

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 4 月 28 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400374

研究課題名(和文)電子相関背景超伝導と新奇量子相の極限環境下核磁気共鳴法による研究

研究課題名(英文) NMR study on unconventional superconductivity and novel quantum phenomena in strongly correlated electron systems under extreme condition

研究代表者

川崎 慎司 (Kawasaki, Shinji)

岡山大学・自然科学研究科・准教授

研究者番号：80397645

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：(1) 鉄系高温超伝導体Sr₂VFeAsO₃の反強磁性と超伝導の圧力相図を高圧NMR実験によって初めて明らかにした。(2) 鉄系超伝導関連物質SrPt₂As₂において、複数の電荷密度波(CDW)秩序と超伝導の共存を明らかにした。(3) 重い電子系反強磁性超伝導体CeRhIrIn₅の低温高圧下NQRおよび高圧下電気抵抗測定を行い、反強磁性量子臨界点と非従来型超伝導の圧力相図を明らかにした。(4) 鉄系超伝導体Ca_{1-x}LaxFeAs₂のNMR実験を行い、高電子ドーピングによって増強する反強磁性秩序と高温超伝導の共存を発見した。(5) 銅酸化物高温超伝導体において、新たな電荷秩序相を発見した。

研究成果の概要(英文)：(1) NMR study of Sr₂VFeAsO₃ under high pressure; In iron based high temperature superconductor Sr₂VFeAsO₃, we found an antiferromagnetic order above T_c and obtained novel pressure-temperature phase diagram of superconductivity and antiferromagnetism. (2) High temperature NMR study in SrPt₂As₂ superconductor; We found multiple charge density wave orders in SrPt₂As₂, which coexist with superconductivity by NMR measurement up to 600K. (3) High pressure NQR and resistivity measurements on CeRhIrIn₅; We found that a unconventional superconducting state is induced near the antiferromagnetic quantum critical point in CeRhIrIn₅. (4) NMR study in Ce_{1-x}LaxFeAs₂; We found electron doping enhanced antiferromagnetism and its coexistence with high temperature superconductivity in Ce_{1-x}LaxFeAs₂. (5) High field NMR study in high T_c cuprate; By applying high magnetic field up to 45T, we found a CDW order is induced after suppressing superconductivity in underdoped cuprate.

研究分野：低温物性物理学

キーワード：強相関電子系 超伝導 核磁気共鳴 強磁場 高圧

1. 研究開始当初の背景

1979年の重い電子超伝導体CeCu₂Si₂の発見から1986年の銅酸化物高温超伝導発見を経て現在まで、反強磁性相近傍で発現する非従来型超伝導は、室温超伝導実現の舞台として期待され固体物理の中心的研究テーマであり続けている。その発現機構は、電子格子相互作用によるBCS機構と異なり、磁性と関連の深い強い電子相関に基づく引力相互作用が有力視されている。しかし、その発現機構は未だ明らかではなく、室温超伝導も実現していない。その大きな原因の一つに、これら非従来型超伝導物質の基底状態の電子相関が未解明であることが挙げられる。

2. 研究の目的

本研究は、磁性(強い電子相関)を由来とする新奇量子相や、その近傍で見られる非従来型超伝導発現機構を解明するために、強相関超伝導物質を研究対象に取り上げ、超伝導背景の反強磁性秩序や電荷秩序との関連を調べるために系統的な極限環境下の核磁気共鳴(NMR)/核四重極共鳴(NQR)実験に取り組む。

3. 研究の方法

研究方法は、単結晶試料を用いた角度分解NMR実験を主とする。単結晶における低温高圧下実験は、高圧セルと³He冷凍機とを組み合わせたものである。また、銅酸化物高温超伝導体については米国立強磁場研究所との共同研究で世界最強45T下でのNMR実験を行った。測定に用いる単結晶試料は、世界的評価の高い国内外の共同研究者から提供を受けている。

4. 研究成果

(1) 鉄系高温超伝導体Sr₂VFeAsO₃ ($T_c \sim 30$ K)の超伝導転移より高温の電子状態は不明であった。我々は、この物質のAs、V核のNMR実験を行い、高温でFeの電子を由来とする反強磁性秩序が生じていることを明らかにした。さらに高圧NMR実験を遂行し、この物質における

反強磁性秩序と超伝導の圧力相図を初めて明らかにした。[雑誌論文3]

(2) 鉄系超伝導関連物質SrPt₂As₂ ($T_c \sim 5$ K)において600K級高温NMR実験を遂行し、図1に示すように、NMRスペクトルの詳細な解析により、Ptを由来とする複数の電荷密度波(CDW)秩序($T_{CDW}^1=410$ K、 $T_{CDW}^2=255$ K)と超伝導の共存を初めて明らかにした。[雑誌論文2]

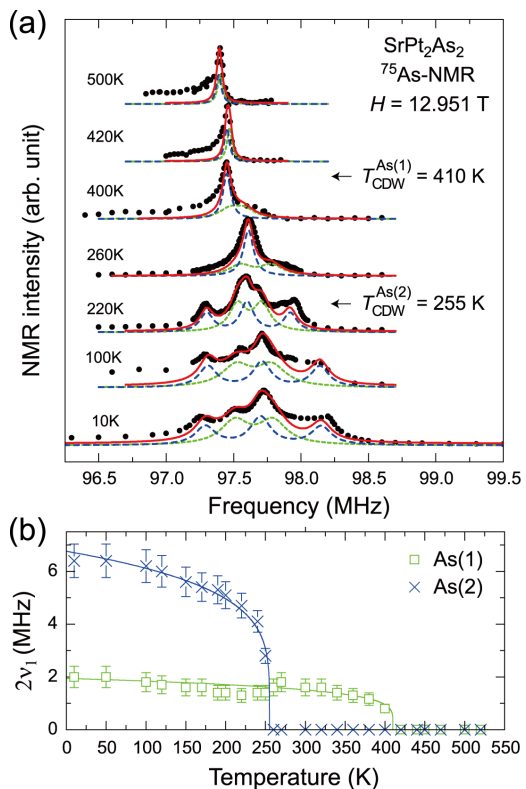


図1. (a)As-NMRスペクトルの温度変化。実線は、2つのCDW秩序を仮定したNMRスペクトル解析の結果。(b)解析によって得られたCDW秩序変数の温度変化。[雑誌論文2]

(3) 重い電子系反強磁性超伝導体CeRhIrIn₅の低温高圧下NQRおよび高圧下電気抵抗測定を行い、反強磁性量子臨界点と非従来型超伝導の圧力相図を明らかにした。

(4) 新規鉄系超伝導体Ca_{1-x}La_xFeAs₂のNMR実験を行い、これまでの鉄系超伝導体では電子ドーピングによって反強磁性が抑制され超伝導が発現すると考えられていたが、その常識に反して、高電子ドーピングによって増強する反強磁性

秩序 ($T_N \sim 70\text{K}$) と高温超伝導 ($T_c \sim 35\text{K}$) の共存を明らかにした。図 2 に得られた電子相図を示す。[雑誌論文1]

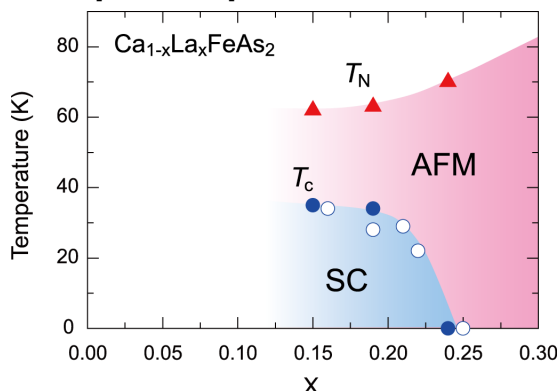


図 2 . 本研究で得られた $\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{FeAs}_2$ の電子相図 [雑誌論文1]。横軸は電子ドーピング量を示す。

(5) 銅酸化物高温超伝導体 Bi_2201 の不足ドーピング試料において、米国立強磁場研究所において世界最強磁場 45T 下の NMR 実験を行った結果、磁場によって超伝導を抑制することによって誘起される新たな電荷秩序相を発見した。

これらの成果は、いずれも本研究計画で目標としていた「強相関電子系超伝導の背景電子状態の解明」に資する新しい発見であり、今後の展開が大いに期待できる。特に銅酸化物における磁場誘起 CDW 相の発見は世界的インパクトも大きい。本研究成果が今後の強相関超伝導現象のさらなる理解に寄与できるものと考えている。

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 3 件)

S.Kawasaki, T.Mabuchi, S.Maeda, T.Adachi, T.Mizukami, K.Kudo, M.Nohara, G.-q.Zheng, Doping-enhanced antiferromagnetism in $\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{FeAs}_2$,

Physical Review B **92**, 180508(R) (2015). 査読有, DOI:

10.1103/PhysRevB.92.180508

S.Kawasaki, Y.Tani, T.Mabuchi, K.Kudo, Y.Nishikubo, D.Mitsuoka, M.Nohara, G.-q.Zheng, Coexistence of multiple charge density waves and superconductivity in SrPt_2As_2 revealed by ^{75}As -NMR/NQR and ^{195}Pt -NMR, Physical Review B **91**, 060510(R) (2015). 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevB.91.060510

K.Ueshima, F.Han, X.Zhu, H.-H.Wen, S.Kawasaki, G.-q.Zheng, Magnetism and superconductivity in $\text{Sr}_2\text{VFeAsO}_3$ revealed by ^{75}As - and ^{51}V -NMR under elevated pressure, Physical Review B **89**, 184506 (2014). 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevB.89.184506

[学会発表](計 14 件)

S.Kawasaki, Magnetic field induced CDW order in the $\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{La}_x\text{CuO}_{6+}$ superconductor revealed by Cu-NMR, The kick-off meeting of JSPS project "Development of international research network aiming for the realization of superconductive materials with high critical temperature", 2016 年 2 月 29 日、岡山大学

S.Kawasaki, Doping-enhanced antiferromagnetism in $\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{FeAs}_2$ revealed by ^{75}As nuclear magnetic resonance and nuclear quadrupole resonance, 第 25 回日本 MRS 年次大会国際シンポジウム「強相関機能材料の進展と挑戦」、2015 年 12 月 10 日、横浜情報文化センター

川崎慎司、銅酸化物高温超伝導体における磁場誘起電荷秩序と擬ギャップ状態、CMRCplus 研究会「量子ビームによる銅酸化物超伝導体研究の最前線」、2015 年 11 月 18 日、KEK つくばキャンパス・4 号館 1F セミナーホール

川崎慎司、銅酸化物高温超伝導体 Bi2201 における磁場誘起 CDW、金属材料研究所強磁場超伝導材料研究センター研究会「20 テスラ超強磁場 NMR による物性研究 2」、2015 年 11 月 11 日、東北大学金属材料研究所国際教育研究棟 2 階セミナー室

川崎慎司、他 7 名、砒化物超伝導体 SrPt₂As₂ における CDW と超伝導の NMR/NQR 法による研究、日本物理学会 2015 年秋季大会、2015 年 9 月 16 日、関西大学

川崎慎司、擬ギャップ基底状態の NMR による研究、高温超伝導フォーラム第 2 回会合、2014 年 3 月 26 日、上智大学

川崎慎司、銅酸化物高温超伝導体 Bi2201 の擬ギャップと超伝導、金属材料研究所強磁場超伝導材料研究センター研究会「20 テスラ超強磁場 NMR による物性研究」、2013 年 11 月 18 日 19 日、東北大学金属材料研究所 2 号館講堂

川崎慎司、核磁気共鳴(NMR)法を用いた最近の超伝導研究について-高温超伝導研究の現状-、2013 年度応用物理・物理系学会中国四国支部合同学術講演会、2013 年 7 月 28 日、香川大学

(2)研究分担者
()

研究者番号：

(3)連携研究者
鄭 国慶 (ZHENG, Guo-qing)
岡山大学・大学院自然科学研究科・教授
研究者番号：50231444

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・准教授

研究者番号：80397645