

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24740221

研究課題名(和文) フラストレートした格子上の強相関伝導電子系の研究

研究課題名(英文) Theoretical study of strongly correlated electron systems on geometrically frustrated lattices

研究代表者

宇田川 将文 (Udagawa, Masafumi)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：80431790

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究計画ではcomplete graphの一つの種類であるパイロクロア格子上における電子系についての解析を行ない、様々な成果を得た。特に、All-in/All-out型磁気秩序相の物性についてドメイン壁の観点から定性的な説明を与え、ドメイン壁の電流による制御可能性を議論した。また、伝導スピンスアイス系におけるモノポールリングと呼ばれる多量体励起の存在可能性と、Pr₂Ir₂O₇において観測された自発ホール効果との関係性の示唆、また、層状パイロクロア化合物においてWeyl半金属由来の表面状態に相互作用を印加した際に生じる可換及び非可換分数量子ホール状態の発現可能性について特筆すべき成果を挙げた。

研究成果の概要(英文)：In this project, I have carried out an extensive analysis on electronic systems on a pyrochlore lattice, one of the lattices classified as complete graph, and obtained several important results. Firstly, we gave an explanation to various properties in a magnetically ordered phase, with all-in/all-out type magnetic order, by focusing on the role of domain walls, and also discussed the controllability of domain wall with electric current. Secondly, I discussed the possible existence of composite excitation, which we call monopole ring, in itinerant spin ice system, and also proposed that this monopole ring excitation may explain the spontaneous Hall effect observed in Pr₂Ir₂O₇. And thirdly, I showed the possible existence of Abelian and non-Abelian fractional quantum Hall effect on the surface of layered pyrochlore systems, as a result of interplay between electron interaction and topological nature of the surface inherited from the Weyl semimetal state realized in the bulk.

研究分野：物性物理学理論

キーワード：幾何学的フラストレーション 量子ホール効果 スピンスアイス

1. 研究開始当初の背景

complete graph の一種であるパイロクロア格子上的強相関効果は長年、大きな興味を持たれて来た課題である。特に研究開始当初では、Ir パイロクロア化合物 $\text{Ln}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ ($\text{Ln}=\text{希土類元素}$) の示す、磁性、多極子秩序、及びトポロジカルな性質が強い関心を集めていた。とりわけ、 $\text{Ln}=\text{Pr}$ に対応する $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ においては自発ホール効果等の興味深い現象が観測され、Pr 磁気モーメントの持つスピナイス相関の役割が注目されていた。また、他の $\text{Ln}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ 系で広く実現が確認された、All-in/All-out 型の磁気秩序についても、秩序相の物性やトポロジカルに非自明な電子状態を誘起する起源として高い注目が集まっていた。

2. 研究の目的

パイロクロア格子上で定義された伝導電子モデルに対して、強相関効果を信頼出来る数値/解析手法によって調べることににより、パイロクロア格子の幾何学特性と電子間相互作用の相乗効果として生じる現象を調べる。また、得られた結果を用いて、Ir パイロクロア化合物について観測された種々の興味深い実験結果の解釈を試みる。

3. 研究の方法

(1) $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ の自発ホール効果を念頭に置いた解析においては、磁場クエンチ後の非平衡動的特性がこの現象において重要な役割を果たすことに着目し、時間発展を追跡する手法を用いた。具体的には、次々近接相互作用までを考慮した $\text{J}_1\text{-J}_2\text{-J}_3$ スピナイスモデルを採用し、非平衡モンテカルロ法を用いて磁場クエンチ後の磁化及びモノポール密度の時間発展を追跡した。

(2) All-in/All-out 磁性体の物性を調べるために、ドメイン壁の果たす役割に注目して解析を行なった。また、系に電流を流すことによりドメイン壁の安定性を制御する試みを行なった。これらの目的のために、電流の効果を飛び移り積分のパイエルス位相の効果として取り込んだパイロクロア格子上的ハバードモデルを採用し、非制限 Hartree-Fock 法での解析を行なった。

(3) All-in/All-out 型の磁気秩序に誘起されて、 $\text{Ln}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ において安定化する可能性が盛んに議論されている Weyl 半金属状態における電子間相互作用効果を調べた。特に、Weyl 半金属由来の表面状態への短距離相互作用の効果に注目し、層状パイロクロア格子上で定義されたラシュバスピ軌道相互作用入りの tight-binding 模型を用いて、その表面状態に射影した近接相互作用の効果を厳密対角化法を用いて調べた。特に、分数量子ホール状態の発現に注目した解析を行なった。

4. 研究成果

(1) $\text{J}_1\text{-J}_2\text{-J}_3$ スピナイスモデルにおいて、安定性の高い非平衡状態の分類を行なった。特に、 $\text{J}_2=\text{J}_3>0$ の領域において、monopole jellyfish 励起と我々が名付けた多量体励起が安定的に存在することを確かめた。Monopole jellyfish 励起はカイラリティの自由度を有する励起状態である。この自由度のために、時間反転対称性の破れを記憶する媒体としての役割を果たすことが出来、 $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ における自発ホール効果の起源として重要な役割を果たす可能性が期待される。

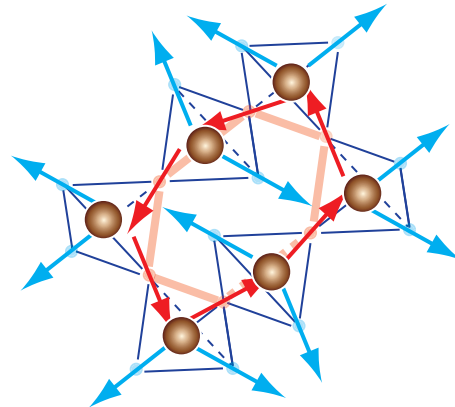


図: Monopole jellyfish 励起

(2) All-in/All-out 磁性体において、ドメイン壁近傍に生じる低エネルギー状態が電気抵抗の温度依存性における shoulder 的な構造の起源となる可能性を論じた。また、パイロクロア格子の点群対称性を考慮することにより、All-in/All-out 秩序パラメータの空間変調と電流密度の結合項が自由エネルギーに存在することを示し、電流によってドメイン壁生成をコントロールする可能性について論じた。

(3) All-in/All-out 秩序を初めとする磁気秩序に誘起される Weyl 半金属状態における電子間相互作用の効果についての一般的考察

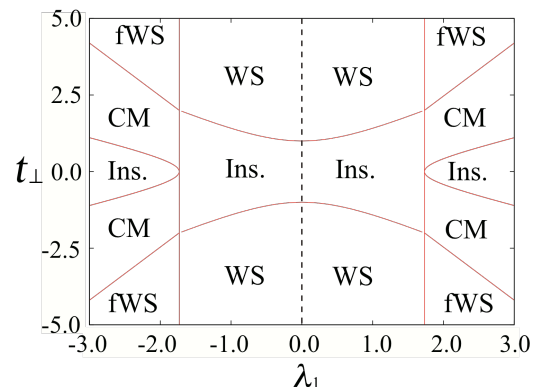


図: パイロクロア模型の相図

を行なった。とりわけ、Weyl 半金属状態に由来する表面状態が電子相関の影響下におかれた時、トポロジカルに非自明な多体電子状態が生じる可能性を厳密対角化法により解析した。特に、基底状態の縮重度と flux 依存性に関連して、可換及び非可換量子ホール状態発現の可能性を見出した。

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 15 件)

① Ryo Ozawa, Masafumi Udagawa, Yutaka Akagi and Yukitoshi Motome, Surface and Interface Effects on a Magnetic Chern Insulator, Journal of Physics: Conference Series, 査読有, 592, 2015, 012130
DOI: 10.1088/1742-6596/592/1/012130

② Joji Nasu, Masafumi Udagawa and Yukitoshi Motome, Low-energy Majorana States in Spin-liquid Transitions in a Three-dimensional Kitaev Model, Journal of Physics: Conference Series, 査読有, 592, 2015, 012115
DOI: 10.1088/1742-6596/592/1/012115

③ Masafumi Udagawa and Yukitoshi Motome, Entanglement Spectrum in Cluster Dynamical Mean-Field Theory, Journal of Statistical Mechanics, 査読有, 2015, 2015, P01016
DOI: 10.1088/1742-5468/2015/01/P01016

④ E. J. Bergholtz, Zhao Liu, M. Trescher, R. Moessner, M. Udagawa, Topology and Interactions in a Frustrated Slab: Tuning from Weyl Semimetals to $C>1$ Fractional Chern Insulators, Physical Review Letters, 査読有, 114, 2015, 016806
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.016806>

⑤ Masafumi Udagawa and Emil J. Bergholtz, Correlations and Entanglement in Flat Band Models with Variable Chern Numbers, Journal of Statistical Mechanics, 査読有, 2014, 2014, P10012
DOI: 10.1088/1742-5468/2014/10/P10012

⑥ J. Nasu, T. Kaji, K. Matsuura, M. Udagawa and Y. Motome, Finite-Temperature Phase Transition to a Quantum Spin Liquid in a Three-Dimensional Kitaev Model on a Hyperhoneycomb Lattice, Physical Review B, 査読有, 89, 2014, 115125
DOI: [http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.89.1](http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.89.115125)

15.125

⑦ Ryo Ozawa, Masafumi Udagawa, Yutaka Akagi and Yukitoshi Motome, Reconstruction of Chiral Edge States in a Magnetic Chern Insulator, Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, 83, 2014, 073706
DOI: <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.83.073706>

⑧ Joji Nasu, Masafumi Udagawa and Yukitoshi Motome, Vaporization of Quantum Spin Liquids, Physical Review Letters, 113, 2014, 197205.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.113.197205>

⑨ Y. Yanase, S. Takamatsu and M. Udagawa, Spin-orbit Coupling and Multiple Phases in Spin-triplet Superconductor Sr₂RuO₄, Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, 83, 2014, 061019
DOI: <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.83.061019>

⑩ Yutaka Akagi, Masafumi Udagawa and Yukitoshi Motome, Linear Spin Wave Analysis for General Magnetic Orders in the Kondo Lattice Model, Journal of the Physical Society of Japan, Conference Proceedings, 査読有, 3, 2014, 014017
DOI: 10.7566/JPSCP.3.014017

⑪ Hiroaki Ishizuka, Masafumi Udagawa and Yukitoshi Motome, Monte Carlo Study of an Effective Ising Model for the Spin-ice type Kondo Lattice Model, Journal of the Physical Society of Japan, Conference Proceedings, 査読有, 3, 2014, 014013
DOI: 10.7566/JPSCP.3.014013

⑫ Masafumi Udagawa, Hiroaki Ishizuka and Yukitoshi Motome, Invariant Energy Levels and Flat Band Engineering in a Kondo Lattice Model on Geometrically Frustrated Lattices, Conference Proceedings, 査読有, 3, 2014, 014009
DOI: 10.7566/JPSCP.3.014009

⑬ Yutaka Akagi, Masafumi Udagawa and Yukitoshi Motome, Effect of Quantum Spin Fluctuation on Scalar Chiral Ordering in the Kondo Lattice Model on a Triangular Lattice, Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, 82, 2013, 123709
DOI: 10.7566/JPSJ.82.123709

⑭ Hiroaki Ishizuka, Masafumi Udagawa and Yukitoshi Motome, Polynomial Expansion Monte Carlo Study of Frustrated Itinerant Electron Systems: Application to a Spin-ice type Kondo Lattice Model on a Pyrochlore Lattice, Computer Physics Communications, 査読有, 184, 2013, 2684 DOI: 10.1016/j.cpc.2013.07.009

⑮ Masafumi Udagawa and Roderich Moessner, Anomalous Hall effect from frustration-tuned scalar chirality distribution in Pr₂Ir₂O₇, Physical Review Letters, 査読有, 111, 2013, 036602/1-5 DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.036602>

[学会発表] (計 23 件)

① Masafumi Udagawa, Emergent Collective Excitations and Anomalous Dynamics of Spin Ice with Short-range Interaction, DSCS2015, 2015 3/30, ISSP, Kashiwa

② 宇田川 将文, 遍歴電子系における幾何学的フラストレーション効果の理論的研究, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015 3/21, 早稲田大学

③ 宇田川 将文, 層状 Weyl 半金属系における電子間相互作用効果, CMSI ワークショップ「実験と計算科学の協奏が拓く物質科学・物質開発のフロンティア」, 2015 3/18, 東京大学

④ Masafumi Udagawa, Topological defects and composite excitations in pyrochlore conductors, International conference on topological quantum phenomena, 2014 12/17, Kyoto

⑤ 宇田川 将文, パイロクロア伝導体のトポロジカル欠陥, 九州工業大学ワークショップ, 2014 11/21, 九州工業大学

⑥ Masafumi Udagawa, Novel routes for monopole freezing in spin ice, YITP Long-term workshop: Novel Quantum States in Condensed Matter 2014, 2014 11/10, Kyoto

⑦ 宇田川 将文, パイロクロア伝導体のトポロジカル欠陥, 首都大学東京ワークショップ, 2014 9/26, 首都大学東京

⑧ 宇田川 将文, All-in/All-out 型磁性体における電流によるドメイン形成, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014 9/9, 中部大学

⑨ 宇田川 将文, Novel routes for monopole

freezing in spin ice, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014 9/9, 中部大学

⑩ Masafumi Udagawa, Transport theory of pyrochlore conductors, HFM 2014, 2014 7/7, Cambridge

⑪ Masafumi Udagawa, Current-driven domain wall creation in All-in/All-out magnets, NHSCP, 2014 7/1, ISSP

⑫ Masafumi Udagawa, Transport theory of pyrochlore conductors, NQMP, 2014 5/14, OIST

⑬ Masafumi Udagawa, Itinerant Spin Ice, APS March Meeting, 2014, 3, 3, Denver

⑭ Masafumi Udagawa, Topological defects in pyrochlore conductors, International Workshop of Young Researchers on Topological Quantum Phenomena, 2013 10/26, Okinawa

⑮ 宇田川 将文, パイロクロア伝導系の all-in/all-out 秩序相における磁性と伝導現象, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 9/26, 徳島大学

⑯ 宇田川 将文, ライングラフ上で定義された Hubbard model の強相関極限の性質, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 9/25, 徳島大学

⑰ Masafumi Udagawa, Transport theory of spin ice conduction systems, The international conference on strongly correlated electron systems, 2013 8/9, Tokyo University

⑱ 宇田川 将文, スピンアイス伝導系の異常ホール効果, 物性研共同利用・CCMS・元素戦略合同研究会「計算物性物理学の新展開」, 2013 1/11, 物性研究所

⑲ 宇田川 将文, スピンアイス伝導系の輸送現象と動的応答, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 9/21, 横浜国立大学

⑳ 宇田川 将文, フラストレート伝導系における空間的に乱れたスピン構造に起因する異常ホール効果, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 9/21, 横浜国立大学

㉑ 宇田川 将文, スピンアイス伝導系の非従来型異常ホール効果の理論, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 9/21, 横浜国立大学

㉒ Masafumi Udagawa, Transport theory of

conduction electron systems, CTTCM, 2013
9/12, 理化学研究所

㉓ Masafumi Udagawa, Non-Kondo
resistivity minimum in spin ice conduction
systems, International workshop on
itinerant spin-orbital systems, 2012 5/22,
Dresden

〔図書〕（計 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宇田川 将文 (UDAGAWA MASAFUMI)

東京大学・工学系研究科・助教

研究者番号：80431790

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：