (青森大学, 2004. 9. 13)

Sr_2RuO_4 における不純物効果の NQR, NMR 法による微視的測定
村川寛, 中井祐介, 石田憲二, 矢口宏, 菊川直樹, 滝沢恵一, 北川健太郎, 前野悦輝
日本物理学会第 59 回年次大会 (九州大学箱崎キャンパス, 2004. 3. 27)

$\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ のメタ磁性転移に伴う量子臨界性と多相現象
R. S. Perry, 田山孝, 前野悦輝, 北川健太郎, S. A. Grigera, R. A. Borzi, A. P. Mackenzie, 石田憲二, 榊原俊郎
日本物理学会第 59 回年次大会 (九州大学箱崎キャンパス, 2004. 3. 27)

遍歴メタ磁性酸化物 $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ における ^{17}O -NMR を用いた量子臨界現象の研究
北川健太郎, 石田憲二, R. S. Perry, 村川寛, 井原慶彦, 前野悦輝
日本物理学会第 59 回年次大会 (九州大学箱崎キャンパス, 2004. 3. 28)

コバルト酸化物 $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ の超伝導性の試料依存性(Co-NMR/NQR) 井原慶彦, 石田憲二, 道岡千城, 加藤将樹, 吉村一良, 高田和典, 佐々木高義, 櫻井裕也, 室町英治
日本物理学会第 59 回年次大会 (九州大学箱崎キャンパス, 2004. 3. 28)

二次元三角格子 Co 酸化物超伝導体 $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ の NMR・NQR(I)
加藤将樹, 道岡千城, 和氣剛, 吉村一良, 石田憲二, 井原慶彦, 桜井裕也, 室町英治
日本物理学会第 59 回年次大会 (九州大学箱崎キャンパス, 2004. 3. 28)

二次元三角格子 Co 酸化物超伝導体 $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ の NMR・NQR(II)
道岡千城, 加藤将樹, 和氣剛, 吉村一良, 石田憲二, 井原慶彦, 桜井裕也, 室町英治
日本物理学会第 59 回年次大会 (九州大学箱崎キャンパス, 2004. 3. 28)

二次元三角格子 Co 酸化物超伝導体 $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ の NMR・NQR(III)~Fe 置換効果~
和氣剛, 加藤将樹, 道岡千城, 吉村一良, 石田憲二, 井原慶彦, 桜井裕也^A, 室町英治
日本物理学会第 59 回年次大会 (九州大学箱崎キャンパス, 2004. 3. 28)

μSR で見た $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ の磁性と超伝導 II
髭本亘^A, 大石一城^A, 幸田章宏^A, S.R. Saha^A, 門野良典^{A・B}, 石田憲二^C, 櫻井裕也^D,
高田和典^D, 室町英治^D, 佐々木高義
日本物理学会第 59 回年次大会 (九州大学箱崎キャンパス, 2004. 3. 28)

スクッテルダイト化合物 $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ の磁気励起 (P-NMR)
石田憲二^A, 村川寛^A, 北川健太郎^A, 小手川恒^B, 北岡良雄^B, 青木勇二^C, 菅原仁^C, 佐藤英行^C, Ben-Li Young^D, D. E. MacLaughlin^D, 播磨尚朝^E
日本物理学会第 59 回年次大会 (九州大学箱崎キャンパス, 2004. 3. 30)

軌道秩序を示すスクッテルダイト化合物 $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ の磁気状態
石田憲二^A, 村川寛^A, 北川健太郎^A, 小手川恒^B, 北岡良雄^B, 松田達磨^C, 菅原仁^C, 佐藤英行^C, Ben-Li Young^D, D. E. MacLaughlin^D, 播磨尚朝^E
日本物理学会 2004 年秋季大会 (岡山大学津島キャンパス, 2003. 9. 20)

遍歴メタ磁性酸化物 $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ における ^{17}O -NMR を用いた磁気状態の研究
北川健太郎^A, 石田憲二^A, R. S. Perry^B, 前野悦輝^{A・B}
日本物理学会 2004 年秋季大会 (岡山大学津島キャンパス, 2003. 9. 20)

重い電子系物質 YbCu_5 の Cu-NMR, NQR 法による物性測定
井原慶彦, 石田憲二, 吉村一良, 張維, 辻井直人, 太田寛人
日本物理学会 2004 年秋季大会 (岡山大学津島キャンパス, 2003. 9. 23)

抄 録 目 次

(1) 量子臨界点近傍での磁気励起 (Magnetic Excitations in the vicinity of the QCP)

1 - 1	"YbRh ₂ Si ₂ : Spin Fluctuations in the Vicinity of a Quantum-Critical Point at Low Magnetic Field", 1
1 - 2	"Quantum criticality in YbRh ₂ Si ₂ ", 5
1 - 6	"Low-temperature magnetic order and spin dynamics in YbRh ₂ Si ₂ ", 12
1 - 11	"Metamagnetic Quantum Criticality Revealed by ¹⁷ O-NMR in the Itinerant Metamagnet Sr ₃ Ru ₂ O ₇ ", 26
1 - 12	"Evolution of normal-state magnetic fluctuations by Ca and Ti substitutions in Sr ₂ RuO ₄ : ⁸⁷ Sr-NMR study", 31

(2) 超伝導と磁性 (Superconductivity and Magnetism)

2 - 2	"Evidence for the Coexistence of Superconductivity and the Magnetic A-Phase in CeCu ₂ Si ₂ Proved by Muon Knight Shift", 37
2 - 4	"Exotic magnetism and superconductivity in Ge-substituted CeCu ₂ Si ₂ : A Cu NQR study", 41
2 - 5	"Exotic Superconductivity in the Coexistent Phase of Antiferromagnetism and Superconductivity in CeCu ₂ (Si _{0.98} Ge _{0.02}) ₂ : A Cu-NQR Study under Hydrostatic Pressure", 49
2 - 6	"Novel Phase Separation and Spin Dynamics of Lightly Doped La _{2-x} Sr _x CuO ₄ Probed by La-Nuclear Quadrupole Resonance", 53
2 - 7	"Coexistence of Static Magnetism with a Modulated Stripe Structure and Superconductivity Revealed by μ SR Measurements in Underdoped La _{2-x} Sr _x CuO ₄ ", 57

(3) 超伝導状態のナイトシフト (Knight-Shift Measurements in the SC state)

3 - 1	"Spin-Triplet Superconductivity in UNi ₂ Al ₃ Revealed by the ²⁷ Al Knight Shift Measurement", 61
3 - 5	"Decrease in ¹¹¹ Cd Knight Shift in Superconducting Cd ₂ Re ₂ O ₇ : Evidence for Spin-Singlet Pairing", 65
3 - 6	"Measurement of the ¹⁰¹ Ru-Knight Shift of Superconducting Sr ₂ RuO ₄ in a Parallel Magnetic Field", 69

(4) Na_xCoO₂·yH₂Oに於ける超伝導と磁性 (Superconductivity and magnetism in Na_xCoO₂·yH₂O)

4 - 1	"Unconventional Superconductivity and Nearly Ferromagnetic Spin Fluctuations in Na _x CoO ₂ ·yH ₂ O", 73
4 - 2	"Correlation between Superconducting Transition Temperature T_c and Increase of Nuclear Spin-Lattice Relaxation Rate Divided by Temperature $1/T_1T$ at T_c in the Hydrate Cobaltate Na _x CoO ₂ ·yH ₂ O", 77
4 - 3	"Magnetic Fluctuations in the Metallic State of Na _{0.7} CoO ₂ Revealed by ²³ Na Nuclear Magnetic Resonance", 81
4 - 4	"Possible unconventional superconductivity in Na _x CoO ₂ ·yH ₂ O probed by muon spin rotation and relaxation", 85
4 - 5	"Weak Magnetic Order in Bilayered-Hydrate Na _x CoO ₂ ·yH ₂ O Structure Probed by Co Nuclear Quadrupole Resonance -Proposed Phase Diagram in Superconducting Na _x CoO ₂ ·yH ₂ O-", 90