

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25287096

研究課題名(和文) 5d遷移金属酸化物の強いスピン軌道相互作用がもたらす強相関量子相に関する微視理論

研究課題名(英文) Strongly correlated quantum phases in 5d transition metal oxides with a strong spin-orbital coupling

研究代表者

柚木 清司 (YUNOKI, SEIJI)

国立研究開発法人理化学研究所・柚木計算物性物理研究室・准主任研究員

研究者番号：70532141

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,600,000円

研究成果の概要(和文)：近年、相対論的スピン軌道相互作用が強い遷移金属酸化物が注目を集めている。本研究では、スピン軌道相互作用と電子相関の競合・協奏の結果現れる新奇量子相の微視的理論研究を行った。特に、本研究では層状ペロブスカイト構造を持つ2次元物質でしかも局所d電子が5つ存在する系を中心に研究を行った。Jeff=1/2モット絶縁体へキャリアを注入することによりd波対称性を持つ非従来型超伝導が誘起されることを提案した点が最も重要な成果である。また、Sr2IrO4の絶縁体化機構の解明やスピン軌道相互作用によりJeff=1/2モット絶縁体が誘起されること等を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Recently, there have been increasing interests in transition metal oxides with the strong relativistic spin orbit interaction (SOI). This project is a microscopic theoretical study of new exotic quantum phases that emerges as a result of competition and/or corporation of the SOI and the electron correlations. In particular, this project focuses mostly on two dimensional materials with layered perovskite structure with the local electron configuration (t2g)5. The most important finding is that the d-wave superconductivity is induced once electrons is introduced into the Jeff=1/2 Mott insulator such as Sr2IrO4. The insulating mechanism of Sr2IrO4 and the SOI induced Jeff=1/2 Mott are also proposed.

研究分野：物性理論

キーワード：強相関電子系 スピン軌道相互作用

### 1. 研究開始当初の背景

近年、5d 遷移金属 Ir 酸化物における金属絶縁体転移や磁気軌道秩序化などの特異な量子物性が注目を集めている。例えば、層状ペロブスカイト構造 ( $K_2NiF_4$  構造) を持つ  $Sr_2IrO_4$  および  $Ba_2IrO_4$  (各 Ir の 5d  $t_{2g}$  軌道に 5 つの電子が占有) において、新しいタイプのモット絶縁体を示す実験結果が報告された [Kim *et al.*, Science **323**, 1329 ('09)]。これに関し、本研究代表者らは、世界に先駆けて  $Sr_2IrO_4$  の有効模型に対する理論計算を行い、5d 電子特有の強いスピン軌道相互作用 (SOI) によって、電子の内部自由度であるスピンと軌道角運動量が結合した有効角運動量  $J_{eff}=1/2$  モット絶縁体が、SOI が無い場合に比べて小さな電子間クーロン斥力で現れること (SOI 誘起モット絶縁体) を明らかにした [Watanabe *et al.*, PRL **105**, 216410 ('10)]。この絶縁体はスピンと軌道が絡み合ったモット絶縁体であり、銅酸化物高温超伝導体の母物質などで見られるスピン  $S=1/2$  モット絶縁体と対照的である (図 1 参照)。この結果は、5d 遷移金属酸化物においても電子相関が重要であることを示唆している。SOI が強い遷移金属化合物は、電子相関と SOI の競合・協奏により現れる新奇量子相の新たな研究対象として本研究開始当初から非常に注目を集めていた。

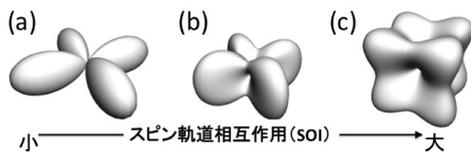


図 1: Ir の 5d  $t_{2g}$  軌道に 5 つの電子 (つまり一つのホール) がある場合に、(a) から (c) へと SOI を零から大きくすることにより実現するモット絶縁体の、各 Ir におけるホール密度分布。(a) が  $S=1/2$  モット絶縁体 ( $S_z=\pm 1/2$ ;  $d_{xy}$ ) に、(c) が  $J_{eff}=1/2$  モット絶縁体 ( $J_{eff}^z=\pm 1/2$ ) に対応する。

### 2. 研究の目的

本研究では、Ir 酸化物および関連物質において、強い SOI と電子相関が生み出す強相関量子物性を電子状態計算に基づき解明し、 $J_{eff}=1/2$  準粒子対超伝導などの新規量子相の提案を行う。具体的には、SOI 誘起モット絶縁体および競合する電子秩序相の解明、SOI 誘起モット絶縁体の励起スペクトルに見られる強相関効果の解析、SOI 誘起モット絶縁体へのキャリア注入による  $J_{eff}=1/2$  準粒子クーパー対超伝導の提案、SOI が強い遷移金属化合物におけるトポロジカル絶縁体物質設計等を行う。

### 3. 研究の方法

本研究対象である 5d 遷移金属 Ir 酸化物と

その関連物質では、SOI (0.4–0.8 eV)、電子間クーロン斥力 (1–3 eV)、および最近接 5d 軌道間ホッピング (0.3–0.5 eV) が全て同程度のエネルギースケール域にある。したがって、この系では、量子多体効果を正しく考慮した非摂動的な取扱いが必要となる。そこで本研究では、(a) 厳密対角化法 (ED)、(b) 密度行列繰り込み群法 (DMRG)、(c) 変分モンテカルロ法 (VMC)、(d) 自己エネルギー汎関数理論に基づく変分クラスター近似法 (VCA) (動的平均場理論を内包しそれを超える理論) などの計算物理学的手法を駆使して各課題を遂行する。また、バンド構造などの物質固有の特徴の定量的理解、有効模型導出、および新しい機能性物質設計のために VASP (<http://cms.mpi.univie.ac.at/vasp/>) や WIEN2k (<http://www.wien2k.at/>) を用いた第一原理バンド計算も行う。

### 4. 研究成果

(1)  $J_{eff}=1/2$  モット絶縁体へのキャリア注入により誘起された非従来型超伝導  $La_2CuO_4$  などの銅酸化物高温超伝導体の母物質との類似性 (表 1 参照) より、 $J_{eff}=1/2$  モット絶縁体である  $Sr_2IrO_4$  へキャリアを注入す

	$La_2CuO_4$	$Sr_2IrO_4$
crystal structure	$K_2NiF_4$ type	$K_2NiF_4$ type
# of holes	one hole per $d_{x^2-y^2}$	one hole per $J_{eff}=1/2$
magnetic order	AF ( $T_N=325K$ )	AF ( $T_N=230K$ )
magnetic exchange	$J_{ex}=125$ meV	$J_{ex}=50-100$ meV
ground state	$S=1/2$ Mott insulator	$J_{eff}=1/2$ Mott insulator

表 1:  $Sr_2IrO_4$  と  $La_2CuO_4$  の類似性のまとめ

ると、銅酸化物高温超伝導体と同様に、非従来型超伝導しかも超伝導転移温度が高い超伝導が出現するのではないかと期待できる。そこで我々は、 $Sr_2IrO_4$  の有効模型である 3 軌道ハバード模型の基底状態の性質を電子密度の関数として VMC 法を用いることによって調べた。その結果が図 2 に示してある。VMC 計算の結果、期待されたように d 波対称性を持つ  $J_{eff}=1/2$  準粒子対超伝導が現れることが分かった。さらに、超伝導状態は電子注入側のみで安定であることも分かった。電子・ホール非対称性は銅酸化物高温超伝導物質でも観測されているが、超伝導の出やすさは同酸化物高温超伝導物質の場合と逆である。これは、 $Sr_2IrO_4$  の有効模型である 3 軌道ハバード模型における電子間相互作用がゼロの極限において、フェルミ準位に最も近い  $J_{eff}=1/2$  バンドを考えれば理解できる。つまり、今の場合と銅酸化物高温超伝導体物質の

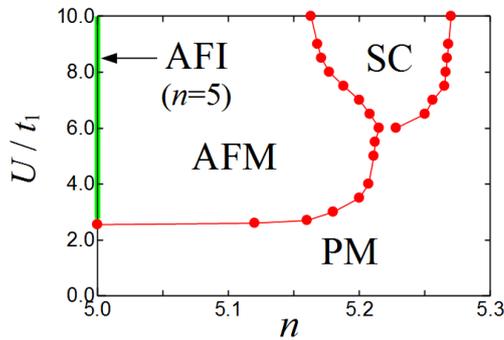


図 2: 基底状態相図。電子密度  $n=5$  がキャリア注入されていない  $\text{Sr}_2\text{IrO}_4$  に対応。AFI、PM、SC はそれぞれ反強磁性絶縁体、常磁性金属、超伝導状態。U、 $t_1$  はオンサイトクーロン斥力、最近接ホッピング。電子注入した場合のみ超伝導状態が出現する。

効 1 軌道模型を比べた場合、第二近接ホッピングが両者で逆であり、従って、電子・ホール非対称性が逆に現れたことが理解できる。[雑誌論文 ]

### (2) モット絶縁体 vs. スレータ絶縁体

5d 遷移金属酸化物では、5d 軌道の空間的広がりが大きいいためクーロン斥力はそれほど大きくないと期待される。したがって、一部の研究者の間では、 $\text{Sr}_2\text{IrO}_4$  がスレータ絶縁体の良い候補物質ではないかと考えられている。しかしながら、これは、 $\text{Sr}_2\text{IrO}_4$  に対する電気抵抗の温度依存性が、ネール温度以上でも絶縁体的でしかもネール温度で特異的な特徴を示さないことが観測されていることと矛盾する。そこで我々は、 $\text{Sr}_2\text{IrO}_4$  の絶縁体化の機構を有効模型である 3 軌道ハバード模型を VMC 計算により解析することで調べた。ここでの基本的なアイデアは、常磁性状態と反強磁性状態を記述する変分波動関数

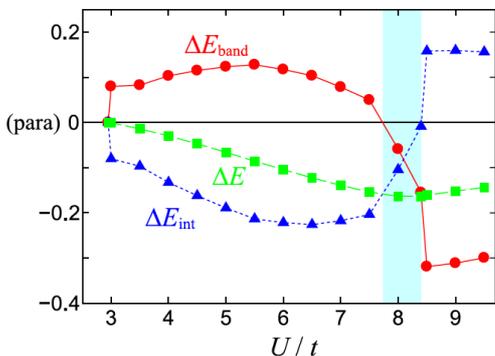


図 3: 反強磁性絶縁体状態のエネルギー利得をオンサイトクーロン斥力  $U$  の関数として調べた結果。E が反強磁性絶縁体の基底状態エネルギーを常磁性状態のエネルギーと比べたもの（負の E が反強磁性絶縁体が安定を意味）。 $E_{\text{band}}$  ( $\Delta E_{\text{int}}$ ) が運動（電子間相互作用）エネルギー利得を表す。 $\text{Sr}_2\text{IrO}_4$  は水色のハッチ領域に位置する。

を VMC 法によりそれぞれ最適化し、反強磁性絶縁体になる機構が運動エネルギー利得によるものか電子間相互作用エネルギー利得によるものかを明らかにすることである。反強磁性絶縁体が、運動エネルギー利得により安定化した場合はモット絶縁体、電子間相互作用エネルギー利得により安定化した場合はスレータ絶縁体である。図 3 にあるように、我々の計算結果から  $\text{Sr}_2\text{IrO}_4$  はちょうどスレータ絶縁体とモット絶縁体のクロスオーバー領域に位置することが分かった。[雑誌論文 ]

### (3) SOI 誘起 $J_{\text{eff}}=1/2$ モット絶縁体

$\text{Sr}_2\text{IrO}_4$  のように局所的に  $(t_{2g})^5$  の電子配置をもつ 3 軌道ハバード模型の低温での相図を明らかにするために動的平均場近似計算を行った。ここでは、クーロン相互作用のなかのフロント結合とペーアホッピング相互作用を近似なく取り扱うために、不純物ソルバートとして強結合展開による連続時間量子モンテカルル法を用いた。さらに、SOI が大きい場合あるいは低温で起こる負符号問題を解決するために、我々は、スピン・軌道が最大限エンタングルした局所基底を用いることを提案した。その結果、図 4 に示すように、 $t_{2g}$  軌道をそのまま用いた場合よりもはるかに負符号問題が改善されていることが分かる。

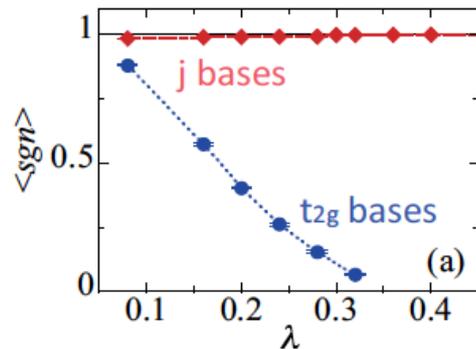


図 4: 3 軌道ハバード模型に対する動的平均場近似において連続時間量子モンテカルル法で得られたサンプリング重みのサイン。スピン・軌道が最大限エンタングルした局所基底 (j bases) と  $t_{2g}$  軌道をそのまま用いた場合の結果。U=8t、温度  $T=0.08t$  で SOI ( $\lambda$ ) を変えた場合。

得られた相図は図 5 に示してある。この図から明らかなように、SOI を増加することによって様々な相が現れることが分かる。 $J_{\text{eff}}=1/2$  反強磁性モット絶縁体の他に、 $J_{\text{eff}}=1/2$  と  $J_{\text{eff}}=3/2$  が混ざった反強磁性絶縁体 (MOAFI)、さらに SOI を弱くすると励起子絶縁体 (EXI) が現れることも分かる。また、先行研究から知られていたが、SOI がゼロの場合でクーロン相互作用が大きいとき軌道秩序絶縁体 (OOI) も現れる。

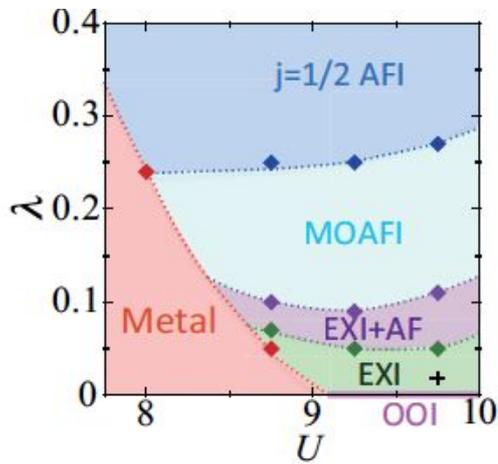


図 5: 動的平均場近似計算で得られた局所的に  $(t_{2g})^5$  の電子配置をもつ 3 軌道ハバード模型の低温での相図。

最後に、クーロン相互作用を  $U=8t$  に固定し SOI を増やしていった場合の状態密度 (DOS) の変化を図 6 に示す。ここで用いたパラメータの場合、SOI が  $0.3 \sim 0.31$  で金属から  $J_{\text{eff}}=1/2$  反強磁性モット絶縁体転移を起こす。実際に、図 6 にあるように、DOS のフェルミ準位のスペクトルがこの値の前後でゼロになり SOI が大きくなると一粒子励起にギャップが現れていることが分かる。つまり、この結果は SOI がモット絶縁体状態を誘起したことを意味している。[雑誌論文]

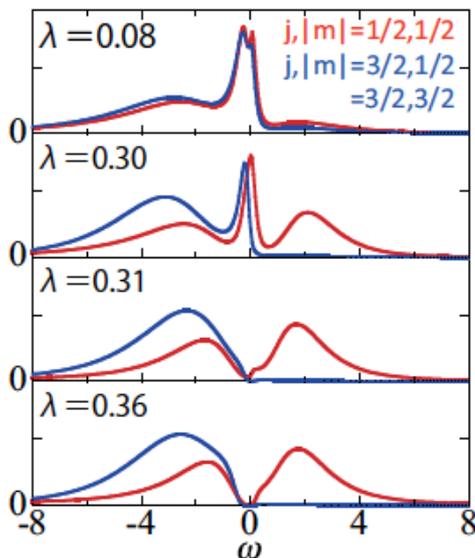


図 6: 状態密度の SOI( $\lambda$ ) 依存性。SOI が  $0.3 \sim 0.31$  で金属絶縁体転移が起こっていることが分かる。

#### (4) 機能性材料としての二次元遷移金属炭化物・窒化物: MXene

本研究では、VASP を用いた密度汎関数理論に基づく第一原理電子状態計算による新

機能性物質を提案することを目指して、二次元遷移金属炭化物・窒化物 (総じて MXene と呼ばれる) を中心に調べた。MXene ( $M_{n+1}X_n$ ) は MAX 相と呼ばれる  $M_{n+1}AX_n$  ( $M$ : 遷移金属,  $A$ : 13~16 族元素,  $X$ : C あるいは N,  $n=1-3$ ) からフッ化水素酸等を用いて  $A$  を剥離することにより作られる (図 7 参照)。MXene の表面は、フッ素、酸素、および OH により修飾されている。MXene は既にリチウムイオン電池や高容量コンデンサ等に用いられている。

まず、MXene の中で  $M_2CO_2$  ( $M=Mo, W$ ) および  $M_2M'C_2O_2$  ( $M'=Mo, W; M''=Ti, Zr, W$ ) が大きなバンドギャップ ( $\sim 0.2-0.5$  eV 程度) を持つ二次元トポロジカル絶縁体であることを第一原理電子状態計算により提案した。さらに、これらのトポロジカル絶縁体では、非自明なトポロジーを持つために本質的なバンド反転が d 軌道間で起こることが、その他のトポロジカル絶縁体と異なる点が一特徴であることを指摘した。

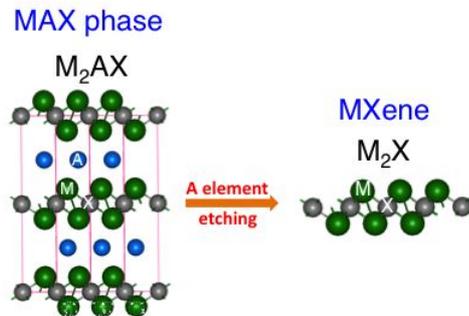


図 7: MAX 相  $M_{n+1}AX_n$  および MXene ( $M_{n+1}X_n$ ) の結晶構造。ここで、 $M$  は遷移金属、 $A$  は 13~16 族元素、 $X$  は C あるいは N。  $n=1$  の場合を示す。

さらに、多くの MXene においてほとんど自由な電子 (nearly free electrons, NFE) が存在することを示した。NFE とは、結晶中にもかかわらず電子のエネルギー分散が波数に対して放物線状で与えられる状態をさす。NFE は銅表面上に吸着した  $C_{60}$  や  $C_{60}F_6$  クラスタ表面で観測され、理論的にも、グラフェン、グラファンおよび  $MoS_2$  等の表面に現れると予想されている。本研究では、様々な MXene における NFE の存在の可能性を第一原理電子状態計算により明らかにした。NFE は、空間的には MXene の表面直上に位置しており、そのエネルギーは修飾原子層の違いにより明らかな違いがあることがわかった。図 8 に示すように、フッ素および酸素に修飾された MXene では、グラフェンや  $MoS_2$  の場合と同じように、NFE はフェルミ準位から  $3 \sim 6$  eV 上に現れる。そのため、NFE は電子が占有していない完全な空の状態である。それとは対照的に、OH で修飾された MXene では、NFE はフェルミ準位上に現れる。そのため、NFE 状態は電子により占

有されている。さらに、図 8 から明らかなように、中性表面物質あるいはフッ素や酸素の

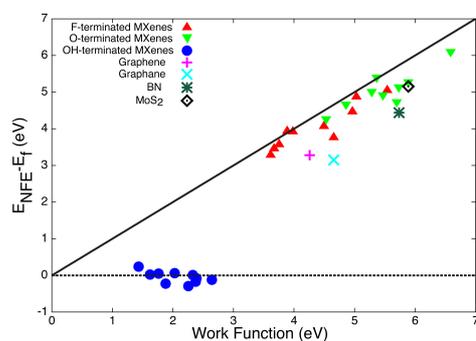


図 8 : 最低エネルギーを持つ NFE バンドのフェルミ準位 ( $E_f$ ) から位置と仕事関数。

ように電気陰性度が大きい陰性原子が表面に吸着している場合、NFE は仕事関数と同じエネルギー位置に現れている。一方、OH のような陽性原子が吸着している場合、NFE はフェルミ準位と同じ位置に現れている。このような場合の典型例として、 $\text{Hf}_2\text{C}(\text{OH})_2$  に対する電子輸送特性を調べた。その結果、 $\text{Hf}_2\text{C}(\text{OH})_2$  の NFE は理想的な伝導チャンネルとなることが分かった。したがって、これらの物質群はナノ電子デバイス等への応用が期待される。[雑誌論文]

## 5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 15 件) 全て査読あり

M. Khazaei, A. Ranjbar, M. Arai, T. Sasaki, and S. Yunoki, "Electronic properties and applications of MXenes: a theoretical review", *Journal of Materials Chemistry C* **5**, 2488-2503 (2017). DOI: 10.1039/C7TC00140A

B. H. Kim, T. Shirakawa, and S. Yunoki, "From a quasimolecular band insulator to a relativistic Mott insulator in  $t_{2g}^5$  systems with a honeycomb lattice structure", *Physical Review Letters* **117**, 187201/1-6 (2016). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.187201>

Q. Cui, J.-G. Cheng, W. Fan, A. E. Taylor, S. Calder, M. A. McGuire, J.-Q. Yan, D. Meyers, X. Li, Y. Q. Cai, Y. Y. Jiao, Y. Choi, D. Haskel, H. Gotou, Y. Uwatoko, J. Chakhalian, A. D. Christianson, S. Yunoki, J. B. Goodenough, and J.-S. Zhou, "Slater insulator in iridate perovskites with strong spin-orbit coupling", *Physical Review Letters* **117**, 176603/1-6 (2016). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.176603>

M. Khazaei, A. Ranjbar, M. Arai, and S. Yunoki, "Topological insulators in the ordered double transition metals  $M'_2M''C_2$

$\text{MXenes}$  ( $M'=Mo, W; M''=Ti, Zr, Hf$ )", *Physical Review B* **94**, 125152/1-9 (2016). DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.94.125152>

A. Yamasaki, H. Fujiwara, S. Tachibana, D. Iwasaki, Y. Higashino, C. Yoshimi, K. Nakagawa, Y. Nakatani, K. Yamagami, H. Aratani, O. Kirilmaz, M. Sing, R. Claessen, H. Watanabe, T. Shirakawa, S. Yunoki, A. Naitoh, K. Takase, J. Matsuno, H. Takagi, A. Sekiyama, and Y. Saitoh, "Three-dimensional electronic structures and the metal-insulator transition in Ruddlesden-Popper iridates", *Physical Review B* **94**, 115103/1-10 (2016). DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.94.115103>

K. Seki and S. Yunoki, "Brillouin-zone integration scheme for many-body density of states: Tetrahedron method combined with cluster perturbation theory", *Physical Review B* **93**, 245115/1-11 (2016). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.93.245115>  
M. Khazaei, A. Ranjbar, M. Ghorbani-Asl, M. Arai, T. Sasaki, Y. Liang, and S. Yunoki, "Nearly free electron states in MXenes", *Physical Review B* **93**, 205125/1-10 (2016). DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.93.205125>

H. Weng, A. Ranjbar, Y. Liang, Z. Song, M. Khazaei, S. Yunoki, M. Arai, Y. Kawazoe, Z. Fang, and X. Dai, "Large-gap two-dimensional topological insulator in oxygen functionalized MXene", *Physical Review B* **92**, 075436/1-7 (2015). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.92.075436>  
M. Khazaei, M. Arai, T. Sasaki, A. Ranjbar, Y. Liang, and S. Yunoki, "OH-terminated two-dimensional transition metal carbides and nitrides as ultralow work function materials", *Physical Review B* **92**, 075411/1-10 (2015). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.92.075411>

T. Sato, T. Shirakawa, and S. Yunoki, "Spin-orbit-induced exotic insulators in a three-orbital Hubbard model with  $(t_{2g})^5$  electrons", *Physical Review B* **91**, 125122/1-5 (2015). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.91.125122>

Z. Zhong, L. Si, Q. Zhang, W.-G. Yin, S. Yunoki, and K. Held, "Giant Switchable Rashba Effect in Oxide Heterostructures", *Advanced Materials Interfaces* **2**, 1400445/1-5 (2015). DOI: 10.1002/admi.201400445

渡部 洋, 白川 知功, 柚木 清司, 「5d 電子系イリジウム酸化物における新規な絶縁体と超伝導」*日本物理学会誌* **70**, p.31-35 (2015).<http://ci.nii.ac.jp/naid/110009900505>

H. Watanabe, T. Shirakawa, and S. Yunoki,

"Theoretical study of insulating mechanism in multi-orbital Hubbard models with a large spin-orbit coupling: Slater vs. Mott scenario in  $Sr_2IrO_4$ ", Physical Review B **89**, 165115/1-13 (2014). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.89.165115>

H. Watanabe, T. Shirakawa, and S. Yunoki, "Monte Carlo study of an unconventional superconducting phase in Iridium oxide  $J_{eff} = 1/2$  Mott insulators induced by carrier doping", Physical Review Letters **110**, 027002/1-5 (2013). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.110.027002>

Y. Sun, Z. Zhong, T. Shirakawa, C. Franchini, D. Li, Y. Li, S. Yunoki, and X.-Q. Chen, "Rocksalt SnS and SnSe: Native topological crystalline insulators", Physical Review B **88**, 235122/1-6 (2013). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.88.235122>

〔学会発表〕(計 10 件) 全て招待講演

S. Yunoki, "Exotic ground states of a multi-orbital Hubbard model with a strong spin-orbit coupling", International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES) 2017, July 17-21 (2017), Prague (Czech Republic).

S. Yunoki, "Relativistic Mott insulator, superconductivity, and other exotic states in transition metal oxides with a large spin-orbit coupling", Moscow International Symposium on Magnetism (MISM), July 1-5 (2017), Moscow (Russia).

S. Yunoki, "Microscopic model study of strongly correlated 5d transition metal Ir oxides", IUMRS 2016 Symposium Z "Materials Simulation, Computation and Design", October 21-24 (2016), Qingdao (China).

S. Yunoki, "Superconductivity and metal-insulator transition in 5d iridium oxides", The 10<sup>th</sup> Anniversary General Meeting of Asian Consortium on Computational Materials Science (ACCMS), November 1-3 (2015), Tohoku University, Sendai (Japan).

S. Yunoki, "Carrier doped Mott insulator in iridates", The 1<sup>st</sup> International Conference on Computational Design and Simulation of Materials (CDSM 2015), August 17-20 (2015), Shenyang (China).

S. Yunoki, "Carrier doped Mott insulators: iridates vs. cuprates", EMN Qingdao Meeting, Energy Materials Nanotechnology, June 14-17 (2015), Qingdao (China).

柚木 清司, 「層状ペロブスカイト構造を持つ 5d 遷移金属イリジウム酸化物における新規な絶縁体と超伝導」物性研究所計算物質科学センター第 4 回シンポジウム・物

性研スーパーコンピュータ共同利用報告会, 2014 年 11 月 12 日-14 日, 東京大学物性研究所, 柏 (日本).

S. Yunoki, "Superconductivity and metal-insulator transition in 5d iridium oxides", H1 Computational Materials Methods, Design, and Applications, IUMRS-ICYRAM 2014, Oct. 24-29 (2014), Haikou (China).

S. Yunoki, "Superconductivity and metal-insulator transition in  $Sr_2IrO_4$ ", 2014 EMN Summer Meeting, Energy Materials Nanotechnology, June 9-12 (2014), Cancun (Mexico).

S. Yunoki, "Novel unconventional superconductivity in  $J_{eff}=1/2$  Mott insulator for Ir oxides", First-QS<sup>2</sup>C Workshop on "Emergent Phenomena of Correlated Materials", Nov. 13-16 (2013), Shinagawa Intercity Hall, Tokyo (Japan).

〔図書・産業財産権〕(計 0 件)

〔その他〕プレスリリース等

“分子軌道性バンド絶縁体と相対論的モット絶縁体 - 相対論的モット絶縁体を特徴づける励起状態の発見 - ” (2016年11月4日) URL:

[http://www.riken.jp/pr/press/2016/20161104\\_1/](http://www.riken.jp/pr/press/2016/20161104_1/)  
“Iridium’s new lustre – The prediction of superconductivity in compounds based on iridium oxide opens a new chapter for superconductors –” (RIKEN RESEARCH), May 31, 2013. URL: <http://www.riken.jp/en/research/rikenresearch/highlights/7322/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柚木 清司 (YUNOKI, Seiji)  
理化学研究所・柚木計算物性物理研究室・准主任研究員  
研究者番号: 70532141

(2) 研究分担者

渡部 洋 (WATANABE, Hiroshi)  
早稲田大学・高等研究所・助教  
研究者番号: 50571238

白川 知功 (SHIRAKAWA, Tomonori)  
理化学研究所・創発物性科学研究センター・研究員  
研究者番号: 40571237

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし