

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24年 4月 2日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2008～2011

課題番号：20244058

研究課題名（和文） 空間反転対称性の破れが生み出す新奇な超伝導の物理

研究課題名（英文） Novel Physics of non-centrosymmetric superconductors

研究代表者

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

研究成果の概要（和文）：

空間反転対称性の破れた超伝導体 $\text{Li}_2(\text{Pt}_{1-x}\text{Pd}_x)_3\text{B}$ を作製し、NMR測定により超伝導対称性が $x\sim 0.8$ を境に急激にスピン三重項状態に変わることを明らかにした。また、結晶構造の解析を行った結果、 $\text{Pt}(\text{Pd})\text{B}_6$ 八面体の歪みが $x>0.8$ では急激に増大することを見出した。この歪みの増大がスピン軌道相互作用を増大させた原因であり、スピン三重項混成の主原因であることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

We have grown polycrystal samples of non-centrosymmetric superconductors $\text{Li}_2(\text{Pt}_{1-x}\text{Pd}_x)_3\text{B}$ and studied the evolution of the superconducting state by NMR. We found that the superconducting state changes abruptly at $x\sim 0.8$. By analyzing the crystal structure, we found that the $\text{Pt}(\text{Pd})\text{B}_6$ tilts abruptly beyond $x\sim 0.8$, which enhances the spin-orbit coupling and is responsible for the change in the superconducting state properties. We have also studied other non-centrosymmetric superconductors such as $\text{Mg}_{10}\text{Ir}_{19}\text{B}_{16}$ and Re_7B_3 . The results also suggest that the local structure distortion is effective in enhancing the degree of inversion symmetry-breaking.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	5,600,000	1,680,000	7,280,000
2009年度	17,600,000	5,280,000	22,880,000
2010年度	6,500,000	1,950,000	8,450,000
2011年度	6,700,000	2,010,000	8,710,000
総計	36,400,000	10,920,000	47,320,000

研究分野：超伝導・低温

科研費の分科・細目：物理学・物性Ⅱ

キーワード：超伝導、磁気共鳴、空間反転対称性の破れ、スピン軌道相互作用

1. 研究開始当初の背景

対称性は自然界の基本原理に関わるもので、物理量の保存法則の背後には必ずある種の対称性が存在する。一方、自然界には「対称性の破れ」も遍在する。対称性の破れはしばし

ばまったく新しい物理現象をもたらす。物性物理の分野では、結晶の空間反転対称性の破れが生み出す新奇な超伝導の物理が注目を集めている。

2. 研究の目的

本研究は、結晶の空間反転対称性の破れが生み出す新奇な超伝導の物理を物質合成と核磁気共鳴 (NMR) を中心とする測定法により実験的に解明し、さらに新しい超伝導体の創製を目指すものである。当初の計画は下記に列挙するものであった。

(1) 空間反転対称性の破れた (NCS) 超伝導体 $\text{Li}_2(\text{Pt}_{1-x}\text{Pd}_x)_3\text{B}$ の作製、評価及び NMR 測定を行い、スピン軌道相互作用の変化と超伝導状態の変遷を明らかにする。

(2) NCS超伝導体 $\text{Mg}_{10}\text{Ir}_{19}\text{B}_{16}$ などにおいて、クーパー対の対称性を NMR 法によって調べ、 $\text{Li}_2(\text{Pd}, \text{Pt})_3\text{B}$ と比較することによって、空間反転対称性が破れた超伝導体の普遍的な法則を見出す。

(3) 上記の研究に基づき、新しい NCS 超伝導体を作製する指針を得る。

3. 研究の方法

本研究では空間反転対称性が破れた超伝導体試料をアーク熔解法と固相反応法によって作製した。また、超伝導を担う電子対の対称性を調べるために、核磁気共鳴法を用いた。さらに、結晶構造を調べるために、リートベルト法を用いた。

4. 研究成果

下記に得られた成果を列挙する。

(1) 空間反転対称性の破れた (NCS) 超伝導体 $\text{Li}_2(\text{Pt}_{1-x}\text{Pd}_x)_3\text{B}$ の作製、評価及び NMR 測定を行い、スピン軌道相互作用の変化と超伝導状態の変遷を明らかにした。 $\text{Li}_2\text{Pd}_3\text{B}$ は等方的なギャップをもつスピン一重項超伝導体であるが、 $\text{Li}_2\text{Pt}_3\text{B}$ は異方的なギャップをもつスピン三重項超伝導体である。両物質の間立った物性の違いが何に起因するかはわかっていなかった。本研究では $\text{Li}_2(\text{Pd}_{1-x}\text{Pt}_x)_3\text{B}$ 混晶試料を作製し、結晶パラメータなどを系統的に制御しながら超伝導対称性の移り変わりを

を NMR 法により精密に調べた。その結果、超伝導対称性が $x=0.8$ を境に急激に変わることが明らかになった。すなわち、 $x<0.8$ の領域ではスピン一重項で等方的なギャップをもつ状態が支配的で、 $x>0.8$ の領域ではスピン三重項で異方的なギャップをもつ状態が支配的であることを見出した。

その背後にある原因を究明するために、結晶構造の解析をリートベルト法により行った。その結果、 $\text{Pt}(\text{Pd})\text{B}_6$ 八面体の歪みが $x>0.8$ では急激に増大することを見出した。この歪みの増大がスピン軌道相互作用を増大させた原因であり、スピン三重項混成の主原因であることを明らかにした。

(2) $\text{Mg}_{10}\text{Ir}_{19}\text{B}_{16}$ や Re_7B_3 、 LaPtBi などの NCS 超伝導体を作製し、超伝導ギャップの対称性などを明らかにし、局所的な結晶のひずみがスピン軌道相互作用を増大させるのに有効であることを明らかにした。

これらの成果は空間反転対称性の破れた超伝導の物理に新しい知見を与えたものである。

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 20 件、すべて査読有)

① T. Oka, Z. Li, S. Kawasaki, G. F. Chen, N. L. Wang, and G.-Q. Zheng, 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. 108, 047001(1-5) (2012).

② D. C. Peets, G. Eguchi, M. Kriener, S. Harada, Sk. Md. Shamsuzzamen, Y. Inada, G.-Q. Zheng, and Y. Maeno: Magnetic phase diagram of $\text{Li}_2(\text{Pd}_{1-x}\text{Pt}_x)_3\text{B}$ by ac susceptometry. Phys. Rev. B **84**, 054521 (1-5) (2011).

- ③ Z. Li, D. L. Sun, C. T. Lin, Y. H. Su, J. P. Hu, and G.-Q. Zheng: Nodeless energy gaps of single-crystalline $\text{Ba}_{0.68}\text{K}_{0.32}\text{Fe}_2\text{As}_2$ as seen via ^{75}As NMR, *Phys. Rev. B* **83**, 140506(R) (1-4) (2011).
- ④ S. Kawasaki, T Tabuchi, X.F.Wang, X H Chen and G.-Q. Zheng: Pressure-induced unconventional superconductivity near a quantum critical point in CaFe_2As_2 . *Supercond. Sci. Technol.* **23**, 054004(1-5) (2010).
- ⑤ S. Harada, Y. Inada, G.-Q. Zheng, ^{11}B and ^{195}Pt NMR study of the superconductors $\text{Li}_2(\text{Pd}_{1-x}\text{Pt}_x)_3\text{B}$ without inversion symmetry, *Physica C* **470**, 1089–1091 (2010).
- S. Kawasaki, G.-Q. Zheng(他 3 名), Carrier concentration dependence of the pseudogap ground state of superconducting $\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{La}_x\text{CuO}_6$ revealed by $^{63,65}\text{Cu}$ nuclear magnetic resonance in very high magnetic fields, *Phys. Rev. Lett.* **105**, 137002(1-4) (2010).
- ⑥ Z. Li, M. Ichioka, G.-Q. Zheng(他 4 名), ^{75}As NQR and NMR Studies of Superconductivity and Electron Correlations in Iron Arsenide LiFeAs , *J. Phys. Soc. Jpn*, **79**, 083702(1-4) (2010).
- ⑦ K. Tahara, Z. Li, H. X. Yang, J. L. Luo, S. Kawasaki, and G.-Q. Zheng. Superconducting state in the noncentrosymmetric $\text{Mg}_{9.3}\text{Ir}_{19}\text{B}_{16.7}$ and $\text{Mg}_{10.5}\text{Ir}_{19}\text{B}_{17.1}$ revealed by NMR, *Phys. Rev. B* **80**, 060503(1-4) (2009).
- ⑧ K. Matano, M. Ichioka and G.-Q. Zheng (他 3 名), Anisotropic spin fluctuations and multiple superconducting gaps in hole-doped $\text{Ba}_{0.7}\text{K}_{0.3}\text{Fe}_2\text{As}_2$: NMR in a single crystal, *Europhys. Lett.* **87** (2009) 27012(1-5).
- [学会発表] (計 4 7 件)
- ① G.-Q. Zheng, “Non-centrosymmetric compounds as possible candidates for

- topological superconductors”, Kavli International Workshop on "Topological Insulator and Topological Superconductor", Beijing, China, Aug. 24, 2011.
- ② “Spin-orbit coupling, anisotropic magnetic fluctuations, and fully-gapped superconducting state in the iron-pnictides”, The 26th international conference on low temperature physics (LT26), Beijing, China, Aug.10-17, 2011.
- ③ G.-Q. Zheng, “Novel superconducting state due to broken inversion symmetry in $\text{Li}_2(\text{Pd}_{1-x}\text{Pt}_x)_3\text{B}$ and $\text{Mg}_{10-x}\text{Ir}_{19}\text{B}_{16+x}$ revealed by NMR”, International Symposium on Novel Spin Pairing 2009 (NSP2009), Kyoto, Japan, September 13-16, 2009. (招待講演)
- ④ G.-Q. Zheng, “NMR studies on non-centrosymmetric superconductors $\text{Li}_2(\text{Pt},\text{Pd})_3\text{B}$ ”, 9th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity, Tokyo, Japan, September 7-12, 2009. (招待講演)
- ⑤ S. Harada, Y. Inada, G.-Q. Zheng, ^{11}B & ^{195}Pt NMR study of the superconductor $\text{Li}_2(\text{Pd}_{1-x}\text{Pt}_x)_3\text{B}$ without inversion symmetry, 22nd International Symposium on Superconductivity, Nov. 2, 2009, Tsukuba, Japan
- ⑥ 澤岡浩貴,原田翔太,川島健司,秋光純,鄭国慶: 空間反転対称性が破れた超伝導体の NMRによる研究, 日本物理学会2010年秋季大会,大阪府立大学,2009年9月23-26日
- ⑦ 原田翔太,Sk.Md.Shamsuzzaman,稲田佳彦,鄭国慶: 空間反転対称性が破れた超伝導体 $\text{Li}_2(\text{Pd}_{1-x}\text{Pt}_x)_3\text{B}$ のNMRによる研究, 日本物理学会2010年秋季大会,大阪府立大学,2009年9月23-26日

〔図書〕（計1件）

- ① 鄭 国慶 他、朝倉書店、超伝導ハンドブック、2009、195-198

〔産業財産権〕

○出願状況（計 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

稲田 佳彦 (INADA YOSHIHIKO)
岡山大学・大学院教育学研究科・教授
研究者番号：80273572
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
市岡 優典 (ICHIOKA MASANORI)
岡山大学・大学院自然科学研究科・教授
研究者番号：90304295

(3) 連携研究者

櫻井 吉晴 (SAKURAI YOSHIHARU)
高輝度光科学研究センター・副主席研究員
研究者番号：90205815

○取得状況（計◇件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等
http://www.physics.okayama-u.ac.jp/zheng_homepage