

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05426

研究課題名(和文)パイロクロア・カゴメ格子量子スピン液体とそのトポロジカルな性質の理論的研究

研究課題名(英文)Theoretical study on pyrochlore and kagome quantum spin liquids and their topological properties

研究代表者

小野田 繁樹 (Onoda, Shigeki)

国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・専任研究員

研究者番号：70455335

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：U(1)量子スピン液体を実現する候補であるパイロクロア量子スピンアイス系に特有な新現象を理論的に探究し、以下の世界に先駆けた成果を上げた。

[111]磁場下での広域相図を解明し、共有結合性固体相、磁化モノポールの超固体相を新たに発見した。U(1)量子スピン液体相をHiggs強磁性相で挟んだ接合系において、接合面に平行な印加電場が、モノポールのトンネル超流動流を誘起し、接合面に垂直に磁化を変化させることを示した。スピネル型イリジウム酸化物Ir₂O₄を室温量子スピンアイス候補として提唱した。Yb₂Ti₂O₇の強磁性相での第一磁気励起を、仮想光子がエネルギーギャップを持った励起として説明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで量子スピン液体は極低温に到達しなければ議論できず、純粋に科学的興味からしか研究されてこなかった。特に、実験的にはU(1)量子スピン液体の直接的な証拠を得る方法が認識されていなかった。本研究の成果は、量子スピンアイスの接合系を用いることで、この系でU(1)量子スピン液体を検出することが可能であることを示唆している点で学術的な意義が高い。さらに、高温量子スピンアイスに向けた物質開発を先駆け、モノポールのトンネル超流動流を利用したデバイスについて日米で特許を申請しており、革新的機能性磁性体開発の第一歩となる潜在性をもつ点で、社会的にも意義が高いと思われる。

研究成果の概要(英文)：We theoretically studied novel phenomena characteristic to pyrochlore quantum spin ice, a candidate for a U(1) quantum spin liquid, and produced the following cutting-edge achievements.

We have revealed the global phase diagram under the [111] magnetic field, discovering a valence bond solid and a monopole supersolid. In the junction sandwiching the U(1) quantum spin liquid with two Higgs ferromagnets, it has been found that the electric field applied parallel to the interface induces a tunneling monopole supercurrent and a change in the magnetization normal to the interface.

We have proposed the A-site-deintercalated spinel iridate Ir₂O₄ as a candidate high-temperature quantum spin ice. The first magnetic excitation in the ferromagnetic phase of Yb₂Ti₂O₇ has been explained as otherwise gapless artificial photons that acquire an energy gap through the Higgs mechanism.

研究分野：物性理論

キーワード：量子スピン液体 量子スピンアイス モノポール 理論 パイロクロア

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

電子スピン間の相互作用が幾何学的にフラストレートした磁性体では、絶対零度でも磁気秩序が抑制されて対称性が自発的に破れないことがある。これらは量子スピン液体(symmetric spin liquids)と呼ばれている。その性質は一般に種々のゲージ理論によって記述され、理論上、多種多様な量子スピン液体が存在し得る。

U(1)ゲージ構造が自発的に顕在化した量子スピン液体は U(1)量子スピン液体として知られている。その候補として特に、パイロクロア量子スピンアイス系があり、その候補・関連物質 $\text{Pr}_2(\text{Sn}, \text{Zr}, \text{Ir})_2\text{O}_7$ 、 $\text{Yb}_2(\text{Ti}, \text{Sn})_2\text{O}_7$ 、 $\text{Tb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ も知られている。これら複雑な系の有効スピンモデルは、研究代表者らによって世界で初めて導出された。そのモデルは、希土類磁気モーメントを正四面体の中心に対して 2-in, 2-out の配置に揃えようとするスピンアイス系 ($(\text{Dy}/\text{Ho})_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ など) の古典的相互作用に加えて、in と out を量子力学的に交換する相互作用やさらに複雑な相互作用を有する。我々は、ゲージ理論を用いてそのモデルに対する平均場近似による相図も既に解析した。特に、最も簡単な場合には、仮想的光子、ボーズ統計に従う非閉じ込めスピノン励起(スピンアイスにおける「磁気モノポール」)などの励起をもつ U(1)量子スピン液体が基底状態となる。我々は近年、冷却とともに古典スピンアイス領域から U(1)量子スピン液体へ連続的に変化することを量子モンテカルロ計算から示すとともに、関連物質における理論解析を担ってきた。

量子スピンアイス系に代表されるパイロクロアの[111]面は三角格子とカゴメ格子が交互に積層した構造をもつ。古典スピンアイス系においては、[111]磁場の印加とともに、スピンアイスから、三角格子面のスピンだけが完全に磁場に平行に揃ってカゴメ格子面のスピンの 2-in, 1-out ないし 1-in, 2-out の規則に従うカゴメアイスへ、さらに 3-in, 1-out ないし 1-in, 3-out の完全スピン偏極状態へと遷移することが知られている。この場合、各カゴメ格子面はフラストレーションのために互いに独立に振舞う。一方、[111]磁場下の量子スピンアイス系の振る舞いについては知られていなかった。量子系においては、古典カゴメスピンアイスのように、残留エントロピーが発生することはあり得ない。いくつかのカゴメ格子磁性体のように、何らかの 2 次元量子スピン液体が実現するのか、あるいは、各カゴメ格子において独立に共有結合性固体 Valence Bond Solid(VBS)が実現するのか、何らかの 3 次元的なエンタングルメントが生じるのか、よく理解されていなかった。

2. 研究の目的

高温常磁性相と対称性が同じ量子スピン液体を系統的に分類・理解するには、対称性だけでなく、トポロジカル秩序(量子秩序)・ゲージ構造や量子エンタングルメントという概念が有用である。これら近年発展してきた概念は、対称性が同じでも断熱接続しない異なる量子相を分類し、それらの間の相転移の同定を可能にする。この点を念頭に、本研究課題では以下を研究目的とする。

- (1) 量子モンテカルロ法などの数値シミュレーションにより、研究背景で述べたパイロクロア系、および、そのカゴメ格子面などの相図を理論的に確立し、各相領域における性質を解明する。
- (2) さらに、非自明な量子スピン液体相が量子モンテカルロ計算で得られた際には、無限系に対してテンソルネットワークで基底状態を記述する手法を吟味する。その手法が現実的に有効であるならば、Projective Symmetry Group の数値解析を実施して、量子スピン液体などの非自明な基底状態のエンタングルメントやトポロジー構造を特徴づける。
- (3) U(1)量子スピン液体の U(1)トポロジー・ゲージ構造を利用した現象を理論的に考案し、実験的に量子スピン液体を検出する方法を提案するとともに、応用の可能性を探求する。
- (4) 磁性希土類パイロクロア酸化物では、量子スピンアイスとしての性質を示す温度スケールが 1 K より遥かに低く、実験的研究の推進やデバイスへの応用を妨げている。希土類のように 4f 電子系ではなく、スピン軌道相互作用が強く、かつ、電子波動関数のオーバーラップが大きい、5d 電子系を用いた量子スピンアイスの実現可能性を探る。
- (5) 量子スピンアイス系関連物質における実験結果を理論的に解析する。

3. 研究の方法

(1)量子モンテカルロ法

量子モンテカルロ法は、最も簡単な最近接量子スピンアイスモデルである XXZ 模型に対して、交換相互作用の横 (XX) 成分 J が強制的 ($J < 0$) でフラストレーションがない場合に不符号問題を生じない。|J| が交換相互作用の縦 (Z) 成分 J' に対して小さくなりすぎない場合には、改良された Directed Loop Algorithm に基づく有限温度量子モンテカルロ法を用いて注意深くアニーリングをすることによって、極低温の U(1)量子スピン液体領域まで到達できることが、既にゼロ磁場における我々の計算によって示されている。そこで、この手法を用いて、同じ模型における [111]磁場中での振る舞い、特に、ゼロ磁場での立方晶の U(1)量子スピン液体とは異なるゲージ構造/トポロジーをもった量子スピン液体、ないし、共有結合性固体 (Valence Bond Solid) を実現する可能性を調べた。

(2)PESS+HOTRG 法

2 次元量子系、ないし、3 次元量子系における量子スピン液体のトポロジーを解明するために、Projected Entangled Simplex State (PESS) を用いた基底状態を虚時間 TEBD 法と HOSVD 法により最適化する数値計算コードの開発、さらに、演算子の期待値の効率的近似計算が可能

な HOTRG 法 を用いて、物理量計算と PSG の数値解析の手法開発を試みた。この方法の計算確度と計算時間は、基底状態をクラスター状態のテンソル積(ネットワーク)で表現するため、各クラスターを表現する状態数に強く依存する。実際には、後述の研究成果(1)から、研究対象としていた[111]磁場下でのパイロクロア量子スピナイス系で、低温で長距離トポロジカル秩序・量子エンタングルメントを示さない VBS が実現することが示唆されたため、量子スピナ液体を示すカゴメ格子系へこの解析方法を適用するという当初の目的が消滅してしまった。また、3次元パイロクロア系では、状態数をクラスター平均場近似に対応する 1 から 2 まで増やすことが精一杯で、系統的な計算確度のテストが現実的に困難であることが判明した。したがって、この手法の追求、パイロクロア系への適用は断念した。

(3)量子スピナイス系に対する有効ゲージ場の量子論

2012 年に我々は、パイロクロア格子磁性体のひとつである量子スピナイス系を、磁化モノポールがゲージ場と結合しながら量子的に運動するというゲージ場の量子論描像を考案し、ゲージ場に対する平均場近似から基底状態相図を求めた。しかし、この近似では、ゲージ場の揺らぎを無視しているため、U(1)量子スピナ液体相(および、その近傍)における仮想光子励起を自己無撞着に求めることができない。モノポール(スピノン)とゲージ場の空間揺らぎを自己無撞着に取り込む理論的枠組みを考案した。これを磁気秩序相-U(1)量子スピナ液体-磁気秩序相の接合系で生じる現象を理論的に解析した。Yb₂Ti₂O₇ の低温強磁性相における低エネルギー磁気励起の実験結果を理解・説明するため、モノポールがボーズ凝縮した強磁性相での U(1)ゲージ理論の理論的枠組みを構築した。

(4)第一原理計算

Ir₂O₄ の電子構造計算に、擬原子軌道・擬ポテンシャルを用いた局所電子(スピン)密度汎関数近似(L(S)DA)法、および、L(S)DA+U 法に基づく電子状態計算コードである OPENMX を用いた。パイロクロア Ir 酸化物の第一原理計算を遂行した際に有効性が確認された擬ポテンシャルを用いた。主として、理化学研究所 HOKUSAI スーパーコンピュータで大規模数値計算を行った。

4. 研究成果

(1)古典スピナイスに[111]方向に磁場を印加すると、パイロクロア格子における磁場に垂直な三角格子上の磁気モーメントが磁場に平行に整列し、残されたカゴメ格子面上のモーメントが、1-in, 2-out、ないし、2-in, 1-out の規則に従うカゴメアイスが実現することが知られ

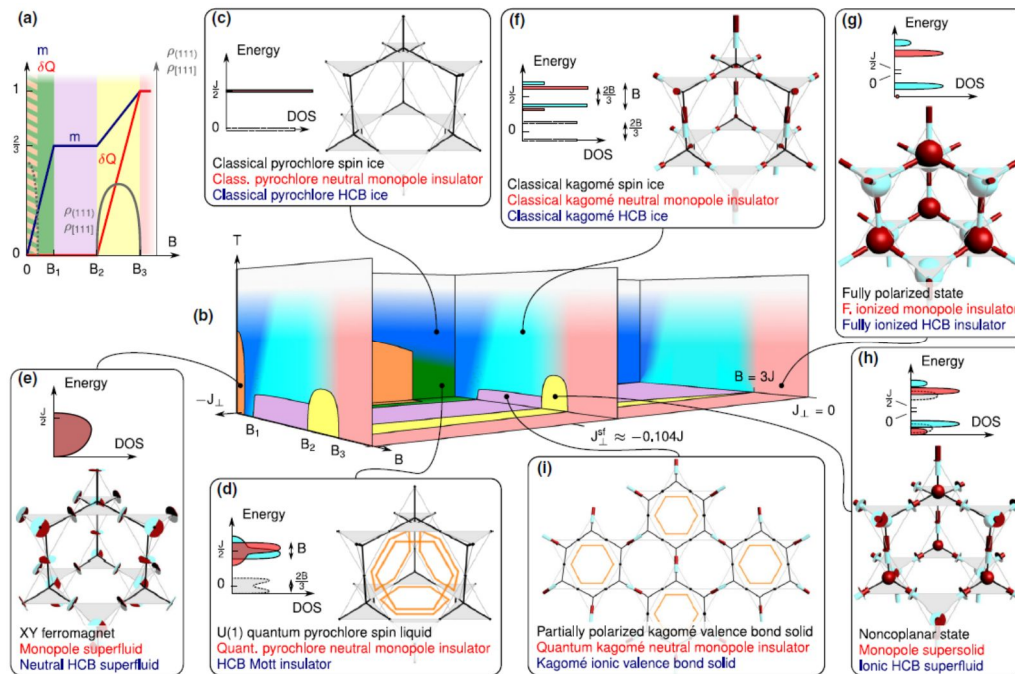


図 1. (a)磁場 B の関数としての磁化 m、モノポール密度 Q、モノポール超流動密度 ρ_s ($\rho_{s(111)}$ は磁場に垂直成分、 $\rho_{s[111]}$ は平行成分) の模式図。(b)磁場 B、絶対温度 T、交換相互作用における in-out のスピン交換成分 J の空間での広域相図。(c)古典スピナイス(古典的パイロクロア中性モノポール絶縁体)領域、(d)U(1)量子スピナ液体(量子的パイロクロア中性モノポール絶縁体)領域、(e)XY 磁気秩序(モノポール超流動)相、(f)古典カゴメアイス(古典的カゴメ中性モノポール絶縁体)領域、(g)完全スピン偏極領域、(h)立体的磁気秩序(モノポール超固体)相、それぞれにおけるモノポール分布(正は赤丸、負は水色丸)、励起スペクトル、エンタングルメント構造(黄色のリンク)。引用文献より抜粋。

ている。一方、[111]磁場下の量子スピナイスの相図はこれまでに知られていなかった。我々は大規模な有限温度量子モンテカルロ計算を行った。磁化、磁化率、モノポール圧縮率、モノポール超流動密度などを計算し、図1に示す相図を得ることに世界で初めて成功した。特に、新たにモノポール超固体相とカゴメ共有結合固体は、スピナイス系でこれまでに知られていなかった新しい相である。

(2) 量子スピナイスのU(1)ゲージ理論の枠組みでは、量子スピナイス系のU(1)量子スピン液体相はモノポールの量子力学的絶縁体相、磁気秩序相の多く(ヒッグス強磁性相)はモノポールがボーズ凝縮したモノポール超流動相に、それぞれ対応する。また、U(1)量子スピン液体相において自発的に出現したU(1)ゲージ構造での仮想電場は、現実の電場と線形に結合する。そこで超伝導におけるクーパー対をモノポールに見立てたジョセフソン効果の類似現象を考察した。図2(a,b)のようなU(1)量子スピン液体相にある量子スピナイスの薄い層を、強磁性相にあるふたつの量子スピナイス物質で挟んだ接合系において、接合を介したモノポール超流動流が、接合面に平行に印加した電場に垂直に流れることを示した。得られた結果を駆動原理として利用したデバイスに関する特許を日本・アメリカで申請した。

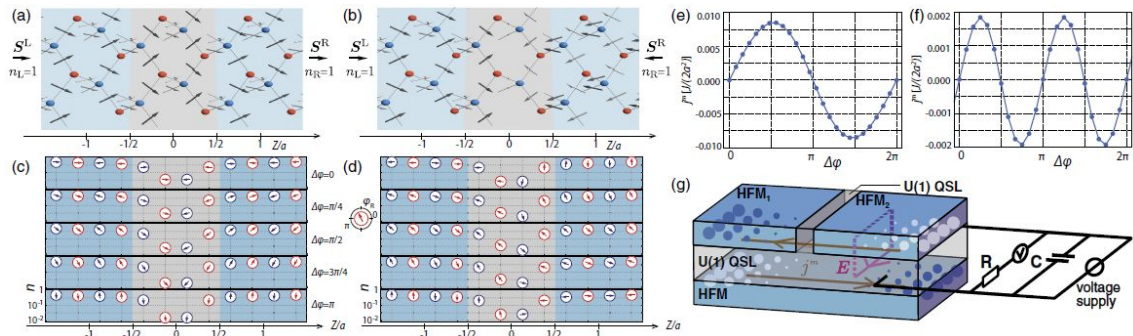


図1. 磁化が界面の垂直な向きに互いに(a,c,e)平行、(b,d,f)反平行なヒッグス強磁性(HFM)-U(1)量子スピン液体(U(1)QSL)-ヒッグス強磁性(HFM)接合における(a,b)スピン構造(矢印)、(c,d)モノポールの超流動密度(円の中心)と位相(矢印)、(e,f)両端での位相差の関数としてのトンネルモノポール超流動流。(g)HFM-U(1)QSL-HFM接合を利用したデバイス構造。引用文献より抜粋。

(3) Aサイトの元素がデインターカレートしたイリジウムスピネル化合物 Ir_2O_4 に対して、系統的な第一原理電子構造計算を行った。構造最適化の結果、バルクで合成できた場合には、図3(b)に示す結晶構造をとることが分かった。バルクでは $14_1'/am'd$ あるいは $14_1/amd$ の磁気空間群で表わされる反強磁性絶縁体となる。この場合の光学伝導度を計算した結果、実験結果と定量的によく符合することが分かった。また、様々な磁気構造をとった場合のエネルギーを計算し、それらのエネルギー差が一般的な最近接量子スピナイスモデルで完全に説明されることを示した。この解析から、 Ir_2O_4 が30meV程のスピナイス則相互作用定数を持つことが分かった。この値は、従来の磁性希土類パイロクロア酸化物よりも2桁も高い。実際に合成されているMgO(001)基板上で合成された場合、2-in, 2-outから傾いた強磁性か、あるいは、U(1)量子スピン液体が安定となることが分かった。特に、基板の格子定数を調節することによって、U(1)量子スピン液体を実現できる可能性が高い。以上の一連の結果から、 Ir_2O_4 が高温量子スピナイスとして、応用上重要な物質となることが想定される。

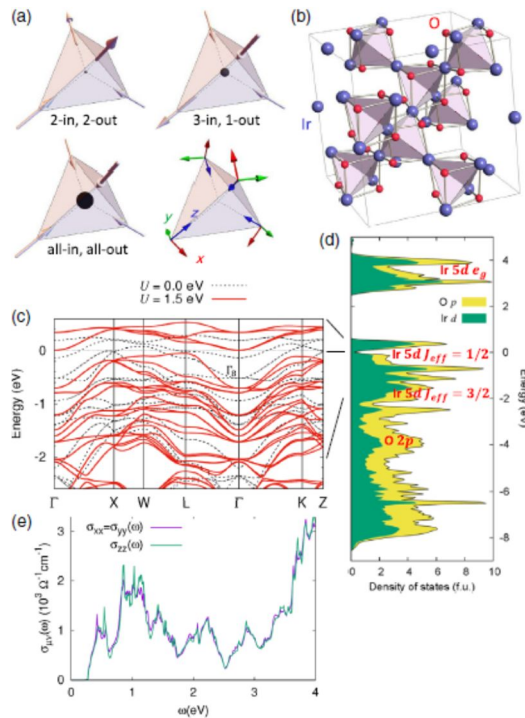


図2. (a)古典スピナイスの場合の正四面体上のスピン構造。(b)理想的なバルク立方晶 Ir_2O_4 の結晶構造。(c)U=0.0 eV(黒破線) 1.5 eV(赤実線)の場合の電子バンド構造。(d,e)U=1.5 eVでの(d)電子状態密度と(e)光学伝導度。引用文献より抜粋。

(4) 量子スピンアイス系 $\text{Yb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ の低温強磁性秩序相における低エネルギー磁気励起が実験的に解明されたことを受けて、ゲージ理論に基づいた理論解析を行い、その磁気励起スペクトルを説明した。特に、擬光子励起が $U(1)$ ゲージ対称性の破れに伴ってエネルギーギャップを持った励起として、 $\text{Yb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ の第一磁気励起 (~ 50 meV) が解釈された。

< 引用文献 >

- X.-G. Wen, *Phys. Rev. B* **65**, 165113 (2002).
M. Hermele, M. P. A. Fisher, L. Balents, *Phys. Rev. B* **69**, 064404 (2004).
O. I. Motrunich, T. Senthil, *Phys. Rev. B* **71**, 125102 (2005).
S. Onoda, Y. Tanaka, *Phys. Rev. Lett.* **105**, 047201 (2010); *Phys. Rev. B* **83**, 094411 (2011).
S. Onoda, *J. Phys. Conf. Ser.* **320**, 012065 (2011).
Lieh-Jeng Chang, Shigeki Onoda, Yixi Su, Ying-Jer Kao, Ku-Ding Tsuei, Yukio Yasui, Kazuhisa Kakurai, Martin Richard Lees, *Nature Communications* **3**, 992 (2012).
H. Takatsu, S. Onoda, S. Kittaka, A. Kasahara, Y. Kono, T. Sakakibara, Y. Kato, B. Fåk, J. Ollivier, J. W. Lynn, T. Taniguchi, M. Wakita, H. Kadowaki, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 217201 (2016).
Yasuyuki Kato, Shigeki Onoda, *Phys. Rev. Lett.* **115**, 077202 (2015).
Z. Y. Xie et al., *Phys. Rev. X* **4**, 011025 (2014).
L. de Lathauwer et al., *SIAM J. Matrix Anal. Appl.* **21**, 1253 (2000).
Z. Y. Xie et al., *Phys. Rev. B* **86**, 045139 (2012).
SungBin Lee, Shigeki Onoda, Leon Balents, *Phys. Rev. B* **86**, 104412 (2012).
T. Ozaki et al., Open source package for Material Explorer, <http://www.openmxsquare.org/>.
Fumiyuki Ishii, Yo Pierre Mizuta, Takehiro Kato, Taisuke Ozaki, Hongming Weng, Shigeki Onoda, *J. Phys. Soc. Jpn.* **84**, 073703 (2015).
Troels Arnfred Bojesen, Shigeki Onoda, *Phys. Rev. Lett.* **119**, 227204 (2017).
Sho Nakosai, Shigeki Onoda, *J. Phys. Soc. Jpn.* **88**, 053701 (2019).
Shigeki Onoda, Fumiyuki Ishii, *Phys. Rev. Lett.* **122**, 067201 (2019).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

| | |
|---|---------------------------|
| 1. 著者名 Sho Nakosai, Shigeki Onoda | 4. 巻 88 |
| 2. 論文標題 Magnetic monopole supercurrent through a quantum spin ice tunnel junction | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan | 6. 最初と最後の頁 053701(1-5) |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.88.053701 | 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 Shigeki Onoda, Fumiyuki Ishii | 4. 巻 122 |
| 2. 論文標題 First-principles design of the iridate spinel Ir2O4 for high-temperature quantum spin ice | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review Letters | 6. 最初と最後の頁 67201 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.122.067201 | 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 Troels Arnfred Bojesen, Shigeki Onoda | 4. 巻 119 |
| 2. 論文標題 Quantum Spin Ice under a [111] Magnetic Field: From Pyrochlore to Kagome | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review Letters | 6. 最初と最後の頁 227204 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.227204 | 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 H. Takatsu, S. Onoda, H. Takatsu, S. Kittaka, A. Kasahara, Y. Kono, T. Sakakibara, Y. Kato, B. Fåk, J. Ollivier, J. W. Lynn, T. Taniguchi, M. Wakita, H. Kadowaki | 4. 巻 116 |
| 2. 論文標題 Quadrupole Order in the Frustrated Pyrochlore Tb2+xTi2-xO7+y | 5. 発行年 2016年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review Letters | 6. 最初と最後の頁 2177201/1-6 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.116.217201 | 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23件（うち招待講演 7件 / うち国際学会 16件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 小野田繁樹 |
| 2. 発表標題 3次元フラストレート磁性体における モノポールの輸送現象の理論 |
| 3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Shigeki Onoda |
| 2. 発表標題 Antisymmetric transport coefficients of magnetic monopoles in quantum spin ice under an electric field |
| 3. 学会等名 American Physical Society March Meeting 2019 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Shigeki Onoda |
| 2. 発表標題 Transport properties of magnetic monopoles in quantum spin ice |
| 3. 学会等名 The 1st NCKU-RIKEN Joint Workshop: International Workshop on Topological Quantum Materials 2019 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Sho Nakosai, Shigeki Onoda |
| 2. 発表標題 Magnetic monopole supercurrent through a quantum spin ice tunnel junction |
| 3. 学会等名 The 1st NCKU-RIKEN Joint Workshop: International Workshop on Topological Quantum Materials 2019 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1 . 発表者名 Shigeki Onoda |
| 2 . 発表標題 Quantum spin ice under an electric field |
| 3 . 学会等名 International Conference on Magnetism 2018 (国際学会) |
| 4 . 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1 . 発表者名 Shigeki Onoda, Sho Nakosai |
| 2 . 発表標題 Magnetic monopoles in quantum spin ice under an electric field |
| 3 . 学会等名 International Conference on Highly Frustrated Magnetism 2018 (国際学会) |
| 4 . 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1 . 発表者名 H. Ueda, S. Onoda, Y. Yamaguchi, T. Kimura, D. Yoshizawa, T. Morioka, M. Hagiwara, M. Hagihala, M. Soda, T. Masuda, T. Sakakibara, K. Tomiyasu, S. Ohira-Kawamura, K. Nakajima, R. Kajimoto, M. Nakamura, Y. Inamura, M. Hase, Y. Yasui |
| 2 . 発表標題 Emergent spin-1 Haldane gap and ferroelectricity in a frustrated spin-1=2 ladder |
| 3 . 学会等名 International Conference on Highly Frustrated Magnetism 2018 (国際学会) |
| 4 . 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1 . 発表者名 Shigeki Onoda, Sho Nakosai |
| 2 . 発表標題 Magnetic monopoles in quantum spin ice under an electric field |
| 3 . 学会等名 International Conference on Highly Frustrated Magnetism 2018 (国際学会) |
| 4 . 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Sho Nakosai, Shigeki Onoda |
| 2. 発表標題 Magnetic monopole supercurrent through a quantum spin ice tunnel junction |
| 3. 学会等名 International Conference on Highly Frustrated Magnetism 2018 (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Sho Nakosai, Shigeki Onoda |
| 2. 発表標題 Josephson Current of Monopolar Spinons through a Quantum Spin Ice Junction |
| 3. 学会等名 American Physical Society March Meeting 2018 (Los Angeles, USA) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Hiroshi Ueda, Shigeki Onoda et al. |
| 2. 発表標題 Emergent spin-1 Haldane gap and ferroelectricity in a frustrated spin-1/2 ladder Rb ₂ Cu ₂ Mo ₃ O ₁₂ |
| 3. 学会等名 American Physical Society March Meeting 2018 (Los Angeles, USA) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 上田宏, 小野田繁樹, 山口泰弘, 木村剛, 吉澤大智, 森岡俊晶, 萩原政幸, 萩原雅人, 左右田稔, 益田隆嗣, 榊原俊郎, 富安啓輔, 河村聖子, 中島健次, 梶本亮一, 中村充孝, 稲村泰弘, 長谷正司, 安井幸夫 |
| 2. 発表標題 フラストレートスピン1/2ラダーRb ₂ Cu ₂ Mo ₃ O ₁₂ に現れるスピン1ハルデンギャップと強誘電性 |
| 3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会 (東京理科大学) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名 中河西翔, 小野田繁樹 |
| 2. 発表標題 量子スピントネル接合系におけるモノポール流 |
| 3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会 (東京理科大学) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Troels Arnfred Bojesen, Shigeki Onoda |
| 2. 発表標題 Quantum spin ice under a [111] magnetic field: from pyrochlore to kagome |
| 3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会 (東京理科大学) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Shigeki Onoda |
| 2. 発表標題 Quest to U(1) quantum spin liquids, valence bond solids, and novel ordered phases in pyrochlores and spinels: unconventional quasiparticles and interference effects |
| 3. 学会等名 Junjiro Kanamori Memorial International Symposium (Univ. of Tokyo, Tokyo) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Shigeki Onoda |
| 2. 発表標題 U(1) quantum spin liquid and valence bond solid ground states of quantum spin ice under a [111] magnetic field |
| 3. 学会等名 International Conference on Low Temperature Physics (Gothenburg, Sweden) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Shigeki Onoda |
| 2. 発表標題 Quest to U(1) quantum spin liquids, valence bond solids, novel ordered phases in pyrochlores and spinels: unconventional quasiparticles and interference effects |
| 3. 学会等名 Topological States and Phase Transitions in Strongly Correlated Systems (Kavli Institute for Theoretical Sciences, Univ. of Chinese Academy of Sciences, Beijing, China) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Shigeki Onoda |
| 2. 発表標題 Quantum spin ice under a [111] magnetic field: from pyrochlore to kagome; |
| 3. 学会等名 Frustrated Magnetism: Conference (Institute of Mathematical Sciences (IMSc), Chennai, India) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Sho Nakosai, Shigeki Onoda |
| 2. 発表標題 Magnetic analogue of superconductivity in the Higgs ferromagnetic phase of quantum spin ice |
| 3. 学会等名 8th International Conference on Highly Frustrated Magnetism (国際学会) |
| 4. 発表年 2016年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Shigeki Onoda |
| 2. 発表標題 Resolving controversies on quantum spin ice: Yb ₂ Ti ₂ O ₇ and Tb ₂ Ti ₂ O ₇ |
| 3. 学会等名 8th International Conference on Highly Frustrated Magnetism (国際学会) |
| 4. 発表年 2016年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Shigeki Onoda, Fumiyuki Ishii |
| 2. 発表標題 First-principles design of the spinel iridate Ir ₂ O ₄ for high temperature quantum spin ice |
| 3. 学会等名 American Physical Society March Meeting 2016 (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Troels A. Bojesen, Shigeki Onoda |
| 2. 発表標題 Quantum spin ice under a [111] magnetic field |
| 3. 学会等名 American Physical Society March Meeting 2016 (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Shigeki Onoda |
| 2. 発表標題 Quantum spin ice under a [111] magnetic field |
| 3. 学会等名 Frustrated Magnetism Workshop (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

| | | |
|---|-----------------------------------|---------------|
| 産業財産権の名称 Generation device and detection device of a monopole current, and memory element using a monopole current | 発明者 Shigeki Onoda, Sho Nakosai | 権利者 理化学研究所 |
| 産業財産権の種類、番号 特許、16/240306 | 出願年 2019年 | 国内・外国の別 外国 |

| | | |
|--|-------------------|---------------|
| 産業財産権の名称 モノポール流の生成装置、検出装置、およびモノポール流を用いるメモリー素子 | 発明者 小野田繁樹、中河西翔 | 権利者 理化学研究所 |
| 産業財産権の種類、番号 特許、2018-000344 | 出願年 2018年 | 国内・外国の別 国内 |

〔取得〕 計0件

〔その他〕

プレスリリース「単極子を制御できる新たな物質」
http://www.riken.jp/pr/press/2019/20190213_1/
プレスリリース「単極子の超固体 - 磁性体における磁化の単極子を制御する - 」
http://www.riken.jp/pr/press/2017/20171114_1/
Monopole current offers way to control magnets
http://www.riken.jp/en/pr/press/2017/20171201_2/
Monopole current offers means to control magnets
http://www.riken.jp/~media/riken/pr/publications/riken_research/2018/rr201803.pdf

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 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|