

令和元年6月6日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2017～2018

課題番号：17H06602

研究課題名（和文）局在多極子と伝導電子の混成による新奇量子相および量子臨界現象の研究

研究課題名（英文）Experimental study of the new quantum phases and quantum criticalities for hybridized multipole

研究代表者

酒井 明人 (Akito, Sakai)

東京大学・物性研究所・助教

研究者番号：10806087

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：電子相関の強い多極子系において新規量子物性を探索することを目的として本研究を行った。その結果、PrV₂Al₂₀において磁気八極子秩序が実現していることがわかった。またCo₂MnGaにおいて量子リフシツ転移による室温巨大異常ネルンスト効果を発見した。これらの成果は論文にまとめられ、国内外の会議でも講演を行なった本研究に関連して日本物理学会若手奨励賞も受賞した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スピンゆらぎによる超伝導や量子臨界現象の理解が進む一方、多極子による量子物性の理解はあまり進んでいない。本研究は混成する多極子による新しい量子状態の発見を示唆するものであり大きな学術的価値がある。室温での巨大異常ネルンスト効果を発見し、その発現機構を明らかにしたことは今後の熱電変換やスピントロニクスへの応用を期待させる。またワイル点の量子リフシツ転移が異常ネルンスト効果の対数的増大に寄与しており、学術的にも大変興味深い。

研究成果の概要（英文）：This project was performed to search for the new quantum phases and quantum criticalities in strong correlated multipole systems. As a result, we found PrV₂Al₂₀ exhibits ferro-octupole order at low temperatures. Moreover, we found Co₂MnGa shows the giant anomalous Nernst effect at room temperature due to the Lifshitz type of quantum criticality of the Weyl points. These results are summarized as the articles and presented in domestic and international conferences including several invited talks. Related to this work, I received the young scientist award from physical society of Japan.

研究分野：固体物理

キーワード：多極子 トポロジ 異常ネルンスト効果

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

強い電子相関を持つ系において、スピンの自由度は近藤効果や非従来型超伝導を始め様々な量子物性の起源となることが知られている。一方近年、電子のもつ多極子（電気四極子、磁気八極子など）自由度も異常物性の起源となりうることが理解され始めている。 $\text{PrTr}_2\text{Al}_{20}$ ($\text{Tr} = \text{Ti}, \text{V}$) はその代表例であり、立方晶結晶場中の Pr^{3+} の電気四極子と伝導電子の混成効果が様々な物性に影響を及ぼしている。また、単一原子サイトの多極子の概念を、複数サイトに拡張した「クラスター多極子」も提案され、その代表例である Mn_3Sn では反強磁性体であるにもかかわらず強磁性体に匹敵する巨大な異常ホール効果、異常ネルンスト効果が観測されている。このような多極子が関係する系において、新しい量子状態や量子臨界現象の発見を目指して本研究を行なった。

2. 研究の目的

(1) $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ の秩序パラメータの解明

$\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ はスピン自由度の無い Γ_3 結晶場基底状態を持ち、伝導電子と電気四極子の混成による非フェルミ液体や重い電子超伝導といった多極子の混成を示唆する現象を示し、大変注目を集めている。特に、ゼロ磁場 $T = 0.75\text{K}, 0.65\text{K}$ で多極子の2段転移を示すことがわかっているが、その秩序状態の詳細は理解されていない。そこで本研究では2段転移の秩序パラメータを明らかにすることを目的として研究を行なった。

(2) 巨大な非対角応答を示すトポロジカル磁性体の開発

Mn_3Sn は拡張八極子秩序と、ワイル点を作る波数空間の仮想磁場（ベリー曲率）のために巨大な非対角応答（異常ホール効果や異常ネルンスト効果）を示す。しかしこのようなワイル磁性体（時間反転対称性の破れたワイル半金属）の報告例はまだ少なく、理解が進んでいないのが現状である。そこで同様のワイル磁性体を作製し、輸送特性を調べることでさらに巨大な応答を調べることが目的として研究を行なった。

3. 研究の方法

(1) 多極子の転移は格子の伸縮に直接現れるため、秩序パラメータの決定に磁歪・熱膨張測定が非常に重要である。そこで希釈冷凍機を用いて極低温での熱膨張・磁歪測定を行なった。 $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ の単結晶試料は Al セルフフラックス法を用いて自ら合成を行なった。

(2) ホイスラー化合物はハーフメタルの候補として主にスピントロニクス分野などで古くから研究が進められてきたが、近年トポロジカルな電子構造を持つ物質として再注目されている。そこでホイスラー化合物の単結晶合成を行い、電気・熱輸送特性を測定することでワイル磁性体の探索を行なった。

4. 研究成果

(1) 図 1 a に $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ の熱膨張率の温度依存性を示す。多極子転移による2段転移が明確に観測されており、純度の高い試料であることがわかる。図 1b, c はそれぞれ転移温度付近 ($T = 0.6\text{K}$) と転移温度以下 ($T = 0.07\text{K}$) での磁歪の結果である。0.6 K では放物線状 ($\Delta L \propto B^2$) であるが、転移温度以下では $B < \sim 2\text{T}$ でヒステリシスを示す。このヒステリシスは線成分 ($\Delta L \propto B$) が存在することからきており、磁気八極子秩序が強的に秩序していると考えられると自然に理解できる。実際、GL 理論による解析(共同研究)によりこの実験結果は再現された[arXiv:1901.00012, submitted to Nature Communications]。以上の研究により $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ の2段転移は強磁気八極子秩序と反強四極子秩序によるものであるとわかった。

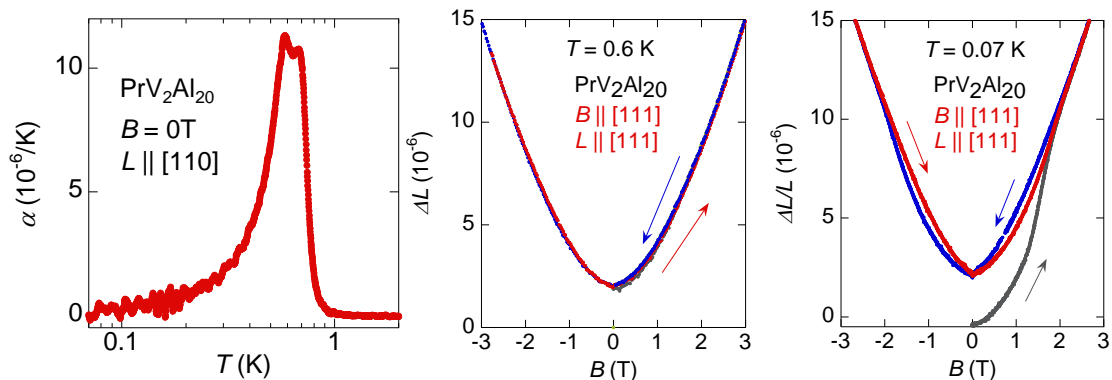


図1. $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ の(a)熱膨張、(b) $T = 0.6\text{K}$ 、(c) $T = 0.07\text{K}$ での磁歪

(2) 今回着目したのは立方晶フルホイスラー化合物 Co_2MnGa (図 2a) である。キュリー温度は $T_c \sim 694\text{K}$ であり室温以上の広い温度範囲で強磁性体である。図 2b に Co_2MnGa の室温での異常ネルンスト効果の磁場依存性を示す。約 $6\mu\text{V/K}$ という巨大な値を示すが、これは室温での過去最高値の10倍以上に匹敵する。温度を上げるとさらに上昇し、 100°C では約 $7\mu\text{V/K}$ まで上昇する(図 2c)。この巨大な異常ネルンスト効果の起源を探るため、共同研究により第一原理計算(以下数値計算)を行なった。図 3a は計算されたベリー曲率である。星印で示したところ

からベリール曲率が大きな領域が伸びており、実際にその場所に図 3b のようなワイル点があることがわかった。また数値計算から得られた熱電テンソルの横成分 (α_{xy}) は実験と非常によく一致する (図 3c)。 α_{xy}/T は低温でホール伝導率のフェルミ面でのエネルギー微分 ($\partial\sigma_{xy}/\partial E|_{E_F}$) に比例する一定値になることが知られており (モットの式)、図 3b の低温 ($< \sim 20\text{K}$) 以下の振る舞いはこれを反映している。一方高温では、実験・数値計算ともに α_{xy}/T が $-\ln T$ で上昇していく振る舞いが観測された。この対数発散の起源を探るため、ワイル点のモデル計算を共同研究により行なってみると、タイプ I ワイル点 (ディラックコーンの傾きが小さく、価電子バンドもしくは伝導バンドの一方のみがフェルミポケットを形成) からタイプ II ワイル点 (ディラックコーンの傾きが大きく、価電子バンドと伝導バンドの両方がフェルミポケットを形成) へ移り変わる量子リフシツ転移点で状態密度が発散し、それが起源になっていることがわかった。実際、数値計算で見つかったワイル点は図 2b のようにまさにタイプ I とタイプ II の間に位置する。実験でもワイル点の存在を裏付けるカイラル異常が観測され、ワイル点の量子リフシツ転移が巨大な異常ネルンスト効果の起源になっていることが明らかとなった。

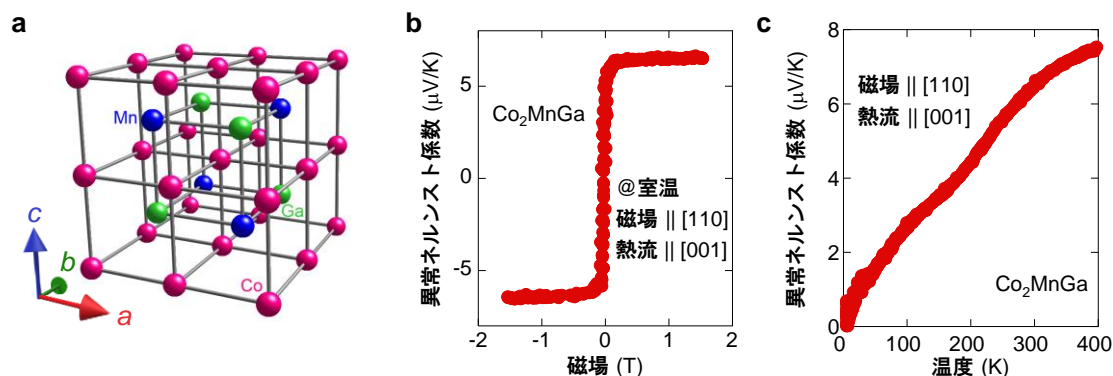


図2. Co_2MnGa の (a) 結晶構造、異常ネルンスト効果の (b) 室温での磁場依存性、(c) 温度依存性

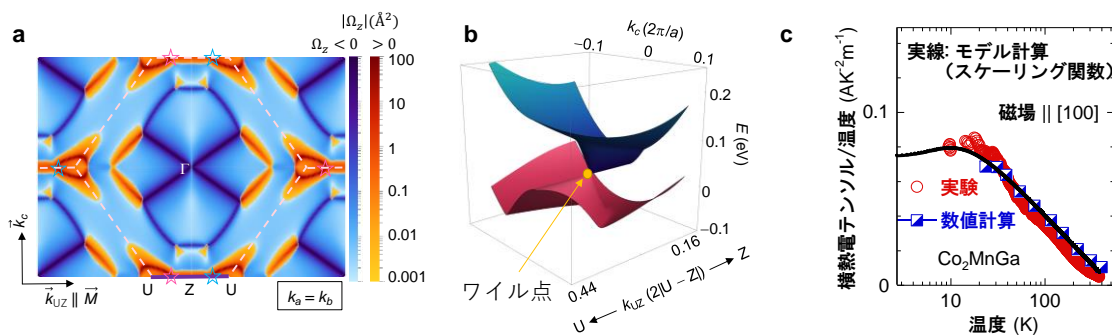


図3. Co_2MnGa の (a) ベリール曲率、(b) ワイル点、(c) α_{xy}/T の温度依存性

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- [accepted] “Giant anisotropic magnetoresistance due to purely orbital rearrangement in the quadrupolar heavy fermion superconductor $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ ”, Y. Shimura, Q. Zhang, B. Zeng, D. Rhodes, R. Schönemann, M. Tsujimoto, Y. Matsumoto, A. Sakai, T. Sakakibara, K. Araki, W. Zheng, Q. Zhou, L. Balicas, and S. Nakatsuji Phys. Rev. Lett. (2019). <https://journals.aps.org/prl/accepted/1507bY51F7b18057a94546453136fb54d2a22f2fe> 査読あり
- “Crystal Structure in Quadrupolar Kondo Candidate $\text{PrTr}_2\text{Al}_{20}$ (Tr = Ti and V)”, D. Okuyama, M. Tsujimoto, H. Sagayama, Y. Shimura, A. Sakai, A. Magata, S. Nakatsuji, T. J. Sato J. Phys. Soc. Jpn 88, 015001 (2018). <https://doi.org/10.7566/JPSJ.88.015001> 査読あり
- 酒井明人、中辻知、「磁石を使った新しい熱電変換！室温巨大異常ネルンスト効果の発見」, Academist Journal, 2018年10月9日 <https://academist-cf.com/journal/?p=8674> 査読なし
- 酒井明人、中辻知「量子効果で10倍以上の磁気熱電効果を室温で実現～新しい熱電変換、環境発電への応用へ期待」, クリーンエネルギー 28, No. 1 34-38 (2019) 査読なし
- “Giant anomalous Nernst effect and quantum critical scaling in a ferromagnetic semimetal”, Akito Sakai, Yo Pierre Mizuta, Agustinus Agung Nugroho, Rombang Sihombing, Takashi Koretsune, Michi-To Suzuki, Nayuta Takemori, Rieko Ishii, Daisuke Nishio-Hamane, Ryotaro Arita, Pallab Goswami and Satoru Nakatsuji Nature Physics 14, 1119–1124 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41567-018-0225-6> 査読あり

〔学会発表〕(計 11 件)

1. 酒井明人, 量子臨界点近傍における新しい物性開拓, 日本物理学会, 第 74 回年次大会, 九州大学伊都キャンパス, 2019/3/15, 国内, 招待講演
2. 酒井明人, ワイル強磁性体 Co_2MnGa における室温巨大異常ネルンスト効果, 日本物理学会 第 74 回年次大会, 九州大学伊都キャンパス, 2019/3/14, 国内, 招待講演
3. Akito Sakai, Giant anomalous Nernst effect at room temperature in Co_2MnGa , Topological Phases and Functionality of Correlated Electron Systems (TPFC) 2019, The University of Tokyo, Japan, 2019/2/19 国際, ポスター
4. Akito Sakai, "Multipolar order, non-Fermi liquid and heavy fermion superconductivity in the quadrupole Kondo lattice $\text{PrTr}_2\text{Al}_{10}$ ($\text{Tr} = \text{Ti}, \text{V}$)", Max Planck Institute for the Physics of Complex Systems, Dresden, German Frustration, Orbital Fluctuations, and Topology in Kondo Lattices and their relatives, 2018/7/27, 国際, 招待講演
5. A. Sakai, Y. Nagaoka, M. Tsujimoto, A. Magata, Y. Shimura, Y. Matsumoto and S. Nakatsuji, "Multipole order and non-Fermi liquid in quadrupole Kondo lattice $\text{PrV}_2\text{Al}_{10}$ ", J-Physics 平成 30 年度領域全体会議, 2018/5/24, 東北大学, ポスター
6. Akito Sakai, "Multipole ordering in $\text{PrV}_2\text{Al}_{10}$ studied by thermal expansion and magnetostriction", International Workshop: Novel Phenomena in Quantum Materials driven by Multipoles and Topology, 2018/4/9, 東大物性研, 口頭, 招待講演
7. 酒井明人, 永岡靖浩, 志村恭通, 中辻知, "四極子近藤格子系 $\text{PrV}_2\text{Al}_{10}$ の多極子秩序", 日本物理学会 73 回年次大会 (JPS 2018 annual meeting), 2018 年 3 月 22 日, 東京理科大野田キャンパス, 口頭
8. 酒井明人, 辻本真規, 松本洋介, 志村恭通, 富田崇弘, 中辻知, "四極子近藤格子系 $\text{PrTr}_2\text{Al}_{10}$ ($\text{Tr} = \text{Ti}, \text{V}$)における非フェルミ液体と重い電子超伝導", 11 回物性科学領域横断研究会 11th Joint Workshop of Scientific Research on Innovative Areas, 2017 年 11 月 17 日, 東大物性研, ポスター
9. 酒井明人, Heavy fermion superconductivity and non-Fermi liquid in the quadrupole Kondo lattice $\text{PrTr}_2\text{Al}_{10}$ ($\text{Tr} = \text{Ti}, \text{V}$), J-Physics 2017 : International Workshop on Multipole Physics and Related Phenomena, 2017 年 9 月 25 日, 八幡平ロイヤルホテル, ポスター
10. A. Sakai, Y. Matsumoto, Z. Tian, Y. Qiu and S. Nakatsuji, International Workshop on Quantum Spin Ice, 2017 年 6 月 7 日, Anomalous transport property in the nodal metallic spin ice $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$, Perimeter Institute, Waterloo, Canada, 口頭, 招待講演
11. 酒井明人, J-Physics トピカルミーティング 「局在多極子と伝導電子の相関による新現象」, 2017 年 4 月 17 日, $\text{Pr}_2\text{Al}_{10}$ ($\text{T} = \text{Ti}, \text{V}$)における 電気四極子の秩序と混成効果, 東大物性研究所, 口頭, 招待講演

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称: 熱電変換

発明者: 中辻知、酒井明人

権利者: 国立大学法人東京大学

種類:

番号: PCT/JP2017/528326

出願年: 2017/7//3

国内外の別: PCT

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

受賞: 酒井明人 第 13 回日本物理学会若手奨励賞(領域 8) 日本物理学会 九州大学(福岡) 2019/3/14 国内

6. 研究組織

(1) 研究分担者 該当なし

(2) 研究協力者 該当なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。