

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 4 月 10 日現在

機関番号：15301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22740232

研究課題名（和文）

電子相関を舞台とする非従来型超伝導発現機構の核磁気共鳴法による研究

研究課題名（英文）

NMR study of unconventional superconductivity in strongly correlated electron systems

研究代表者

川崎 慎司 (KAWASAKI SHINJI)

岡山大学・大学院自然科学研究科・講師

研究者番号：80397645

研究成果の概要（和文）：1. 高温超伝導体の超強磁場 NMR による研究；米国立強磁場研究所において超強磁場下(45 万ガウス) NMR 実験を行い、磁場によって高温超伝導を破壊することに成功し、高温超伝導の背景電子状態を初めて同定した。2. 鉄系高温超伝導体の磁性と超伝導に関する研究；2008 年に東工大で発見された鉄系高温超伝導体の電子相図が、銅酸化物高温超伝導体と類似したものであり、銅酸化物同様、磁性が鉄系高温超伝導発現に重要な役割を果たしていることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：1. NMR study of high- T_c cuprate in very high magnetic field; by applying high magnetic field of 45 T, we revealed the pseudogap ground state for high T_c cuprate after suppressing superconductivity for the first time. 2. NMR study of magnetism and superconductivity in iron-pnictide superconductors; we found the phase diagram of iron-pnictide superconductor is similar with high- T_c cuprate indicating that magnetism helps to raise T_c in iron-pnictide as well as cuprate.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：低温物性物理学

科研費の分科・細目：物理学・物性II

キーワード：電子相関・異方的超伝導・核磁気共鳴・低温・強磁場・銅酸化物・鉄砒化物

1. 研究開始当初の背景

重い電子系超伝導体をはじめとする電子相関が強い系の磁気量子臨界点(絶対零度における磁気相転移点)近傍では、従来のフェルミ液体論では説明できない物理

量の温度依存性が観測されてきた。注目すべきことは、この量子臨界点近傍で電子格子相互作用を媒介とする BCS 理論では説明できない非従来型の異方的超伝導が発現することである。また、銅酸化物高温超伝

導体が同様に磁気相に隣接することから、この磁気量子臨界現象が高温超伝導発現機構解明につながる重要な鍵になると期待され、固体物理の中心的研究テーマとして世界的に大きな注目を集めていた。

2. 研究の目的

本研究は、磁性と関連の深い、電子相関を舞台とした新奇な非従来型超伝導発現機構の系統的解明のため、典型的な強相関電子系超伝導体である、銅酸化物高温超伝導体及び、鉄ヒ化物高温超伝導体に着目し、低温高圧下核磁気共鳴 (NMR) /核四重極共鳴 (NQR) 測定を行う。

3. 研究の方法

研究方法は、高圧セルと ^3He 冷凍機との組み合わせによる低温高圧下 NMR/NQR 測定 ($P \sim 5$ 万気圧、 $T < 300\text{mK}$) である。本研究で用いる測定システムは、小型なインデント型高圧セルと ^3He ガスダンプ内蔵型小型冷凍機で構成され、高圧セル交換、冷却が容易であり、フットワークの軽い低温高圧下 NMR/NQR 実験を実現している。

銅酸化物高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{La}_x\text{CuO}_{6+\delta}$ 単結晶については、独マックスプランク研究所、C. T. Lin 氏、また、鉄ヒ化物超伝導体 $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ については、中国科学院 N. L. Wang 教授のグループからそれぞれ提供を受けており、グローバルな研究体制のもと系統的 NMR/NQR 実験に取り組んだ。

4. 研究成果

1. 高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{La}_x\text{CuO}_{6+\delta}$ 単結晶の超強磁場 NMR による研究；米国立強磁場研究所において超強磁場下 (45T) NMR 実験を行い、磁場によって超伝導を破壊することに成功し、絶対零度における高温超伝導の背景電子状態「擬ギャップ基底状態」を初めて同定した [雑誌論文 4]。図 1 に、定常

磁場下 44 T で得られた Cu-NMR ナイトシフトの温度依存性を示す。

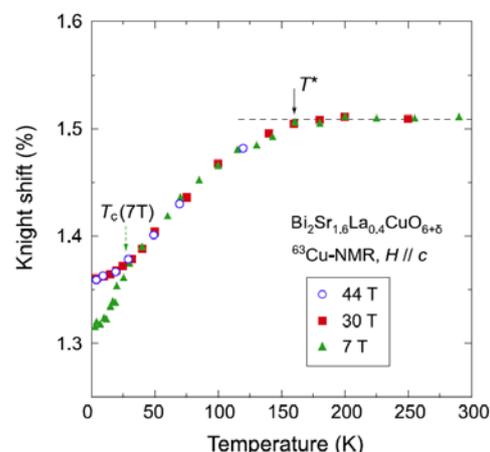


図 1. 強磁場 NMR 実験で得られたナイトシフトの温度依存性 [雑誌論文 4]。

さらに、マサチューセッツ工科大学 X. G. Wen 教授との共同研究で、理論的観点から、図 1 で得られた擬ギャップ基底状態が、今までにない量子スピン液体状態であることを提唱した [雑誌論文 2]。これらの成果は、岡山大学で開催された超伝導に関する国際シンポジウムの依頼講演 [学会発表 1]、および日本物理学会 2011 年秋季大会領域 8 シンポジウムの招待講演に選ばれた [学会発表 3]。

2. 鉄系高温超伝導体の磁性と超伝導に関する研究；2008 年に東京工業大学細野グループによって発見された電子ドープ型 $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ 超伝導体の電子相図に注目した NQR 実験を行った。系統的 As-NQR スピン格子緩和時間 (T_1) 測定の結果から、 $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ の反強磁性と超伝導の電子相図が銅酸化物高温超伝導体と類似したものであり、銅酸化物同様、反強磁性スピン揺らぎが鉄系高温超伝導発現に重要な役割を果たしていることを明らかにした [雑誌論文 3]。

図 2 に、本研究から得られた As-NQR 測定から見積もられた反強磁性スピン揺らぎ

の強さを示すパラメータ (θ) と超伝導の相図を示す。適度なスピン揺らぎが超伝導転移温度 T_c を最適化していることがわかる。

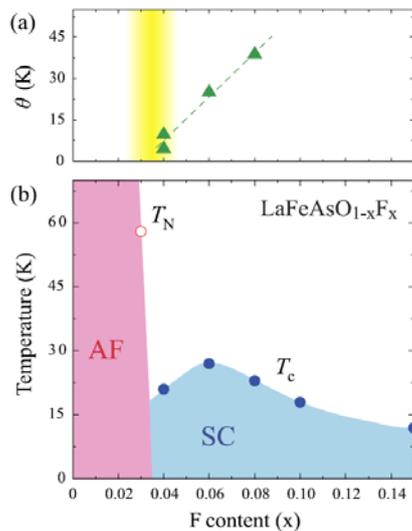


図 2. 鉄ヒ化物超伝導体の電子相図[雑誌論文 3]。横軸は電子ドーピング量。

5. 主な発表論文等

(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 12 件)

- ① 川崎慎司 他 6 名、The Mott State and Superconductivity in Face-Centred Cubic Structured Cs_3C_{60} : A ^{133}Cs -Nuclear Magnetic Resonance Study under Pressure, J. Phys. Soc. Jpn, 査読有、Vol. 82、2013、014709 (6pages)、DOI: 10.7566/JPSJ.82.014709
- ② Jia-Wai Mei、川崎慎司、他 3 名、Luttinger-volume violating Fermi liquid in the pseudogap phase of the cuprate superconductors, Phys. Rev. B, 査読有、Vol. 85、2012、134519-1-134519-7、DOI: 10.1103/PhysRevB.85.134519
- ③ 岡利英、川崎慎司、他 3 名、Antiferromagnetic Spin Fluctuations above the Dome-Shaped and Full-Gap Superconducting States of $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$

Revealed by ^{75}As -Nuclear Quadrupole Resonance, Phys. Rev. Lett., 査読有、Vol. 108、2012、047001-1-047001-5、DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.047001

- ④ 川崎慎司、他 5 名、Carrier-Concentration Dependence of the Pseudogap Ground State of Superconducting $\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{La}_x\text{CuO}_{6+\delta}$ Revealed by $^{63,65}\text{Cu}$ -Nuclear Magnetic Resonance in Very High Magnetic Fields, Phys. Rev. Lett., 査読有、Vol. 105、2010、137002-1-137002-4、DOI: 10.1103/PhysRevLett.105.137002
- ⑤ 川崎慎司、他 4 名、Pressure-induced unconventional superconductivity near a quantum critical point in CaFe_2As_2 , Supercond. Sci. Technol., 査読有、Vol. 23、2010、054004 (5pages)、DOI: 10.1088/0953-2048/23/5/054004

[学会発表] (計 28 件)

- ① 川崎慎司、NMR/NQR study of high- T_c cuprate and iron pnictide、International Symposium on Physics and Chemistry of Novel Superconductors and Related Materials, October 2, 2012, Okayama University
- ② 川崎慎司、量子臨界点由来の新奇超伝導相の核磁気共鳴法による研究、領域 6, 8 合同シンポジウム「奇周波数クーパー対の物理」日本物理学会第 67 回年次大会、2012 年 3 月 2 5 日、関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス
- ③ 川崎慎司、擬ギャップの基底状態とそのドーピング依存性：超強磁場下 NMR、領域 8 シンポジウム「高温超伝導体研究の最近の進展：波数空間と実空間プローブから探る擬ギャップと超伝導ギャップの関係」日本物理学会 2011 年秋季大会、2011 年 9 月 23 日、富山大学五福キャンパス

④ 川崎慎司、他 4 名、Cu-NMR Study of $\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{La}_x\text{CuO}_{6+\delta}$ Superconductor in Very High Magnetic Fields、26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26)、Aug 12, 2011、中国北京市

⑤ 川崎慎司、他 5 名、 CaFe_2As_2 の圧力下 As-NMR/NQRによる研究、日本物理学会 2010 年秋季大会、2010 年 9 月 24 日、大阪府立大学中百舌鳥キャンパス

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

雑誌論文④に関しては、岡山大学広報を通じて、平成 22 年 9 月 30 日に記者発表を行った。その結果、山陽新聞朝刊(平成 22 年 10 月 1 日付)、日経産業新聞(平成 22 年 10 月 3 日付)、科学新聞 1 面(平成 22 年 10 月 8 日付)に記事が掲載された。また、共同通信社を通じて記事が全国に配信された。同時に山陽放送 (RSK) の夕方(平成 22 年 10 月 1 日)のニュースや NHK 岡山放送局の朝のニュース(平成 22 年 11 月 8 日)でもニュース動画が放映されるなど、大きく取り上げられた。

また、雑誌論文③に関しては、平成 24 年 1 月 12 日に記者発表を行った結果、山陽新聞朝刊(平成 24 年 1 月 17 日付)および日経産業新聞(平成 24 年 1 月 17 日付)に掲載された。

ホームページ等

http://www.physics.okayama-u.ac.jp/zheng_homepage/

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川崎 慎司 (KAWASAKI SHINJI)

岡山大学・大学院自然科学研究科・講師

研究者番号：80397645

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

鄭 国慶 (GUO-QING ZHENG)

岡山大学・大学院自然科学研究科・教授

研究者番号：50231444