

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25800183

研究課題名(和文)カイラル超伝導体におけるトポロジカル不変量

研究課題名(英文)Topological invariant in chiral superconductors

研究代表者

延兼 啓純 (Nobukane, Hiroyoshi)

北海道大学・理学(系)研究科(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) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：ナノスケールSr₂RuO₄単結晶を作成しその電子輸送を調べ、カイラル超伝導体のトポロジカル(チャーン)不変量によって特徴づけられる物理量の観測に成功した。試料エッジにおいてパリティを破る電流-電圧特性とゼロバイアスコンダクタンスピークを観測した。ゼロ磁場において2次元超伝導状態に起因する量子ホール抵抗を観測した。これはトポロジカルなチャーン・サイモン項の誘起による量子効果である。T_c以下において自発電圧を観測した。磁場中で自発電圧のスイッチング現象を観測した。これらの起源として3次元層間方向の伝導におけるトポロジカル電気磁気効果を提案した。トポロジカル項のアキシオン角 $\theta = \pi/6$ を決定した。

研究成果の概要(英文)：We report the topological invariant in Sr₂RuO₄ nanoscale single crystals by measuring the electric transport properties. We observed the parity violation of current-voltage curves due to the excitation of the Majorana-Weyl fermions along the one-dimensional chiral edge current of single domain Sr₂RuO₄. In the absence of an external magnetic field, the two-dimensional surface transport in Sr₂RuO₄ thin films exhibited a fractional quantum Hall conductance in the superconducting state. The fractional magnetic-field-induced electric polarization was observed under zero bias current as the three-dimensional interlayer conduction. The fractional axion angle $\theta = \pi/6$ is determined by observing the topological magneto-electric effect in Sr₂RuO₄ nanocrystals.

研究分野：低次元電子物性

キーワード：カイラル超伝導 量子アノマリー チャーン不変量

1. 研究開始当初の背景

素粒子物理と固体物理の現象はそれぞれ全く異なる長さスケールやエネルギースケールで起こり、一見関連しない。しかし、驚くべきことにこれらの現象を表す理論構造にトポロジーによる普遍数理があることが示唆されている。例えば、中性 π 中間子の2光子への崩壊率や2次元電子系における量子ホール効果に関する解釈は、どちらも量子異常によりラグランジアン形式にチャーン・ポントリアギン(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)等のトポロジカル項が誘起することで説明可能である。しかし、これまでにトポロジーに関する普遍数理構造を物性実験により検証する方法は少なかった。これに対してグラフェン中のディラックフェルミオンによる量子ホール効果の発見を発端としてディラック場やその普遍数理構造に関する研究が精力的に行われている。これは大規模な高エネルギー加速器実験だけでなく、身近な実験室で場の量子論に関する検証実験を行うことが可能となることを意味する。

我々は固体中のマヨラナ場に注目している。ディラック方程式と同じ形式で記述されるマヨラナフェルミオンは、粒子と反粒子が同一視されるスピン1/2粒子である。現在、ニュートリノはその質量の発見によりマヨラナフェルミオンであることが有力視されている。しかし、まだ確定していない。果たして固体中にマヨラナ場は存在し、ディラック場と同様にトポロジーに関する普遍数理構造はあるだろうか。またトポロジカル不変量はどのような値をとるだろうか。物性実験はトポロジーによる普遍性から素粒子物理の未解決問題へ示唆を与える可能性を秘めている。また応用面の観点からもマヨラナフェルミオンの非可換統計性による量子計算が理論的に提案され、重要な研究対象となっている。

Sr_2RuO_4 は、様々な実験結果からスピン三重項($S=1$)、カイラル p 波($L=1$)の存在が強く示唆される超伝導体であり、カイラル超伝導状態のトポロジカル不変量を探索するのに最も良い物質の一つである。クーパー対の内部自由度に起因したカイラルドメインが形成され、その単一ドメインサイズは1~10 μm 程度であることが明らかになってきた。ここで、カイラル単一ドメインとは試料中のクーパー対の軌道成分に注目した場合、軌道運動方向が時計回りまたは反時計回りのみの領域のことである。もしmmサイズのバルク試料においてマルチドメインが自発的に形成された場合、平均化により Sr_2RuO_4 に特有の物理現象が観測できない可能性がある。我々はこれまでに単一ドメインサイズの試料における物性実験の重要性に注目し、数 μm の Sr_2RuO_4 を用いて電子輸送測定を行ってきた。

2. 研究の目的

カイラル超伝導体中のマヨラナ(ワイル)場におけるトポロジカル不変量を探索する。これまでに単一ドメインサイズの Sr_2RuO_4 において、パリティの破れた電流-電圧特性を初めて観測した。本研究では進展として試料へ6端子の電極を取り付け、ホール及び縦(エッジ)方向の電圧を詳細に測定する。ゼロ磁場下での量子ホール抵抗や量子エッジ抵抗とその係数值(トポロジカル不変量)をそれぞれ明らかにする。

3. 研究の方法

単一ドメインサイズとされる微小 Sr_2RuO_4 単結晶におけるホール及び縦方向の電子輸送測定を行う。6端子電極を用いてホール・縦(エッジ)抵抗をそれぞれ詳細に測定し、CS項付きのゼロ磁場量子ホール効果やトポロジカル渦構造とそのダイナミクスを調べる。

4. 研究成果

本研究では、図1に示すような1次元エッジ伝導、2次元ホール伝導、3次元トポロジカル電気磁気効果をカイラル p 波超伝導体 Sr_2RuO_4 の微小単結晶において観測することに成功した。

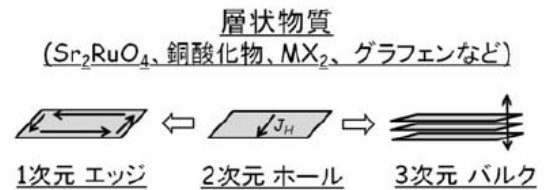


図1: 層状物質におけるトポロジカル量子現象とその次元性.

(1) カイラル単一ドメインサイズ Sr_2RuO_4 単結晶への電極作製

カイラル p 波超伝導体 Sr_2RuO_4 の微小単結晶は、固相反応法にて作成した。一般的に、この作成方法ではミリメートルスケールの大きな単結晶を作成することは困難であるが、マイクロ・ナノメートルサイズの単結晶を作成することができる。我々は、組成分析及び結晶方位解析により作成した結晶が良質な単結晶であることを確認した。超音波分散による粉碎や劈開法を用いて $\text{SiO}_2(300\text{nm})/\text{Si}$ 基板上に微小 Sr_2RuO_4 をマニピュレートした。本研究では、伝導面の大きさが数 μm かつ厚さが15~400nmの試料を選択的に取り出した。これらの試料に対して電子ビームリソグラフィーを用いて金電極を作製した(図2)。電子輸送測定では、微小試料と電極間の電氣的接触の良し悪しが重要である。そこで我々は、SEM試料室内で試料上の金電

極に局所的に電子線を照射し、試料と電極間を溶着することで接触抵抗を十分小さくすることに成功した。

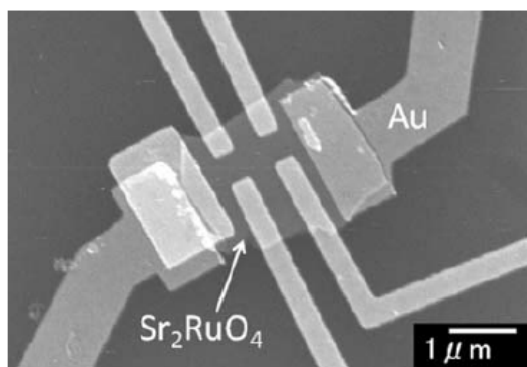


図2: 金電極が取り付けられた微小結晶 Sr₂RuO₄ の電子顕微鏡写真

(2) パリティの破れた電流-電圧特性とゼロバイアスコンダクタンスピーク: 1次元マヨラナエッジ伝導

まず、カイラル *p* 波超伝導体 Sr₂RuO₄ の単一ドメインサイズ試料において観測されたパリティの破れた電流-電圧 (*I*-*V*) 特性を報告する。全ての *I*-*V* 特性において発生電圧 *V* が印加電流 *I* に対して偶関数となっている。この結果は単一ドメインサイズにすることによって初めて明らかになったパリティの破れた *I*-*V* 特性である。また *c* 軸に平行に 0.0e から 1.2 0 0.0e へ磁場を印加したとき、4.5 0.0e 付近を境として印加電流の向きにかかわらず、正電圧の発生 (すなわち $V(+I) = V(-I)$) から、負電圧の発生 ($-V(+I) = -V(-I)$) へ、系統的な変化を観測した。これは、Sr₂RuO₄ 試料自身がカイラルな単一ドメインであり、ゼロ磁場で自発磁化していること、また外部磁場印加によってドメインのカイラリティが変化していることを示している。また、*T_c* 以下でゼロバイアスコンダクタンスピークを観測した。我々はこれらの結果から試料エッジでは1次元のカイラルマヨラナ状態が存在し、バイアス電流を印加することでマヨラナフェルミオンの励起が生じていることを提案している。集束イオンビーム加工により試料エッジに現れるマヨラナフェルミオンを制御することで、量子演算素子へ応用できる可能性がある。

(3) 量子ホールコンダクタンス: 2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20nmと薄いSr₂RuO₄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量子ホール

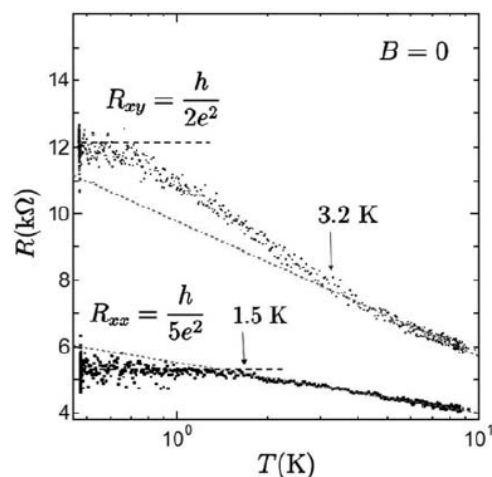


図3: ゼロ磁場における量子抵抗 R_{xy} , R_{xx}

抵抗を観測した (図3)。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。このカイラル超伝導体 Sr₂RuO₄ におけるゼロ磁場量子ホール抵抗が本質的な現象であることを確かめるために、膜厚の異なる試料を複数個準備し、測定を行った。興味深いことに2次元伝導面 (RuO₂面) が10-30層の試料では基底状態で量子ホール抵抗 ($h/4e^2 \sim h/2e^2$) を示した。一方、伝導面が100層以上の肉厚試料ではホール抵抗値は量子抵抗より十分小さかった。 R_{xx} は ($h/4e^2$) に近く2次元超伝導-絶縁体転移近傍の量子臨界面抵抗を観測した。また、膜厚が数百nmの試料の *T_c* は、これまでに報告されているバルク Sr₂RuO₄ と同じ 1.5K であったのに対して、薄膜試料 (20nm) では約 3 ~ 3.5K 付近で超伝導転移が起きていることがわかった。この約 3 K への *T_c* の上昇は、Sr₂RuO₄-Ru 共晶において報告されていた。ところが近年の研究では、純良な Sr₂RuO₄ であっても *c* 軸方向への一軸性圧力やナノスケール結晶転位近傍において *T_c* が 1.5K から 3 K へ上昇することが報告されている。我々の Sr₂RuO₄ 微小薄膜では 3 K 以下で超伝導が表面に核生成され、1.5 K で試料全体 (バルク) が超伝導となると考えている。つまり、この *T_c* の上昇に関する未解決問題、特にカイラル *p* 波超伝導のペアリング機構の解明に Sr₂RuO₄ 微小単結晶を対象とした研究が重要であることを示唆している。

(4) 自発電圧とスイッチング現象: 3次元トポロジカル電気磁気効果

我々は $T_c = 3$ 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 t 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で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 ± 1 T から ± 5 T の範囲内で自発電圧のスイッチング現象を観測した (図4). このスイッチング現象も自発電圧と同様に 3 K 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. まず、層状ペロブスカイト構造である Sr_2RuO_4 の層間方向を微小ジョセフソン接合として考えたところ、磁場 B に対する電気分極 P は $P/B = (1/12)e^2/h$ となった. また、興味深いことに各温度で低磁場での $E \cdot B$ の値は磁場中のスイッチング領域における $E \cdot B$ (菱形の領域) と同値となることがわかった. これはトポロジカル不変量がもたらすコ

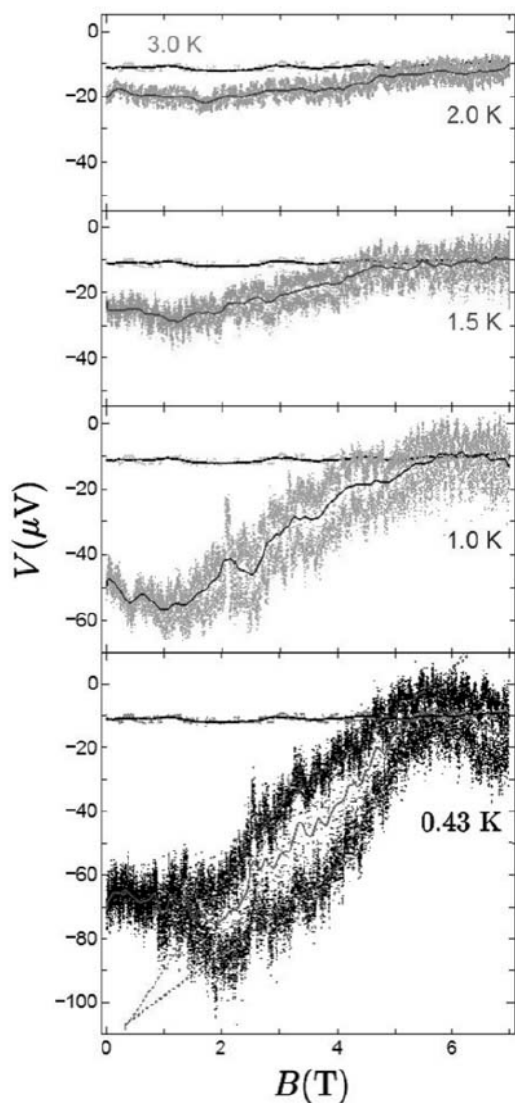


図4: T_c 以下での自発電圧とスイッチング現象.

ンストレインからきている. 我々は、層間方向を考慮した (3+1) 次元のチャーン・ポントリアーギン項に由来する 3 次元的な電気分極効果を提案している.

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 3 件)

1. H. Nobukane, T. Matsuyama, S. Tanda, “Topological electromagnetic response in the chiral superconductor Sr_2RuO_4 ”, *Physica B*, **460** 168–170 (2015). 査読有
DOI:10.1016/j.physb.2014.11.062
2. Y. Oka, H. Nobukane, N. Matsunaga, K. Nomura, K. Katono, K. Ichimura, A. Kawamoto, “Tunneling Spectroscopy in Organic Superconductor κ -(ET-d[3,3])₂Cu[N(CN)₂Br]”, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **84** 064713(1)–(6) (2015). 査読有
DOI:10.1016/j.physb.2014.11.047
3. Y. Oka, H. Nobukane, N. Matsunaga, K. Nomura, K. Katono, K. Ichimura, A. Kawamoto, “STM spectroscopy on deuterated κ -(ET-d[3,3])₂Cu[N(CN)₂Br]”, *Physica B*, **460** 93–95 (2015). 査読有
DOI:10.1016/j.physb.2014.11.047

[学会発表] (計 12 件)

1. 延兼啓純、松山豊樹、丹田聡、“ Sr_2RuO_4 の量子アノマリー現象”、トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア 第1回領域研究会、2016年3月19日～22日、京都大学(京都府・京都市)、

ポスター発表

2. 山崎俊隆、柳原興世、延兼啓純、松永悟明、野村一成、“ κ -(ET)₂X ナノ単結晶薄膜における電子輸送測定” 日本物理学会 2015 年秋季大会、2015 年 9 月 16 日～19 日、関西大学 (大阪府・吹田市)、口頭発表
3. H. Nobukane, “Chern structure in Sr₂RuO₄ thin films”, The 11th Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity 2015 (M2S 2015), August 23-28, 2015, Geneva (Switzerland), Oral presentation
4. 延兼啓純、松山豊樹、丹田聡、“Sr₂RuO₄ におけるチャーン不変量の観測”、日本物理学会 第 70 回年次大会、2015 年 3 月 21 日～24 日、早稲田大学 (東京都・新宿区)、口頭発表
5. H. Nobukane, “Topological electromagnetic response in the chiral superconductors Sr₂RuO₄”, International School and Workshop on Electronic Crystals ECRYS-2014, August 11-23, 2014, Cargese (France), Oral presentation
6. Y. Oka, H. Nobukane, N. Matsunaga, K. Nomura, K. Katono, K. Ichimura, A. Kawamoto, “STM spectroscopy on deuterated κ -(ET-d[3, 3])₂Cu[N(Cn)₂]Br” International School and Workshop on Electronic Crystals ECRYS-2014, August 11-23, 2014, Cargese (France), Poster presentation
7. 岡雄基, 延兼啓純, 松永悟明, 野村一成, 河本充司, 上遠野一広, 市村晃一、“有機超伝導体 κ -(ET)₂Cu[N(CN)₂]Br の角度分解 STM 分光”、日本物理学会 第 69 回年次大会、2014 年 3 月 27 日～30 日、東海大学湘南キャンパス (神奈川県・平塚市)、口頭発表
8. H. Nobukane, T. Matsuyama, S. Tanda, “Majorana edge transport in Sr₂RuO₄”, FIRST-QS2C Workshop on “Emergent Phenomena of Correlated

Materials”, November 13-16, 2013 Shinagawa Intercity Hall (東京都・品川区), Poster Presentation

9. H. Nobukane, T. Matsuyama, S. Tanda, “Topological transport in Sr₂RuO₄”, International Workshop on Phase Transition, Critical Phenomena and Related Topics in Complex Networks, September 9-11, 2013, 北海道大学 (北海道・札幌市), Poster presentation

[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) 研究代表者

延兼 啓純 (NOBUKANE, Hiroyoshi)

北海道大学・大学院理学研究院・助教

研究者番号 : 60550663