

令和 2 年 6 月 26 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H01140

研究課題名（和文）八ニカム格子イリジウム酸化物の新奇量子スピン液体状態

研究課題名（英文）Novel quantum spin liquid states on honeycomb lattice iridium oxides

研究代表者

高木 英典（Takagi, Hidenori）

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・教授

研究者番号：40187935

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 34,600,000円

研究成果の概要（和文）：新奇量子スピン液体の実現は凝縮系物理の最も挑戦的な課題の一つである。特に Kitaev が理論的に見出した八ニカム格子上の量子スピン液体は、遍歴・局在二種類のマヨラナ粒子からなる厳密解として得られたために、多くの研究者の興味を惹き、現実物質での発現が強く望まれてきた。Kitaev 量子スピン液体が期待される八ニカム格子酸化物  $\text{H3LiIr2O6}$  において相互作用するスピン軌道複合  $J_{\text{eff}}=1/2$  モーメントが極低温まで磁気秩序、すなわち自発的対称性の破れを示さないことを発見し、量子スピン液体が実現していると結論した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Kitaev の理論模型に触発された量子スピン液体状態の実験的探索は世界的規模で研究が進んでいる。その舞台として当初提案された他の Ir 酸化物や Ru 塩化物では、いずれも量子スピン液体ではなく長距離磁気秩序の発現が観測されている。現実の物質での実現は不可能であるとも言われた。そのような状況の中で  $\text{H3LiIr2O6}$  に実験的に量子スピン液体の存在が確認されたことの意義は極めて大きい。さらに、この発見が液体状態発現の微視的起源、特に Kitaev 相互作用の役割や水素の役割など、新たな極めて挑戦的課題を投げかけていることも強調されるべきである。

研究成果の概要（英文）：Realization of quantum spin liquid is one of the grand challenges in condensed matter physics. A quantum spin liquid on honeycomb lattice theoretically discovered by Kitaev has been attracting considerable interests among the condensed matter scientists as it is obtained as the exact solution comprising of two kinds of Majorana fermions, itinerant and localized. In the honeycomb oxide  $\text{H3LiIr2O6}$ , we discovered that the interacting spin-orbital-entangled  $J_{\text{eff}}=1/2$  moments do not show any signature of magnetic ordering, namely spontaneous symmetry breaking down to an extremely low temperature, which lead us to conclude the realization of a quantum spin liquid state.

研究分野：物性物理学（実験）

キーワード：量子スピン液体 Kitaev 模型 量子磁性 Ir 酸化物

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

電子が有する小さな磁石(スピン)の集団である磁性体では、スピン間に互いに平行もしくは反平行にしようとする相互作用が働いている。スピン集団は高温で熱揺らぎによりその向きがばらばらな無秩序状態にあるが、低温では相互作用により自発的対称性の破れを起し、規則的に方向が揃った磁気秩序状態(強磁性、反強磁性など)へ転移する。ところが、例外的に対称性の破れを示すことなく、絶対零度でもスピンの量子力学的に揺らいでいる量子スピン液体と呼ばれる状態が存在する。その実現は凝縮系物理の大きな夢の一つである。[1] 1973年の P. W. Anderson による提案以来、量子スピン液体研究の歴史は長い。にもかかわらず、理論的なモデルの厳密解として液体状態を記述することが困難だったため、「もやもやした存在」でもあった。「もやもや」を一気に払拭したのが 2006 年の Kitaev 模型である。[2, 3] ハニカム格子上的のスピン系を考える。(図 1) 各スピンには三つの隣接スピンを特定の方向に同じ向き(強磁性的)に揃える力が働いている。その方向が、三つの隣接スピンごとに異なり、互いに直交していることがポイントである。「あちらを立てればこちらが立たず」が量子スピン液体を導く。Kitaev のモデルのインパクトは、数学のトリックを用いて、1. 基底状態が量子スピン液体、2. スピンの二種類の「マヨラナ粒子」への分裂、が厳密解として示されたことである。

マヨラナ粒子が量子スピン液体の中に潜む Kitaev 模型の基底状態を現実の物質で実現すべく、2010 年頃から世界的な競争が始まった。5d Ir 酸化物  $\text{Na}_2\text{IrO}_3$ 、 $\text{Li}_2\text{IrO}_3$ 、4d Ru 塩化物  $\text{RuCl}_3$  がその舞台として提案された。[4] これらの物質ではスピンと電子の軌道モーメントの合成からなる  $J_{\text{eff}}=1/2$  擬スピンのハニカム格子上に存在し、 $J_{\text{eff}}=1/2$  擬スピン間に Kitaev 模型と同じ相互作用が働く。ところが、当初提案された候補物質群では、低温で  $J_{\text{eff}}=1/2$  擬スピンの磁気秩序が実験的に観測され、基底状態が量子スピン液体でないことがわかってきた。模型にない別の相互作用が現実物質には付け加わり、秩序を安定化させると考えられた。量子スピン液体状態を安定化する要素を備えた新物質の登場が待たれた。

### 2. 研究の目的

本研究課題を構想する段階で、Kitaev 模型の本質的要素を備えるハニカム格子  $\text{H}_3\text{LiIr}_2\text{O}_6$  および三次元ハイパーハニカム格子  $\beta\text{-Li}_2\text{IrO}_3$  (高圧下) に量子スピン液体が基底状態として発現する実験的兆候を掴んだ。本課題はこれを出発点とし、世界に先駆けて現実物質での Kitaev 量子スピン液体発現を実験的に確立し、その新奇準粒子励起を捉えることを目的とする。

### 3. 研究の方法

二次元ハニカム格子化合物  $\text{H}_3\text{LiIr}_2\text{O}_6$  および重水素体を  $\text{Li}_2\text{IrO}_3$  からソフト化学的手法により合成し、NMR、磁化率、比熱を用いて、その磁性を評価した。ハイパーハニカム  $\beta\text{-Li}_2\text{IrO}_3$  については、単結晶を作製した。高圧下の NMR、磁化測定装置を立ち上げ、その高圧下での磁性を調べた。

### 4. 研究成果

#### (1) ハニカム格子 $J_{\text{eff}}=1/2$ 量子スピン液体 $\text{H}_3\text{LiIr}_2\text{O}_6$ の発見

本研究の主目標である量子スピン液体の発見を達成した。[5] 多結晶  $\text{Li}_2\text{IrO}_3$  を配向させた試料を作製し、その磁性を NMR、磁化率、比熱を用いて評価した。磁化率  $\chi$ 、NMR ナイトシフト  $K$ 、NMR スピン緩和率  $1/T_1$  の 100 K 以上の高温での振る舞いは、Kitaev 模型を想起させる

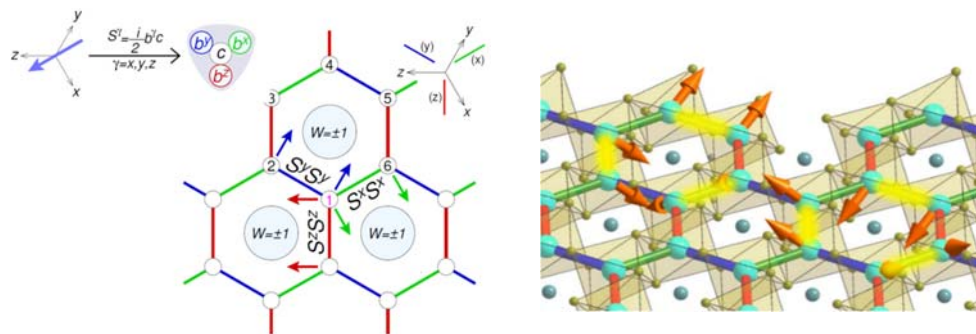


図 1: Kitaev 模型。ハニカム格子上的のスピン 1/2 は、隣接の三つの擬スピンと赤、青、緑の結合を通じて相互作用する。三つの結合は互いに直交した三方向に擬スピンを揃えようとする。その競合結果、量子スピン液体が基底状態となり、1/2 スピンは二種類のマヨラナ粒子(b,c)に分裂する。(文献[3])

右: 量子スピン液体が発現する  $\text{H}_3\text{LiIr}_2\text{O}_6$  の結晶構造。水色が Ir (イリジウム) 原子、緑が O (酸素) 原子、青緑が Li (リチウム) 原子を示す。H (水素) 原子は図に示す各層を積み重ねた三次元構造の層間に位置する。擬スピン 1/2 の磁気モーメント (オレンジ矢印) を有する Ir がハニカム格子を構成している。酸素を通じた超交換相互作用は Kitaev 模型と等価な結合依存相互作用を与える。

異方的に相互作用する  $J_{\text{eff}}=1/2$  擬スピン系が  $\text{H}_3\text{LiIr}_2\text{O}_6$  に形成されていることを示した。その相互作用エネルギーは 200 K 程度である。相互作用エネルギーの 0.1% 以下である  $T=50$  mK まで温度を下げて、 $J_{\text{eff}}=1/2$  擬スピン系は磁気秩序すなわち自発的対称性の破れの徴候を示さないことを見出した。図 2 に示すように局所磁場分布に対応する NMR の線幅は低温まで増大を示さない。この事実をもとに  $\text{H}_3\text{LiIr}_2\text{O}_6$  における  $J_{\text{eff}}=1/2$  擬スピンモーメントの量子スピン液体状態の発現を結論した。通常の  $S=1/2$  電子スピンと異なり、スピンモーメントと軌道モーメントの複合体である  $J_{\text{eff}}=1/2$  擬スピンの織りなす「スピン軌道量子液体」状態であり、強相関とスピン軌道相互作用の協奏の産物である。

### (2) $\text{H}_3\text{LiIr}_2\text{O}_6$ の低エネルギー励起

低温における  $\text{H}_3\text{LiIr}_2\text{O}_6$  の NMR の緩和率  $1/T_1$ 、比熱  $C$ 、磁化  $M$  を詳細に解析し、 $\text{H}_3\text{LiIr}_2\text{O}_6$  の量子スピン液体状態の素励起を探った。5 K 以下の低温で、3 つの物理量は温度  $T$  及び磁場  $B$  の関数として  $B/T$  に対して共通のスケール挙動（すべてのデータが普遍的なカーブを構築する）を示した。これらの振る舞いは、ゼロ磁場で  $E=0$  で発散的、磁場下ではゼーマンエネルギーにスケールする V 字型の擬ギャップを有するフェルミ粒子状態密度モデルにおける熱励起として定量的に記述できる。スケール挙動がナイトシフト  $K$  には現れないことから、このフェルミオン励起は 1% 程度のスピン欠陥に起因すると結論した。[5] Kitaev 模型に対する理論計算は、スピン欠陥が、トラップされた局在マヨラナ粒子として理解でき、その励起に  $E=0$  の特異性が現れることを示している。今回の結果はこれと整合しているが、例えば単なるスピン重項状態でも同様のスピン欠陥の振る舞いが期待できるので、それらの可能性を排除することができない。スケール関数によって定量的に記述されるスピン欠陥の寄与を差し引くことにより、量子スピン液体固有の低温比熱を求めた。量子スピン液体の低温比熱は格子の寄与と思われる  $T^3$  項に支配され、5 K 以下の低温で磁気励起の寄与は同定できなかった。このことは量子スピン液体に固有の低エネルギー励起にはギャップが開いていることを意味する。(図 3) したがって、今回発見した量子スピン液体状態の励起は、等方的なイジング相互作用からなる純粋 Kitaev 模型に期待されるギャップレス状態とは質的に異なっている。[5] 小さなギャップの起源を明らかにし、スピン液体発現機構、特に Kitaev 物理の役割を明らかにするのが、次の挑戦的課題である。

### (3) $(\text{H/D})_3\text{LiIr}_2\text{O}_6$ の巨大同位体効果

$\text{H}_3\text{LiIr}_2\text{O}_6$  の他の Ir ハニカム格子酸化物との違いは、構造上の水素 H の存在である。その役割を調べるために H を同位体 D に置換した試料を作製したところ、 $J_{\text{eff}}=1/2$  擬スピンの磁気的結合に対する巨大同位体効果を発見した。磁化率及び NMR ナイトシフトの測定結果は、磁気的結合の目安であるキュリーワイス温度が 100 K 程度から 180 K 程度まで、重水素置換に伴って約二倍に増大する。これほど大きく相互作用が変わっているにもかかわらず、D 体でも NMR の測定結果は量子スピン液体状態が安定に存在することが判明した。理論的には Kitaev 量子スピン液体状態が極めて限られた磁気相互作用パラメータ空間でしか存在しえないことを考えると、この結果は量子スピン状態出現に磁気相互作用パラメータ以外の必須要素が存在することを意味する。中性子構造解析の結果は  $\text{LiIr}_2\text{O}_6$  ハニカム面間の D が上下どちらかの酸素と OD 結合

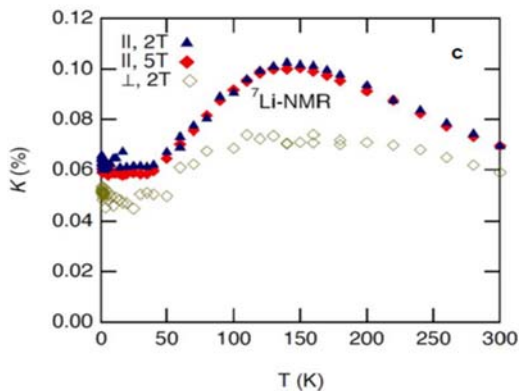


図 2：量子スピン液体： $\text{H}_3\text{LiIr}_2\text{O}_6$  の Knight シフトの温度依存性。高温の磁場の方向に依存したキュリーワイス則的な振る舞いは異方的に相互作用する  $J_{\text{eff}}=1/2$  擬スピンの存在を示すが、極低温まで磁気秩序を示す NMR 線幅の変化は観測されない。

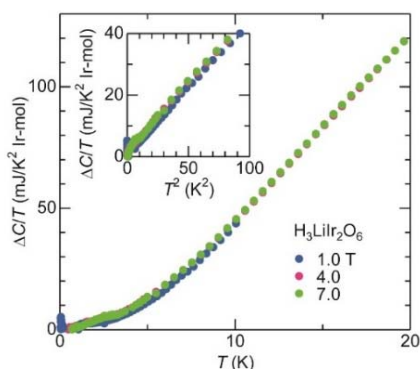


図 3：量子スピン液体の  $\text{H}_3\text{LiIr}_2\text{O}_6$  の低温比熱。格子比熱に支配されているように見え、励起ギャップの存在を示唆する。

を構築していることを明らかにした。OD 結合は酸素を通じた Ir ( $J_{\text{eff}}=1/2$ ) モーメントの超交換相互作用に大きな影響を与える。OD 結合と OH 結合では、その量子性により結合の状態が大きく異なることが予想される。実際光学応答の振動モードの測定結果は二つの結合の大きな違いを明示した。[6] したがって、OD/OH 結合が巨大同位体効果の起源であると推論した。光学応答の測定結果は、OD/OH 結合の分布が静的に凍結されたものでなく、D もしくは H が低温で2つの安定サイト間を量子トンネルし、動的である可能性を強く示唆する。[6] 水素の量子トンネルとこれと強く結合する  $J_{\text{eff}}=1/2$  モーメントが織りなす量子スピン液体状態発現機構の関係は極めて興味深いテーマである。

#### (4) ハイパーハニカム格子 $\beta\text{-Li}_2\text{IrO}_3$ における $J_{\text{eff}}=1/2$ 磁性と非磁性スピン一重項状態の競合

3次元ハイパーハニカム格子 $\beta\text{-Li}_2\text{IrO}_3$ は研究代表者らのグループが2015年に発見した  $J_{\text{eff}}=1/2$  磁性体である。[7] その結晶構造は二次元ハニカム格子の三次元版になっており、 $J_{\text{eff}}=1/2$  擬スピンの隣接する3つの  $J_{\text{eff}}=1/2$  と異方的に相互作用している。純粋なイジング相互作用だけであれば、Kitaev型の量子スピン液体状態が理論的に予言されるが、現実の系ではIrジグザグ鎖に沿った長距離スパイラル磁性が  $T_{\text{mag}}=40\text{ K}$  以下で出現する。XMCD測定により、高圧の印加によりこの長距離磁気秩序の消失を示唆する結果が得られた。[7] 量子スピン液体出現の可能性も含めて圧力誘起相の正体を明らかにすべく、高圧下でNMR、磁化測定、構造解析の測定を行った。その結果、高圧相ではハイパーハニカム構造のジグザグ鎖上にIr二量体が形成され、非磁性スピン一重項状態が出現することを明らかにした。[8,9] この非磁性スピン一重項状態は圧力低下とともに抑制され、 $T=0$ の極限では圧力  $P=1\text{-}2\text{GPa}$  で長距離磁気秩序と競合する。競合領域では、構造的には明瞭な二量体形成は観測されないが、NMRや磁化測定には不均一な非磁性状態が観測される。これが単なる乱れた二量体ガラス状態なのか、ある種のスピン液体状態なのか興味を持たれる。

#### (5) Irペロブスカイトの強相関ディラック半金属-磁性絶縁体転移

量子スピン液体の薄膜化の基盤技術構築を目指して、強相関ディラックノード半金属である  $\text{SrIrO}_3$  及び  $\text{CaIrO}_3$  ペロブスカイト酸化物薄膜をPLDにより作製し、特にSnドーピングによるディラック半金属絶縁体転移の考察を行った。Snドーピングはサイト間ホッピングの抑制を通じて、実効的にクーロン相互作用(電子相関)を制御していると考えられる。ディラック電子系は数多いが、その多くは弱相関系で、 $\text{SrIrO}_3$  及び  $\text{CaIrO}_3$  は磁性絶縁体への転移を調べることができるユニークな舞台である。Snドーピングにより、同構造であるが格子歪みの小さい(相関の弱い)  $\text{SrIrO}_3$  と歪みの大きい  $\text{CaIrO}_3$  は、いずれもディラック半金属から磁性絶縁体へと転移したが、その振る舞いは対照的であることを見出した。[10]  $\text{SrIrO}_3$  では10%程度のSnドーピングまで半金属にとどまり、臨界Sn濃度以上で、温度の関数として明確なディラック半金属-磁性絶縁体転移が観測される。これに対して  $\text{CaIrO}_3$  では明確な転移を示さずに、数%程度のドーピングで徐々に絶縁体化する。比較的相関の弱い  $\text{SrIrO}_3$  では、電子相関の変化が大きく相関制御の絶縁体転移が起きるのに対し、相関が強く、絶縁体転移の臨界領域に存在する  $\text{CaIrO}_3$  では乱れの効果が大きく、アンダーソンモット転移が実現していると解釈した。探索の範囲内で明瞭な磁性金属相の兆候はつかめなかった。

#### (6) 展開研究

本課題の成果をさらに展開し、新しい流れを開拓する試みとして、非  $d^5$  ( $J_{\text{eff}}=1/2$ , Ir, Ru) 系の新奇スピン軌道相互作用物性の探索を行った。 $d^1$  では  $J_{\text{eff}}=3/2$  の  $\text{Cs}_2\text{TaCl}_6$  において多重極子秩序を発見した。[11]  $d^4$  では  $J_{\text{eff}}=0$  Mott絶縁体と励起子磁性の探索とディラック半金属の巨大軌道反磁性の研究を開始した。 $LS$ 結合の極限において  $d^4$ の基底状態は非磁性一重項  $J_{\text{eff}}=0$  である。圧力印加などにより、 $J_{\text{eff}}=1$  励起状態の相互作用、すなわち励起分散を増加させると、量子臨界点を経て、 $J_{\text{eff}}=1$  励起子磁性への凝縮が起きると考えられている。[12] モデル物質として  $4d\text{K}_2\text{RuCl}_6$  を取り上げ、理想的な非磁性  $J_{\text{eff}}=0$  状態を実験的および理論(バンド計算)の視点から検証、証明し、励起磁性探索のプラットフォームを構築した。

#### <引用文献>

1. L. Balents, "Spin liquids in frustrated magnets", Nature **464**, 199 (2010).
2. A. Kitaev, "Anyons in an exactly solved model and beyond", Annals of Physics **321**, 2 (2006).
3. H. Takagi, T. Takayama, G. Jackeli, G. Khaliullin, and S. N. Nagler, "Concept and realization of Kitaev Quantum Spin Liquids", Nature Reviews Physics **1**, 264 (2019)
4. G. Jackeli and G. Khaliullin, "Mott Insulators in the Strong Spin-Orbit Coupling Limit: From Heisenberg to a Quantum Compass and Kitaev Models", Phys. Rev. Lett. **102**, 017205 (2009).
5. K. Kitagawa, T. Takayama, Y. Matsumoto, A. Kato, R. Takano, Y. Kishimoto, S. Bette, R. Dinnebier, G. Jackeli, and H. Takagi, "A spin-orbital-entangled quantum liquid on a honeycomb lattice", Nature **554**, 341 (2018).
6. K. Geirhos, P. Lunkenheimer, M. Blankenhorn, R. Claus, Y. Matsumoto, K. Kitagawa, T. Takayama, H.

- Takagi, I. Kézsmárki, and A. Loidl, “Quantum paraelectricity in the Kitaev quantum spin liquid candidates  $\text{H}_3\text{LiIr}_2\text{O}_6$  and  $\text{D}_3\text{LiIr}_2\text{O}_6$ ”, *Phys. Rev.* **B101**, 184410 (2020).
7. T. Takayama, A. Kato, R.E. Dinnebier, J. Nuss, H. Kono, L. Veiga, G. Fabbri, D. Haskel, and H. Takagi, “Hyperhoneycomb iridate  $\beta\text{-Li}_2\text{IrO}_3$  as a Platform for Kitaev Magnetism”, *Phys. Rev. Lett.* **114**, 077202 (2015).
8. T. Takayama, A. Krajewska, A. S. Gibbs, A. N. Yaresko, H. Ishii, H. Yamaoka, K. Ishii, N. Hiraoka, N. P. Funnell, C. L. Bull, and H. Takagi, “Pressure-induced collapse of the spin-orbital Mott state in the hyperhoneycomb iridate  $\beta\text{-Li}_2\text{IrO}_3$ ”, *Phys. Rev. B* **99**, 125127 (2019).
9. L. S. I. Veiga, K. Glazyrin, G. Fabbri, C. D. Dashwood, J. G. Vale, H. Park, M. Etter, T. Irifune, S. Pascarelli, D. F. McMorrow, T. Takayama, H. Takagi, and D. Haskel, “Pressure-induced structural dimerization in the hyperhoneycomb iridate  $\beta\text{-Li}_2\text{IrO}_3$  at low temperatures”, *Phys. Rev. B* **100**, 064104 (2019).
10. M. Negishi, N. Hiraoka, D. Nishio-Hamane, and H. Takagi, “Contrasted Sn Substitution effects on Dirac line node semimetals  $\text{SrIrO}_3$  and  $\text{CaIrO}_3$ ”, *APL Materials* **7**, 121101 (2019).
11. H. Ishikawa, T. Takayama, R. K. Kremer, J. Nuss, R. Dinnebier, K. Kitagawa, K. Ishii, and H. Takagi, “Ordering of hidden multipoles in spin-orbit entangled  $5d^1$  Ta chlorides”, *Phys. Rev. B* **100**, 045142 (2019).
12. G. Khaliullin, “Excitonic Magnetism in Van Vleck-type  $d^4$  Mott Insulators”, *Phys. Rev. Lett.* **111**, 197201 (2013).



## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計44件（うち査読付論文 43件 / うち国際共著 42件 / うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 K. Geirhos, P. Lunkenheimer, M. Blankenhorn, R. Claus, Y. Matsumoto, K. Kitagawa, T. Takayama, H. Takagi, I. Kezsmarki, A. Loidl	4. 巻 101
2. 論文標題 Quantum paraelectricity in the Kitaev quantum spin liquid candidates H3LiIr2O6 and D3LiIr2O6	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 184410-1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.101.184410	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 H. Ishikawa, T. Takayama, R. K. Kremer, J. Nuss, R. Dinnebier, K. Kitagawa, K. Ishii, H. Takagi	4. 巻 100
2. 論文標題 Ordering of hidden multipoles in spin-orbit entangled $d^1$ Ta chlorides	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 045142-1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.100.045142	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 M. Negishi, N. Hiraoka, D. Nishio-Hamane, H. Takagi	4. 巻 7
2. 論文標題 Contrasted Sn substitution effects on Dirac line node semimetals SrIrO3 and CaIrO3	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 APL Materials	6. 最初と最後の頁 121101-1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5129235	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 Takagi Hidenori, Takayama Tomohiro, Jackeli George, Khaliullin Giniyat, Nagler Stephen E.	4. 巻 1
2. 論文標題 Concept and realization of Kitaev quantum spin liquids	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Reviews Physics	6. 最初と最後の頁 264 ~ 280
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s42254-019-0038-2	査読の有無 無
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 K. Kitagawa, T. Takayama, Y. Matsumoto, A. Kato, R. Takano, Y. Kishimoto, S. Bette, R. Dinnebier, G. Jackeli, H. Takagi	4. 巻 554
2. 論文標題 A spin-orbital-entangled quantum liquid on a honeycomb lattice	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 341-345
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/nature25482	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55件 (うち招待講演 31件 / うち国際学会 38件)

1. 発表者名 H. Takagi
2. 発表標題 Interplay of spin-orbit coupling and electron correlations in 4d and 5d transition metal oxides
3. 学会等名 5th International Workshop on Complex Oxides (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Takagi
2. 発表標題 Spin-orbital entangled quantum liquid in H <sub>3</sub> LiIr <sub>2</sub> O <sub>6</sub>
3. 学会等名 Trends in Quantum Magnetism, WE Heraeus Seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Takagi
2. 発表標題 When spins and charges feel frustrated...
3. 学会等名 Symposium "Innovation and Creativity in Science" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Takagi
2. 発表標題 Liquid and solid states of spin orbital entangled matter in 4d and 5d transition metal oxides
3. 学会等名 Telluride workshop on Enhanced Functionalities in 4 and 5d Containing Material from Large Spin-Orbit Coupling (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Takagi
2. 発表標題 Spin-orbital quantum liquid on honeycomb lattice
3. 学会等名 TEMM2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Takagi
2. 発表標題 Qunatum Spin Liquid
3. 学会等名 Advanced School and Workshop on Correlations in Electron Systems: from Quantum Criticality to Topology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Takagi
2. 発表標題 Exploring novel quantum phases in 5d transition metal oxides
3. 学会等名 CIFAR meeting on quantum materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 K. Kitagawa
2. 発表標題 Quantum Spin Liquid in 5d Electron Honeycomb Compound H <sub>3</sub> LiIr <sub>2</sub> O <sub>6</sub> ,
3. 学会等名 2019 Joint MMM-Intermag Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Takagi
2. 発表標題 A spin orbital-entangled quantum liquid on a honeycomb lattice
3. 学会等名 APS March Meeting 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Takagi
2. 発表標題 Correlated Topological Phases in Complex Ir Oxides
3. 学会等名 International Conference on Topological Materials Science 2017 (TopoMat2017) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Takagi
2. 発表標題 Quantum Liquid state of $J_{eff}=1/2$ isospins in complex Ir oxides
3. 学会等名 SPICE Workshop on Spin Dynamics in the Dirac Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Takagi
2. 発表標題 Correlated Topological Phases in Complex Ir Oxides
3. 学会等名 Gordon Research Conference on “Topological & Correlated Matter: From Fundamentals to New Discoveries” (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Takagi
2. 発表標題 Topological quantum spin liquid - “Zen” world
3. 学会等名 Competing Interactions and Colossal Responses in Transition Metal Compounds (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Takagi
2. 発表標題 Quantum liquid state of $J_{eff}=1/2$ isospins in complex Ir oxides
3. 学会等名 Beyond! Topology and Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Takagi
2. 発表標題 Spin-orbital entangled quantum spin liquid on honeycomb lattice
3. 学会等名 KITP conference on “Order, Fluctuations, and Strong Correlations: New Platforms and Developments” (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Takagi
2. 発表標題 Quantum Liquid state of $J_{eff}=1/2$ isospins in complex Ir oxides (Half-Plenary)
3. 学会等名 28th International Conference on Low Temperature Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Kitagawa
2. 発表標題 New $J_{eff}=1/2$ Quantum Liquid on Honeycomb Lattice
3. 学会等名 1st Asia Pacific Workshop on Quantum Magnetism (APWQM 2017) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Takagi
2. 発表標題 Quantum Liquid state of $J_{eff}=1/2$ isospins in complex Ir oxides
3. 学会等名 Junjiro Kanamori Memorial International Symposium - New Horizon of Magnetism (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 N. Hiraoka
2. 発表標題 Electronic phase control of perovskite $SrIrO_3$ with Dirac line nodes
3. 学会等名 Gordon Godfrey Workshop 2017 on Spins and Strong Electron Correlations (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Takagi
2. 発表標題 Spin-orbit coupling meets with electron correlations - A guided tour to complex iridium oxides -
3. 学会等名 Solid State Chemistry Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Kitagawa
2. 発表標題 Quantum Spin Liquid Phenomena in Honeycomb and Hyperhoneycomb Iridates
3. 学会等名 International Workshop on Frontiers of Research in Quantum Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Kitagawa
2. 発表標題 Quantum Liquid and Phase Diagram of Honeycomb and Hyperhoneycomb Iridates
3. 学会等名 TMS-EPiQS 2nd Alliance Workshop: Topological magnets and topological superconductors (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Takagi
2. 発表標題 Spin-orbital entangled quantum liquid on honeycomb lattice
3. 学会等名 High Temperature Superconductivity - Unifying Themes in Diverse Materials, Aspen Winter Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Takagi
2. 発表標題 Exotic spin-orbital entangled state in 4d and 5d transition metal oxides - beyond $J_{eff}=1/2$ physics
3. 学会等名 The 18th Taiwan-Japan-Korea Symposium on Strongly Correlated Electron Systems (TJK18) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Kitagawa, T. Takayama, Y. Matsumoto, Y. Kishimoto, R. Takano, H. Takagi
2. 発表標題 Quantum Liquid of Honeycomb Iridate
3. 学会等名 The 18th Taiwan-Japan-Korea Symposium on Strongly Correlated Electron Systems (TJK18) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 北川健太郎
2. 発表標題 ハニカム・ハイパーハニカムIr 酸化物のスピン液体物性
3. 学会等名 科学研究費補助金 基盤研究(A)研究会「第二回 量子スピン液体研究の新展開」(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高木英典
2. 発表標題 ハニカム格子上的スピン軌道量子液体
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会(招待講演)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

高木・北川研究室ホームページ  
[http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/takagi\\_lab/](http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/takagi_lab/)

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	平岡 奈緒香 (太田奈緒香)  (Hiraoka Naoka)  (40758827)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教    (12601)	
研究分担者	北川 健太郎  (Kitagawa Kentaro)  (90567661)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・講師    (12601)	