

令和元年5月14日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14326

研究課題名(和文)層状ルテニウム酸化物から探る量子異常とトポロジー

研究課題名(英文)Quantum anomaly and topology in layered ruthenates

研究代表者

延兼 啓純(Nobukane, Hiroyoshi)

北海道大学・理学研究院・助教

研究者番号：60550663

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：層状ルテニウム酸化物超伝導体薄膜Sr₂RuO₄における電子輸送特性を調べることで、チャーン不変量によって特徴づけられた数理論構造を明らかにした。外部磁場なしで分数量子ホール抵抗、及び磁場印加による層間方向における分数電気分極効果を観測した。これらの結果は、量子異常に起因した分数トポジカル電気磁気効果であることを提案した。

Ca₂RuO₄薄膜において高温超伝導(オンセットT_c~96K)を発見した。2次元超伝導に特徴的なBerezinskii-Kosterlitz-Thouless転移を観測した。またバイアス電流及び膜厚依存性を持つ超伝導-絶縁体転移とその臨界指数を実験的に明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年トポロジ-を切り口とした物性研究が盛んに研究されている。その中でもスピン三重項超伝導・超流動は最も興味深い研究分野の一つである。スピン三重項超伝導微小試料内で実現する量子異常による新奇量子状態を微細加工や測定手法により制御することでトポロジーや双対性、非可換性物理の開拓に繋がる。

これまでルテニウム酸化物における高温超伝導は実験的に報告されておらず、本研究における成果は初めて得られたものである。“室温超伝導の実現”は21世紀物理学への大きな問いかけであり、高温超伝導研究、室温超伝導の探索にナノ技術が加わることでT_cを制御する新たな転換となることが期待される。

研究成果の概要(英文)：We report the observation of a Chern structure in the Bose-insulating phase of Sr₂RuO₄ nanofilms by employing electric transport. Fractional quantized conductance was observed without an external magnetic field. We found an anomalous induced voltage with temperature and thickness dependence, and the induced voltage exhibited switching behavior when we applied a magnetic field. We suggest that there was fractional magnetic-field-induced electric polarization in the interlayer.

We report the realization of high-temperature superconductivity in Ca₂RuO₄ nanofilm single crystals. A Ca₂RuO₄ thin-film exhibits zero resistance and typical Berezinskii-Kosterlitz-Thouless transition behavior where the highest onset temperature 96 K is observed in electric transport measurements. We also found that the induced bias current and the tuned film thickness cause a superconductor-insulator transition.

研究分野：低次元電子物性

キーワード：スピン三重項超伝導 トポロジー 量子アノマリー 高温超伝導

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、量子異常によって説明可能な普遍数理構造がいくつかの物性実験において発見されている。例えば、(2+1)次元ディラックフェルミオン場における整数/分数量子ホール効果はその一つである。量子異常とは、ある2つの対称性(例えばゲージ対称性と鏡映対称性)があったとすると、古典論では両方の対称性を満たす場合でも、場の量子化の過程でゲージ対称性を保持しようとするともう一方の鏡映対称性が破れる現象のことである。そもそも量子異常が目されたきっかけは中性中間子が2光子へ崩壊する現象を(3+1)次元における軸対称性の量子異常(カイラルアノマリー)で説明できたことにある。(2+1)次元での量子異常はパリティアノマリーと呼ばれ、物性系における量子ホール効果を良く説明することが分かっている。この量子異常が最も興味深い点はトポロジカルな性質が背後に潜んでいることにある。ラグランジアン形式の作用にはチャーン・ポントリヤギン(CP)項(空間1, 3次元の場合)やチャーン・サイモン(CS)項(空間2次元の場合)のトポロジカル項が誘起される。この項の存在により、観測される物理量は量子化され、チャーン不変量 N が現れる。量子ホール効果の場合は、コンダクタンスが量子化され $\sigma_{xy} = (e^2/h)N$ となる。これまで空間次元を下げた(2+1)次元や(1+1)次元の量子異常に関する場の量子論は“トイモデル”であったが、量子ホール効果の発見を発端とした物性系における低次元導体などの物質創成や微細加工・測定技術の進歩により物性実験において量子異常とトポロジーの普遍数理構造を調べることが可能となった。

2. 研究の目的

本研究ではデバイス加工や測定法を工夫することで層状ルテニウム酸化物超伝導体における1次元エッジ伝導、2次元量子ホール伝導、3次元層間伝導をそれぞれ選択的に観測し、各空間次元に対応する量子異常とそのトポロジーを実証する。

3. 研究の方法

スピン三重項超伝導体 Sr_2RuO_4 における量子異常とトポロジーを明らかにするために、電子輸送測定によりホール・エッジ・層間伝導の観測、特に量子化伝導とプラトーのトポロジカルチェンジの有無を調べた。また輸送特性の膜厚依存性を調べた。

ルテニウム酸化物の普遍的なトポロジカル量子物性を明らかにするために Sr_2RuO_4 の微小単結晶作成のノウハウを活かして、SrをCaに置換した Ca_2RuO_4 の薄膜単結晶の作成に取り組み、その電子輸送特性を調べた。

4. 研究成果

1. 層状ルテニウム酸化物 Sr_2RuO_4 、 Ca_2RuO_4 の微小単結晶の作成とデバイス作製

層状ルテニウム酸化物の微小単結晶試料は固相反応法にて作成した。これまでの研究成果により Sr_2RuO_4 の作成に成功しており、本研究ではそのノウハウを参考に電気炉装置を整備し、新たに Ca_2RuO_4 の作成を精力的に行った。作成した試料のX線結晶解析や組成分析を行い、良質な単結晶が作成できていることを明らかにした。また、ルテニウム酸化物の合成を試みた過程で、新規ルテニウム酸化物を合成するための知見が多く得られた。

この得られた試料をSEMによる観察、電子ビームリソグラフィやマイクロマニピュレーターを使うことで数 $\mu m \times$ 数 μm サイズの微小結晶に電極を作製した。輸送測定の膜厚依存性を詳細に調べるために、基板の上にピックアップした微小結晶から異なる膜厚試料を選び出すことに注力した。

2. (1+1)次元マヨラナエッジ伝導

スピン三重項カイラルp波超伝導体とされる Sr_2RuO_4 の単ドメインサイズの試料にFIB装置を用いてウィークリンクを作成し、その輸送特性を調べた。量子化抵抗 $h/4e^2 = 6.45k$ から $h/e^2 = 25.8k$ を観測することに成功した。FIB加工による伝導パスのサイズとエッジ伝導の関係から1次元的なマヨラナエッジ伝導が実現できている可能性がある。この結果は今後外場制御によりマヨラナフェルミオンの非可換統計性を明らかにできる可能性を示唆している。

3. (2+1)次元量子ホール伝導

(2+1)次元カイラル超伝導における量子ホール効果の観測を目的として、微小かつ膜厚が異なる

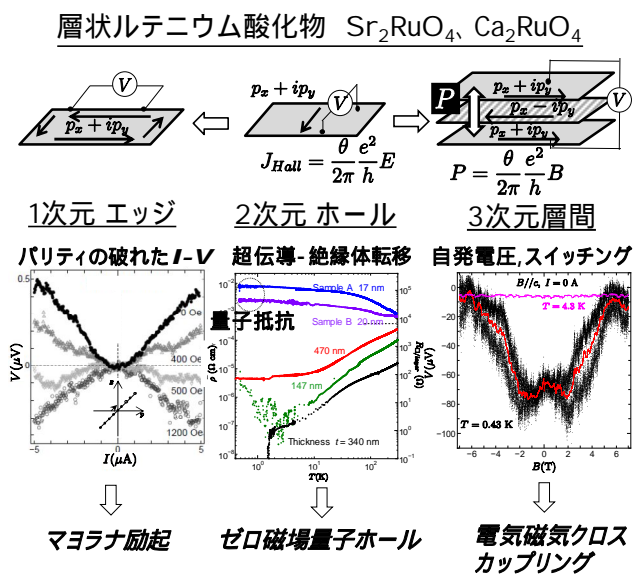


図1：空間次元に対応した Sr_2RuO_4 の量子異常現象

る複数個の Sr_2RuO_4 における輸送測定を行った。 T_c 以下のゼロ磁場において分数量子ホール抵抗を観測した。(1+1)次元で観測された量子抵抗と2次元ホール抵抗の係数の値を比較することでバルク・エッジ対応が議論できるかを検討した。この超伝導状態における量子ホール抵抗の出現の起源は、(2+1)次元の場の量子論や超流動ヘリウム3薄膜の理論研究において予言されているトポロジカルなチャーン・サイモン項の誘起による量子ホール伝導であると考えている。しかし一方で当初目標としていた外場制御による量子ホールプラトーとトポロジカルチェンジの観測には至らなかった。電極の配置等、今後改善すべき課題が明らかになった。膜厚依存性を調べることで2次元超伝導 - 絶縁体転移と量子面抵抗を観測した。また当初の計画では想定していなかったが、膜厚を変えることで T_c を制御できることを見出した。近年の研究では一軸性圧力によって T_c がバルクの $T_c=1.5\text{K}$ から 3.5K へ上昇することが報告されており、今後この T_c の上昇に関する未解決問題とスピン三重項超伝導体 Sr_2RuO_4 のペアリング機構の解明に微小単結晶を対象とした研究が重要になると考えている。

4.(3+1)次元トポロジカル電気磁気現象

我々は $T_c=3\text{K}$ 以下において自発電圧を観測した。この自発電圧 V は膜厚依存性があり、膜厚を薄くするにつれて増加した。これは自発電圧が熱起電力や試料中のマイクロクラックなどに因るものではなく、膜厚に依存したカイラル超伝導の本質的な現象あることを意味している。また、2次元伝導面に垂直に磁場を印加したところ自発電圧のスイッチング現象を観測した。このスイッチングは自発電圧と同様に 3K 以下で観測されている。我々はこれらの特異な現象が、電場 E と磁場 B のカップリングによって説明できることを提案した。

5. Ca_2RuO_4 薄膜単結晶における高温超伝導

Ca_2RuO_4 薄膜単結晶において高温($\sim 100\text{K}$)超伝導を発見した(図2)。これは当初の計画では想定していなかった興味深い結果である。これまで遷移金属酸化物のなかで高温超伝導になる物質は銅酸化物のみであり、ルテニウム酸化物では初めてである。この物質の注目すべき点は銅と比較して、強磁性的なスピン相関が強いためその超伝導状態はスピン三重項(平行ペア)となる可能性が理論的に指摘されていることである。銅酸化物超伝導体とは全く異なるメカニズムで高温超伝導となっている可能性があり、大変興味深い。今まで発見されなかった理由は超伝導が微小領域にできているからと考えられる。バルク結晶 Ca_2RuO_4 は Mott 絶縁体を示すが、これは“正の圧力(結晶圧)”を受け、層状ペロブスカイト構造における RuO_6 八面体構造の歪み(扁平、傾き、回転)によるものである。これに対して薄膜化(ナノ結晶化)することで層状結晶に“負の圧力効果”が働くことにより八面体の歪みが解消され、その電子状態が絶縁体から超伝導へ劇的に相転移している。この結果とアイデアはこれまでの超伝導研究にはなかった我々のオリジナル研究である。

バイアス電流及び試料膜厚をそれぞれ制御することで Ca_2RuO_4 微小単結晶における2次元超伝導 - 絶縁体転移を観測し、量子臨界面抵抗と臨界指数 z を実験的に明らかにした。2次元超伝導に特有な Berezinski-Kosterlitz-Thouless (トポロジカル) 転移が生じていることを抵抗の温度依存性および電流 - 電圧特性から明らかにした。

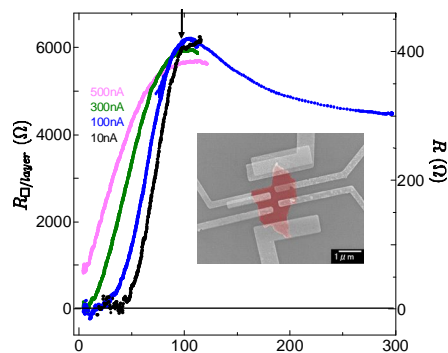


図2：ナノスケール単結晶 Ca_2RuO_4 における超伝導特性(ゼロ抵抗) $T_c \sim 100\text{K}$ 。
電極付された Ca_2RuO_4 微小単結晶(挿入図)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 1 件)

1. H. Nobukane, T. Matsuyama, S. Tanda, "Chern structure in the Bose-insulating phase of Sr_2RuO_4 nanofilms", Scientific Reports, **7** 41291(1)-(8) (2017). 査読有
DOI: 10.1038/srep41291

[学会発表](計 21 件)

1. 延兼啓純、田畑裕一、黒澤徹、酒部大樹、丹田聡 “鉄ドーピング NbS_2 における近藤効果とスピンガラスの共存” 日本物理学会 2019 年第 74 回年次大会、九州大学伊都キャンパス、2019 年 3 月 14 ~ 17 日、口頭発表
2. H. Nobukane, "Fractional Chern invariant in a Sr_2RuO_4 nanofilm", Japanese-Russian JSPS-RFBR project, February 20 2019, Hokkaido University, Oral presentation
3. 延兼啓純、柳原興世、國貞雄治、小笠原優仁、磯野翔、野村一成、能村貴宏、秋山友宏、浅野泰寛、丹田聡, “ルテニウム酸化物における超伝導 - 絶縁体転移と臨界指数”, 日本

- 物理学会 2018 年秋季大会、同志社大学京田辺キャンパス、2018 年 9 月 9～12 日、口頭発表
4. 近藤広康, 高品博光, 延兼啓純, 中村一, 中津川啓治, 市村晃一, 黒澤徹, 丹田聡 “1T-TaS₂ 薄膜試料の磁気抵抗とホール抵抗測定” 日本物理学会 2018 年秋季大会、同志社大学 京田辺キャンパス、2018 年 9 月 9～12 日、口頭発表
 5. H. Nobukane, K. Yanagihara, Y. Kunisada, Y. Ogasawara, K. Isono, K. Nomura, T. Nomura, T. Akiyama, Y. Asano and S. Tanda, 12th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors (M2S-2018) August 19-24, 2018 Beijing, China, Poster presentation
 6. 小笠原優仁、柳原興世、延兼啓純、國貞雄治、野村一成、能村貴宏、秋山友宏、浅野泰寛、丹田聡 “ナノスケール Ca₂RuO₄ 単結晶における BKT 転移の観測” 日本物理学会 2018 年第 73 回年次大会、東京理科大学 野田キャンパス、2018 年 3 月 22～25 日、口頭発表
 7. 中村一, 延兼啓純, 近藤広康, 市村晃一, 丹田聡 “へき開薄膜化した層状銅酸化物絶縁体の輸送現象” 日本物理学会 2018 年第 73 回年次大会、東京理科大学 野田キャンパス、2018 年 3 月 22～25 日、口頭発表
 8. 近藤広康, 中村一, 延兼啓純, 中津川啓治, 市村晃一, 黒澤徹, 丹田聡 “1T-TaS₂ 薄膜試料の磁気抵抗とホール抵抗測定” 日本物理学会 2018 年第 73 回年次大会、東京理科大学 野田キャンパス、2018 年 3 月 22～25 日、口頭発表
 9. H. Nobukane, K. Yanagihara, Y. Kunisada, Y. Ogasawara, K. Nomura, T. Nomura, T. Akiyama, Y. Asano and S. Tanda, "Observation of two dimensional high-Tc superconductivity in a Ca₂RuO₄ nanofilm single crystal", The APS March Meeting 2018 March 5-9 2018, Los Angeles, California, Oral presentation
 10. H. Nobukane, K. Yanagihara, Y. Kunisada, Y. Ogasawara, K. Nomura, T. Nomura, T. Akiyama, Y. Asano and S. Tanda, "Observation of two dimensional high-Tc superconductivity in a Ca₂RuO₄ nanofilm", Topological Matter and Flat Bands Conference 2017, August 17-20 2017, Leipzig, Germany, Oral presentation
 11. 延兼啓純、柳原興世、國貞雄治、小笠原優仁、野村一成、能村貴宏、秋山友宏、浅野泰寛、丹田聡, “2 次元 Ca₂RuO₄ における高温超伝導”, 日本物理学会 2017 年秋季大会、岩手大学、2017 年 9 月 21～24 日、口頭発表

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ

北海道大学大学院理学研究院物理学部門低次元電子物性研究室ホームページ内

<http://exp-ap.eng.hokudai.ac.jp/~nobukane/wiki/index.php>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名:

ローマ字氏名:

所属研究機関名:

部局名:

職名:

研究者番号 (8 桁):

(2) 研究協力者

研究協力者氏名:

ローマ字氏名:

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。