

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400373

研究課題名(和文)d電子系強結合・多バンド超伝導体のフェルミオロジーと超伝導相図

研究課題名(英文)Fermiology of d-electron multiband superconductors

研究代表者

寺嶋 太一 (TERASHIMA, Taichi)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・機能性材料研究拠点・主席研究員

研究者番号：40343834

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)：SrPt3Pについて量子振動測定を行いフェルミ面を観測した。観測したフェルミ面上の電子の有効質量をバンド計算と比較すると質量増強因子は0から0.9程度となった。既報の電子比熱係数よりのフェルミ面全体での平均値は約1と推定されるので、未観測のフェルミ面で強い電子格子相互作用が働いている可能性が明らかになった。

鉄系超伝導体FeSeの量子振動測定を行い、フェルミ面を決定した。観測されたフェルミ面は、バンド計算の予想と顕著に異なり、極めて小さい。キャリアー数は鉄1原子当たり0.01程度と推定されバンド計算の予想より一桁少ない。計算に考慮されていない電子相関の効果が重要であることを示す。

研究成果の概要(英文)：We performed quantum oscillation measurements on SrPt3P and observed part of the Fermi surface. The mass enhancement factors are between 0 and 0.9 for the observed orbits. On the other hand, the Sommerfeld coefficient reported previously suggests the enhancement factor averaged over the whole Fermi surface is approximately 1. This suggests that strong electron-phonon interactions exist on a part of the Fermi surface that is not yet observed.

We performed quantum oscillation measurements on FeSe and determined the Fermi surface. The determined Fermi surface significantly deviates from what band-structure calculations predict. The Fermi surface is anomalously small and the carrier number is approximately 0.01 per Fe, which is one order-of-magnitude smaller than predicted. This indicates that electron correlations that are not included in the calculations are important in determining the electronic structure of FeSe.

研究分野：固体物理学

キーワード：フェルミ面 量子振動 超伝導

1. 研究開始当初の背景

ドハースファンアルフェン(dHvA)振動などの量子振動測定によるフェルミオロジーは、バルクのフェルミ面を精密に決定できる極めて重要な手法である。さらに、振動強度の温度変化の観測から求められる電子の有効質量 m^* は、バンド質量 m_{band} と $m^*=m_{band}(1+\lambda)$ の関係で結ばれている。従って、量子振動測定は、電子間相互作用、電子格子相互作用等の多体効果の強さを(λ)をバンドごと(フェルミ面ごと)、あるいはフェルミ面の部位(オービット)ごとに明らかに出来る。本研究はこの手法を多バンドの超伝導体に適用するべく開始したものである。

2. 研究の目的

本研究では、d 電子系強結合・多バンド超伝導体の dHvA 測定を行い、フェルミ面、電子の有効質量を決定する。これにより、多体効果、電子相関効果のフェルミ面に対する影響を明らかにする。具体的には、通常のバンド計算からのフェルミ面の変形を明らかにする。また、多体効果による質量増強が特定のバンドだけで起きているのか、フェルミ面全体で一様に起きているのかを明らかにして、低エネルギーモードの存在や電子状態との関連を議論する。

3. 研究の方法

SrPt₃P などの多バンド強結合超伝導体や鉄系超伝導体について量子振動測定を行う。測定手法は、磁場変調法あるいはトルク法による dHvA 振動測定、磁気抵抗測定によるシュブニコフドハース(SdH)振動測定、あるいはトンネルダイオード発信器(TDO)による SdH 測定など、対象物質、測定セットアップに応じて適切な手法を用いる。磁場、温度領域は物質・材料研究機構の20テスラ超伝導磁石・希釈冷凍機から、米国国立強磁場研究所の45テスラハイブリッド磁石、ヘリウム3まで、必要に応じて用いる。

4. 研究成果

(1) SrPt₃P は Tc=8.4K の強結合超伝導体である。これまでの報告では低エネルギーフォノンの存在が示唆されている。バンド計算では二つのバンドがフェルミ面を構成する。バンド計算の電子状態密度と実測の電子比熱係数の比較では λ は約1と推定される。

まず初めに物質・材料研究機構の20テスラ超伝導磁石・希釈冷凍機を用いてマイクロカンチレバーによる磁気トルク法の dHvA 測定を行ったところ、3ヶの周波数ブランチが観測された。質量増強因子 λ は0-0.9と小さめで、観測されていないフェルミ面に強い電子格子相互作用が局在している可能性が明らかになった。

そこで、問題のフェルミ面を実際に観測するために、より高い磁場での測定を行った。具体的には、米国国立強磁場研究所の35テ

スラ水冷銅磁石でTDO法を、また45テスラハイブリッド磁石でトルク法を試みたが、新しい周波数は観測されなかった。

(2) 鉄系超伝導体 FeSe は Tc~8K の超伝導体である。室温では正方晶であるが Ts~110K で斜方晶に構造相転移する。多くの鉄系超伝導体母物質において類似の構造相転移は反強磁性秩序を伴うが、FeSe の場合低温まで常磁性である。それ故、鉄系超伝導の起源に電子の軌道とスピンのいずれが最も重要であるかについて考えるに当たり重要な系として興味を持たれている。

FeSe について常圧の SdH 測定を 35 テスラ希釈冷凍機温度まで行い、4本の周波数ブランチを観測した。これらはそれぞれ1本ずつの擬2次元電子面、ホール面に起因すると考えられる。観測されたフェルミ面は極めて小さく、キャリア数は鉄1原子あたり0.01ヶのオーダーであり、バンド計算の予想より一桁以上少ない。極めて単純な構造であるにもかかわらず、これほど顕著にバンド計算と実際のフェルミ面が異なることから、計算に考慮されていない電子間相関の効果が重要であることを示す。

フェルミ面が小さいためフェルミエネルギーEFも小さい、それに対する超伝導ギャップの比、 Δ/EF は大きい。このことは FeSe の超伝導を考えるに当たって重要な点である。

更に、高圧下の電気抵抗測定、交流磁化率測定を通じて 3GPa までの高圧相図を決定した。従来 μ SR より存在が指摘されていた高圧下での反強磁性秩序について、初めて対応する異常をバルク物性(電気抵抗)で確認することに成功した。得られた相図は構造相転移、反強磁性秩序、超伝導の3種類の相境界を含む複雑なものである。

(3) FeSe の異常なフェルミ面との比較のために、同一結晶構造の FeS について量子振動測定を開始した。これまでに 20 テスラ・希釈冷凍機によるトルク法 dHvA 測定を行い幾つかの量子振動を観測している。電子の有効質量は FeSe に比して小さく、電子相関効果も小さいものと思われる。今後更に測定を継続し、フェルミ面が通常のバンド計算で説明可能か明らかにする。

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 8 件)

- ① Bosen Wang, Kazuyuki Matsubayashi, Jinguang Cheng, Taichi Terashima, Kunihiro Kihou, Shigeyuki Ishida, Chul-Ho Lee, Akira Iyo, Hiroshi Eisaki, and Yoshiya Uwatoko, Absence of superconductivity in the collapsed tetragonal phase of KFe₂As₂ under

- hydrostatic pressure, Phys. Rev. B **94**, 020502(R) (2016) (5 pages), DOI: 10.1103/PhysRevB.94.020502、査読あり。
- ② Naoki Kikugawa, Taichi Terashima, Shinya Uji, Kaori Sugii, Yoshiteru Maeno, David Graf, Ryan Baumbach, and James Brooks, Superconducting subphase in the layered perovskite ruthenate Sr_2RuO_4 in a parallel magnetic field, Phys. Rev. B **93**, 184513 (2016) (6 pages), DOI: 10.1103/PhysRevB.93.184513、査読あり。
- ③ Taichi Terashima, Naoki Kikugawa, Shigeru Kasahara, Tatsuya Watashige, Yuji Matsuda, Takasada Shibauchi, and Shinya Uji, Magnetotransport study of the pressure-induced antiferromagnetic phase in FeSe, Phys. Rev. B **93**, 180503(R)-1 - 6 (2016), DOI: 10.1103/PhysRevB.93.180503、査読あり。
- ④ Taichi Terashima, Naoki Kikugawa, Andhika Kiswandhi, David Graf, Eun-Sang Choi, James S. Brooks, Shigeru Kasahara, Tatsuya Watashige, Yuji Matsuda, Takasada Shibauchi, Thomas Wolf, Anna E. Böhrer, Frédéric Hardy, Christoph Meingast, Hilbert v. Löhneysen, and Shinya Uji, Fermi surface reconstruction in FeSe under high pressure, Phys. Rev. B **93**, 094505-1 - 10 (2016), DOI: 10.1103/PhysRevB.93.094505、査読あり。
- ⑤ Taichi Terashima, Naoki Kikugawa, Shigeru Kasahara, Tatsuya Watashige, Takasada Shibauchi, Yuji Matsuda, Thomas Wolf, Anna E. Böhrer, Frédéric Hardy, Christoph Meingast, Hilbert v. Löhneysen, and Shinya Uji, Pressure-Induced Antiferromagnetic Transition and Phase Diagram in FeSe, J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 063701-1 - 4 (2015), <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.84.063701>、査読あり。
- ⑥ Shigeru Kasahara, Tatsuya Watashige, Tetsuo Hanaguri, Yuhki Kohsaka, Takuya Yamashita, Yusuke Shimoyama, Yuta Mizukami, Ryota Endo, Hiroaki Ikeda, Kazushi Aoyama, Taichi Terashima, Shinya Uji, Thomas Wolf, Hilbert von Löhneysen, Takasada Shibauchi, and Yuji Matsuda, Field-induced superconducting phase of FeSe in the BCS-BEC cross-over, Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A. **111**, 16309-16313 (2014), <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1413477111>、査読あり。
- ⑦ Taichi Terashima, Naoki Kikugawa, Andhika Kiswandhi, Eun-Sang Choi, James S. Brooks, Shigeru Kasahara, Tatsuya Watashige, Hiroaki Ikeda, Takasada Shibauchi, Yuji Matsuda, Thomas Wolf, Anna E. Böhrer, Frédéric Hardy, Christoph Meingast, Hilbert v. Löhneysen, Michi-To Suzuki, Ryotaro Arita, and Shinya Uji, Anomalous Fermi surface in FeSe seen by Shubnikov-de Haas oscillation measurements, Phys. Rev. B **90**, 144517-1 - 6 (2014), DOI:10.1103/PhysRevB.90.144517、査読あり。
- ⑧ Taichi Terashima, Kunihiro Kihou, Kaori Sugii, Naoki Kikugawa, Takehiko Matsumoto, Shigeyuki Ishida, Chul-Ho Lee, Akira Iyo, Hiroshi Eisaki, and Shinya Uji, Two distinct superconducting states in KFe_2As_2 under high pressure, Phys. Rev. B **89**, 134520 (2014) [5 pages], DOI:10.1103/PhysRevB.89.134520、査読あり。
- [学会発表] (計 13 件)
- ① Taichi Terashima, FeSe under high pressure: phase diagram and electronic structure, Superstripes 2016, Ischia Italy, June 23-29 2016 (招待講演)。
- ② 寺嶋太一、圧力誘起相転移と電子構造 (シンポジウム FeSe のエキゾチック超伝導)、日本物理学会第71回年次大会、東北学院大学泉キャンパス(宮城県仙台市)、2016年3月19-22日(招待講演)。
- ③ 寺嶋太一、FeSe の高圧相図と電子状態、Workshop: CROSSroads of Users and J-PARC 第17回、いばらき量子ビーム研究センター(茨城県東海村)、2016年1月18-19日(招待講演)。
- ④ Taichi Terashima, High pressure phase diagram and electronic structure of FeSe, 20th ICM, Barcelona Spain, July 5-10 2015.
- ⑤ Taichi Terashima, Fermiology in iron-based superconductors via quantum oscillation measurements, Superstripes 2015, Ischia Italy, June 12-18 2015(招待講演)。
- ⑥ 寺嶋太一、良質高圧力に支えられた鉄系超伝導体の研究、日本高圧力学会、東大山上会館(東京都文京区)、2015年2月10日(招待講演)。
- ⑦ Taichi Terashima, Quantum oscillation studies of iron-based superconductors, International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES 14), Grenoble, France, July 7-11 2014(招待講演)。

演)。

[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]

ホームページ等

<http://www.nims.go.jp/research/group/qu-antum-transport/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

寺嶋 太一 (TERASHIMA, Taichi)

物質・材料研究機構・機能性材料研究拠点・主席研究員

研究者番号：40343834

(2) 研究分担者 (該当無し)

(3) 連携研究者 (該当無し)

(4) 研究協力者

菊川 直樹 (KIKUGAWA, Naoki)