

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H00657

研究課題名（和文）スピン三重項超伝導物理の開拓

研究課題名（英文）Physics of Spin-triplet superconductivity

研究代表者

鄭 国慶（Zheng, Guo-qing）

岡山大学・環境生命自然科学学域・教授

研究者番号：50231444

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 34,300,000円

研究成果の概要（和文）：（1）スピン三重項超伝導体 $Cu_xBi_2Se_3$ において、キャリア濃度や磁場によってベクトル秩序変数を制御することに成功した。特に、低磁場では六方晶面内の上部臨界磁場が2回対称性を示し、異方的なネマティック状態にあるが、高磁場では6回対称性を示すことを発見した。この結果は $Cu_xBi_2Se_3$ の秩序変数が2成分からなることを意味し、スピン対称性を明らかにしたNMRの結果と相補的である。また、 $Cu_xBi_2Se_3$ におけるスピン三重項超伝導の軌道波動関数が p_x の対称性を示すことを明らかにした。（2）強相関電子系 $K_2Cr_3As_3$ がスピン三重項超伝導体であることを明らかにし、多重超伝導相を示す証拠を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スピン三重項超伝導はまだ稀有な現象であり、その物理はなお開拓途上である。特に、スピン自由度に起因する物性が豊富であり、それに対する理解は今後の工業応用への展開にとって重要である。本研究で明らかにした磁場によるスピン三重項超伝導の可制御性や、軌道関数の解明及び多重相の発見は、その学術的な意義が大きく、また、量子計算への応用の基礎を成すものでもある。

研究成果の概要（英文）：We have succeeded in tuning the vector order parameter by carrier density and by magnetic fields in the spin-triplet superconductors $Cu_xBi_2Se_3$. In particular, the upper critical field shows a two-fold symmetry in the hexagonal plane at low fields, but is found to show a six-fold symmetry. This feature is a complementary proof of $Cu_xBi_2Se_3$ being a spin-triplet superconductor described by two-components order parameter. We also found that the orbital function possesses a p_x symmetry. In the strongly-correlated electron system $K_2Cr_3As_3$, we discovered the spin-triplet state, and obtained evidence for multiple superconducting phases.

研究分野：物性物理学

キーワード：スピン三重項超伝導 トポロジカル量子現象 核磁気共鳴

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

超伝導は際立った量子現象であるが、今までに発見された超伝導のほとんどは二つの電子がスピンを逆向きにして対(クーパー対)を作るスピン一重項状態である。二つの電子がスピンを平行にして対を作るスピン三重項超伝導体として考えられてきたのは Sr2RuO4 と UPt3 など極めて少数のものであった。これらの物質では、電子間に強い相互作用が働いていることが明らかにされ、電子同士の強相関が非従来型超伝導出現の必要条件と思われてきた。一方、応募者らは弱相関物質でもスピン三重項超伝導が実現することを発見しており、考えられていたよりも新奇超伝導が遍在的な現象であることを示した。しかし、スピン三重項の内部自由度に起因する特有な性質はまだ明らかになっていなかった。

2. 研究の目的

本研究は、CuxBi2Se3, K2Cr3As3 及び YPtBi の三つの物質群を対象として、スピン三重項超伝導の物理及びスピン軌道相互作用と電子相関との協奏が生み出す新奇な物性を開拓することを目的とした。

3. 研究の方法

- (1) CuxBi2Se3 及び K2Cr3As3 単結晶を作製する。
- (2) 詳細な ⁷⁵As-NMR 測定を行い、K2Cr3As3 結晶の各方向のナイトシフト及びスピン格子緩和率の温度依存性を調べる。
- (3) CuxBi2Se3 において、⁷⁷Se-NMR や角度分解磁化率の測定により、ベクトル秩序変数の性質を明らかにし、それをピン止め(ある方向に固定)するメカニズムを明らかにし、その制御を試みる。
- (4) YPtBi において、⁹⁵Pt-NMR 測定により、スピン三重項あるいはそれを越えた擬スピン 3/2 による高次の対形成を検証する。

4. 研究成果

得られた主要な成果は以下の通りである。

- (1) A2Cr3As3 (A=Na, Na0.75K0.25, K) において核四重極共鳴の測定を行い、K2Cr3As3 が強磁性量子臨界点に近いことを明らかにした。また、Cr-As-Cr ボンド角を制御することによって、量子臨界点までの距離を制御できることを示した。

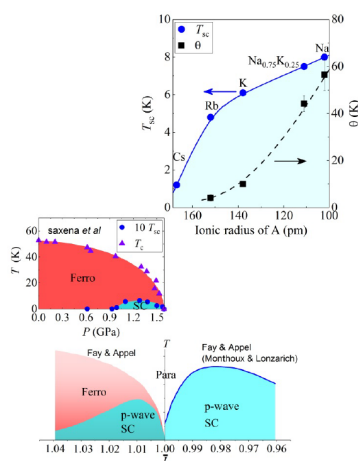


図 1: (上) A2Cr3As3 の電子相図。Tsc は超伝導転移温度。(中) UGe2 の強磁性秩序相と共存する超伝導。(下) 理論的に期待される強磁性と超伝導との関係

- (2) K2Cr3As3 において、As 核位置での電場勾配の主軸を核四重極共鳴実験及び第一原理の計算から明らかにした。この成果は、単結晶における核磁気共鳴法によるスピン三重

項超伝導の実証の基礎を成すものである。

- (3) K2Cr3As3単結晶において精密なナイトシフトの測定により、K2Cr3As3がスピン三重項超伝導体であることを見出し、この系がスピン三重項超伝導体としては最高の臨界温度6.5Kをもつことを明らかにした。また、1.2Tより低磁場では、スピン三重項超伝導を記述するベクトル秩序変数が結晶のc軸方向に向いていることを見出した。超伝導の軌道関数がヘリウム3のA相と同じくpx+ipyであり、K2Cr3As3がトポロジカル超伝導体であることを示した。さらに、より高磁場ではベクトル秩序変数が面内に回転し、多重超伝導相の存在を発見した。多重超伝導相はスピン三重項超伝導の特質の一つである。

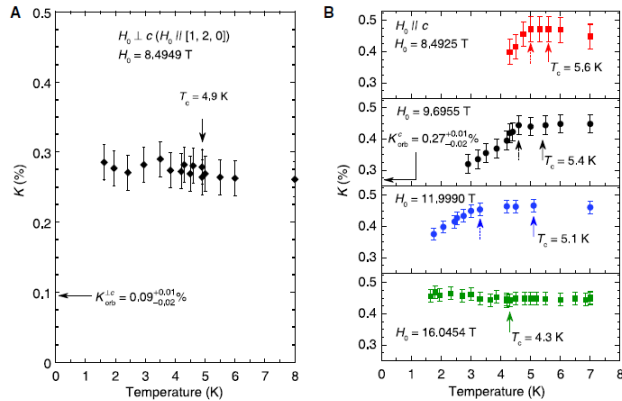


図2: K2Cr3As3の超伝導状態におけるナイトシフトの異方的な減少。

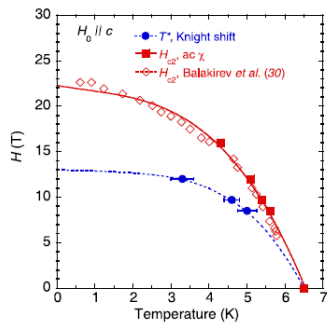


図3: K2Cr3As3の多重超伝導相。

- (4) K2Cr3As3の高品質単結晶を改良したフラックス法で作製した。核スピンと電子スピ間に働く超微細相互作用の決定に成功し、各結晶軸方向のスピン磁化率を項目(2)の研究とは独立な方法で求めた。その結果、正常状態ではスピン磁化率が等方的であることが判明した。この性質は超伝導状態におけるスピン磁化率の異方的な振る舞いをいっそう際立たせるものである。また、ナイトシフト及びスピン格子緩和率の温度依存性を測定した結果、多重超伝導相を示す証拠を新たに得た。K2Cr3As3の関連物質Cs2Cr3As3において、1K以下の低温まで磁化率測定を行い、この物質の本質的な超伝導転移が1.2Kで起こるが、磁場をc軸に平行にかけると、フィラメント的な超伝導が現れることを明らかにした。Cs2Cr3As3の物性解明はA2Cr3As3 (A=Na, K, Rb, Cs)家族の統合的な理解にとって重要である。
- (5) スピン三重項超伝導体CuxBi2Se3の物性をキャリア濃度による制御に成功し、多重超伝導相の存在を示唆する結果を得た。x<0.45のドーピング領域では、超伝導ギャップが異方的で、面内で2回対称性を示すが、x>0.45のドーピング領域では、超伝導ギャップが等方的になる。核磁気共鳴測定より、x>0.45の相が時間反転対称性の破れたカイラル超伝導相であることを示唆した。また、x<0.45のドーピング領域では、結晶の作製条件によっては、pxの対称性が実現したりpyの対称性が実現したりすることを明らかにした。

- (6) スピン三重項超伝導体 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ($x=0.15-27$) のベクトル秩序変数 (電子対液晶) の方向を外部磁場によって制御することに成功した。 $H=0.5$ T の低磁場では、上部臨界磁場 H_c2 が二回対称性を示し、その最大値の方向が結晶軸から数度ずれる。しかし、 $H=1.5$ T 以上の高磁場では、 H_c2 が6回対称性を示し、しかも最大値の方向が結晶軸に一致するようになることを発見した。この結果は元々結晶の特定方向にピン止めされていた電子対液晶が磁場によってピン止めが外され (ゼーマンエネルギーの利得をするために)、印加磁場の方向に追従するようになることを意味する。6回対称性は通常のBCS超伝導体 (一成分超伝導) では禁止されているので、この結果は $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ の秩序変数が2成分からなることを意味し、スピン対称性を明らかにしたNMRの結果と相補的である。また、高磁場における $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ のスピン三重項超伝導軌道波動関数が p_x の対称性を示すことを明らかにした。これは、この物質では、 p_x の対称性が本質的であることを意味する。 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ におけるスピン三重項超伝導の軌道波動関数を明らかにした意義は大きい。

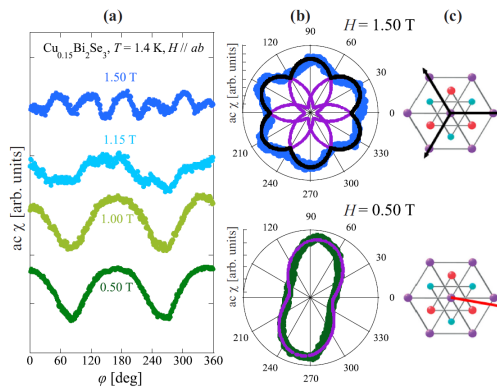


図4 : $\text{Cu}_{0.15}\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 超伝導体の磁場による制御。(a)各磁場下における反磁性。横軸は印加磁場と結晶軸との角度。(b)反磁性の角度依存性のポーラー・プロット。(c)ベクトル秩序変数の方向

- (7) 空間反転対称の破れたハーフホイスラー化合物 YPtBi において、反強磁性ゆらぎの存在を明らかにした。また、類似のキラル構造を有する5d電子超伝導体 TaRh_2B_2 においても反強磁性ゆらぎを観測した。5d電子系のようなバンド幅が広い物質では強い電子相関の出現は通常予想されないため、スピン軌道相互作用と電子相互作用との協奏を研究する新しい舞台として注目に値する。さらに、 YPtBi においてはスピン三重項超伝導成分が大きいことを見出した。

以上に加えて、スピン三重項超伝導とネマティック超伝導と関連の深い成果も得た。

- (1) 重い電子系 $\text{CeRh}_{0.5}\text{Ir}_{0.5}\text{In}_5$ において、奇周波数ギャップレス超伝導状態を発見した。このような新奇な超伝導状態はスピン三重項超伝導と深く関連するものである。
- (2) 銅酸化高温超伝導体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$ において、その常伝導状態が電子液晶的(ネマティック)な振る舞いをすることを発見した。このような新奇な電子状態の発見は $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ の超伝導状態 (ネマティック状態) の普遍性を理解するのに有益である。
- (3) ワイル半金属 TaAs において、巨大な軌道反磁性を見出し、低エネルギー励起を明らかにした。ワイル半金属はトポロジカルなエネルギーバンドを有し、スピン三重項超伝導の状態密度と類似点をもつ。その低エネルギー励起による核スピン格子緩和率が $\text{K}_2\text{Cr}_3\text{As}_3$ の超伝導状態と全く同じ温度依存性を示すことを発見した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件／うち国際共著 9件／うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Luo J., Yang J., Zhou R., Mu Q.G., Liu T., Ren Zhi-an, Yi C.J., Shi Y.G., Zheng Guo-qing	4. 巻 123
2. 論文標題 Tuning the Distance to a Possible Ferromagnetic Quantum Critical Point in A2Cr3As3	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 047001 (1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.123.047001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Kawai T., Wang C. G., Kandori Y., Honoki Y., Matano K., Kambe T., Zheng Guo-qing	4. 巻 11
2. 論文標題 Direction and symmetry transition of the vector order parameter in topological superconductors CuxBi2Se3	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 235 (1-7)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-019-14126-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Yang Jie, Luo Jun, Yi Changjiang, Shi Youguo, Zhou Yi, Zheng Guo-qing	4. 巻 7
2. 論文標題 Spin-triplet superconductivity in K2Cr3As3	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eabl4432 (1-8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.abl4432	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Matano Kazuaki, Ogura Ryo, Fountaine Mateo, Jeschke Harald O., Kawasaki Shinji, Zheng Guo-qing	4. 巻 104
2. 論文標題 Antiferromagnetic spin fluctuations and superconductivity in NbRh2B2 with a chiral crystal structure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 224508 (1-7)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.224508	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Luo Jun, Wang Chunguang, Wang Zhicheng, Guo Qi, Yang Ji, Zhou Rui, Matano K, Oguchi T, Ren Zhan, Cao Guanghan, Zheng Guo-Qing	4. 巻 29
2. 論文標題 NMR and NQR studies on transition-metal arsenide superconductors LaRu ₂ As ₂ , KCa ₂ Fe ₄ As ₄ F ₂ , and A ₂ Cr ₃ As ₃	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chinese Physics B	6. 最初と最後の頁 067402(1-8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1674-1056/ab892d	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kawasaki Shinji, Oka Toshihide, Sorime Akira, Kogame Yuji, Uemoto Kazuhiro, Matano Kazuaki, Guo Jing, Cai Shu, Sun Liling, Sarrao John L., Thompson Joe D., Zheng Guo-qing	4. 巻 3
2. 論文標題 Localized-to-itinerant transition preceding antiferromagnetic quantum critical point and gapless superconductivity in CeRh _{0.5} Ir _{0.5} In ₅	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Communications Physics	6. 最初と最後の頁 148(1-10)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42005-020-00418-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Wang Wen, Luo Jun, Wang ChunGuang, Yang Jie, Kodama Yasuharu, Zhou Rui, Zheng Guo-Qing	4. 巻 64
2. 論文標題 Microscopic evidence for the intra-unit-cell electronic nematicity inside the pseudogap phase in YBa ₂ Cu ₄ O ₈	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Science China Physics, Mechanics & Astronomy	6. 最初と最後の頁 237413(1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11433-020-1615-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Wang C. G., Honjo Yoshiaki, Zhao L. X., Chen G. F., Matano K., Zhou R., Zheng Guo-qing	4. 巻 101
2. 論文標題 Landau diamagnetism and Weyl-fermion excitations in TaAs revealed by NMR and NQR	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 241110(R) (1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.241110	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yasuaki Sera, Takahiro Ueda, Hiroto Adachi and Masanori Ichioka	4. 巻 12
2. 論文標題 Relation of Superconducting Pairing Symmetry and Non-Magnetic Impurity Effects in Vortex States	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Symmetry	6. 最初と最後の頁 175_1 - 19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/sym12010175	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yokoyama M., Nishigaki H., Ogawa S., Nita S., Shiokawa H., Matano K., Zheng Guo-qing	4. 巻 107
2. 論文標題 Manipulating the nematic director by magnetic fields in the spin-triplet superconducting state of $Cu_xBi_2Se_3$	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 L100505 (1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.107.L100505	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sumiyama Akihiko, Nagaeki Takumi, Yamaguchi Akira, Jia Ke, Yang Jie, Shi Youguo, Zheng Guo-qing	4. 巻 92
2. 論文標題 Superconducting Transition in Quasi-One-Dimensional Superconductor $Cs_2Cr_3As_3$ Probed by DC Magnetic Susceptibility	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 015001(1-3)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.92.015001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Ogawa Seigo, Miyoshi Tomoki, Matano Kazuaki, Kawasaki Shinji, Inada Yoshihiko, Zheng Guo-qing	4. 巻 92
2. 論文標題 Single Crystal Growth of and Hyperfine Couplings in the Spin-Triplet Superconductor $K_2Cr_3As_3$	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 064711 (1-5)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.92.064711	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Zhou Y.Z., Chen J., Li Z.X., Luo J., Yang J., Guo Y.F., Wang W.H., Zhou R., Zheng Guo-qing	4. 巻 130
2. 論文標題 Antiferromagnetic Spin Fluctuations and Unconventional Superconductivity in Topological Superconductor Candidate YPtBi Revealed by 195Pt-NMR	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 266002 (1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.130.266002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計24件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 小川晟吾, 三好智己, 俣野和明, 川崎慎司, 稲田佳彦, 鄭国慶
2. 発表標題 スピン三重項超伝導体K ₂ Cr ₃ As ₃ の純良単結晶育成とNMR
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 二田晴也, 小林映斗, 高柳颯太, 横山武蔵, 俣野和明, 石井賢司, 中尾裕則, 神戸高志, 鄭国慶
2. 発表標題 Cu _x Bi ₂ Se ₃ におけるスピン三重項ネマティック超伝導の放射光による研究
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Guo-qing Zheng
2. 発表標題 Tuning the nematic director in spin-triplet superconductors Cu _x Bi ₂ Se ₃ and K ₂ Cr ₃ As ₃
3. 学会等名 Conference of Condensed Matter Physics 2023 (CCMP 2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Guo-qing Zheng
2. 発表標題 High Temperature Spin-Triplet Superconductivity in K ₂ Cr ₃ As ₃
3. 学会等名 35th International Symposium on Superconductivity (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Guo-qing Zheng
2. 発表標題 Spin-Triplet Topological Superconductivity in strongly-correlated and spin-orbital coupled systems
3. 学会等名 29th International Conference on Low Temperature Physics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鄭国慶
2. 発表標題 spin-triplet topological superconductivity in K ₂ Cr ₃ As ₃
3. 学会等名 京都大学基礎物理学研究所研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鄭国慶
2. 発表標題 トポロジカル超伝導体CuxBi ₂ Se ₃ におけるネマチック状態ーカイラル状態転移
3. 学会等名 京都大学基礎物理学研究所研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川崎慎司, 岡利英, 反り目章, 小亀雄司, 上本和宏, 俣野和明, J. Guo, L.L.Sun, J.D.Thompson, J.L. Sarrao
2. 発表標題 重い電子系反強磁性超伝導体CeRh _{0.5} Ir _{0.5} In _{0.5} における局在・遍歴転移とギャップレス超伝導
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田翔伍, 川崎慎司, Chengtian Lin, 鄭国慶
2. 発表標題 銅酸化物高温超伝導体Bi ₂ Sr _{2-x} LaxCuO ₆ の一軸圧力下Cu-NMRによる研究
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 横山武蔵, 西垣颯, 俣野和明, 神戸高志, 鄭国慶
2. 発表標題 トポロジカル超伝導体CuxBi ₂ Se ₃ の作製と物性測定III
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Matano
2. 発表標題 NMR studies of topological superconductors
3. 学会等名 The 5th Conference on Condensed Matter Physics (CCMP2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Matano
2. 発表標題 NMR studies of topological superconductors
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2019(MRM2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Guo-qing Zheng
2. 発表標題 Topological superconductivity in correlated and non-correlated electron systems
3. 学会等名 Asia Pacific Workshop on Highlights of Condensed-Matter Physics (APW2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Guo-qing Zheng
2. 発表標題 topological spin-triplet superconducting states in bulk materials
3. 学会等名 Nature Conference on Emergence Materials and Device: Electronic Structures and Properties (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Kawasaki, D. Kamijima, M. Kitahashi, Z. Li, C. T. Lin, P. L. Kuhns, A. P. Reyes, and Guo-qing Zheng
2. 発表標題 Charge-density-wave order in single-layered Bi ₂ Sr _{2-x} LaxCuO ₆₊ superconductor
3. 学会等名 Spectroscopies in Novel Superconductors (SNS2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Matano, T. Kawai, C. G. Wang, Y. Kandori, Y. Honoki, T. Kambe, Guo-qing Zheng
2. 発表標題 Transition of the gap symmetry in topological superconductors $Cu_xBi_2Se_3$
3. 学会等名 International Conference on Topological Materials Science 2019 (TopoMat2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Kawasaki, T. Oka, A. Sorime, Y. Kogame, K. Uemoto, K. Matano, J. Guo, S. Cai, L. L. Sun, J. L. Sarrao, J. D. Thompson, and Guo-qing Zheng
2. 発表標題 Unconventional Gapless Superconductivity at the Quantum Critical Point in $CeRh_{0.5}Ir_{0.5}In_5$
3. 学会等名 International conference on strongly correlated electron systems 2019 (SCES2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryo Ogura, Mateo Fountaine, Kazuaki Matano, Shinji Kawasaki, Guo-qing Zheng
2. 発表標題 NMR studies of chiral noncentrosymmetric superconductor $TaRh_2B_2$
3. 学会等名 International conference on strongly correlated electron systems 2019 (SCES2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鄭国慶
2. 発表標題 $A_2Cr_3As_3$ における強磁性揺らぎと非従来型超伝導
3. 学会等名 京都大学基礎物理学研究所研究会「電子相関が生み出す超伝導現象の未解決問題と新しい潮流」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Guo-qing Zheng
2. 発表標題 Crystal-dependent d-vector direction and gap-symmetry transition in topological superconductors $Cu_xBi_2Se_3$
3. 学会等名 Spectroscopy on Novel Superconductors 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小亀雄司, 伊藤大河, 足立智樹, J. Yang, 川崎慎司, 鄭国慶
2. 発表標題 重い電子系反強磁性体 $Ce_3Pt_4In_{13}$ の低温高圧下 ^{115}In -NQR 法による研究
3. 学会等名 日本物理学会 2019 年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小椋亮, 俣野和明, 川崎慎司, 鄭国慶
2. 発表標題 空間反転対称性の破れた超伝導体 $TaRh_2B_2$ の NMR による研究
3. 学会等名 日本物理学会 2019 年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 神鳥吉史, 河合哲大, 厚朴優樹, 俣野和明, 神戸高志, 鄭国慶
2. 発表標題 $Cu_xBi_2Se_3$ 超伝導体の作製と物性測定 II
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小田向志, 市岡優典
2. 発表標題 超伝導体Sr2RuO4におけるスピン軌道相互作用を考慮したスピン分極
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 鄭国慶	4. 発行年 2021年
2. 出版社 岡山大学出版会	5. 総ページ数 205
3. 書名 超伝導を詩う	

〔産業財産権〕

〔その他〕

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

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	俣野 和明 (Matano Kazuaki) (70630945)	岡山大学・環境生命自然科学学域・助教 (15301)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	川崎 慎司 (Kawasaki Shinji) (80397645)	岡山大学・環境生命自然科学学域・准教授 (15301)	
研究分担者	市岡 優典 (Ichioka Masanori) (90304295)	岡山大学・異分野基礎科学研究所・教授 (15301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	Los Alamos National Laboratories			
中国	中国科学院物理研究所			