

機関番号：10101

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2009 ～ 2010

課題番号：21840004

研究課題名（和文）カイラル超伝導体の単一ドメインにおける新奇量子輸送現象の探索

研究課題名（英文）Search of novel quantum transport phenomena in a single domain of chiral superconductors

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

研究成果の概要（和文）：カイラル単一ドメインとされるマイクロメートルサイズの Sr_2RuO_4 超伝導体において電子輸送測定を行い、パリティの破れた電流 - 電圧特性を発見した。この結果は、クーパー対の内部自由度により Sr_2RuO_4 試料がカイラル単一ドメインを形成し、ゼロ磁場で自発磁化していること、また外部磁場を印加することにより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。我々はこの物理的起源として、単一ドメイン Sr_2RuO_4 の試料端におけるマヨラナフェルミオンの励起を提案した。

研究成果の概要（英文）：We found the parity-violating curves in a single domain of Sr_2RuO_4 superconductors through electric transport measurements. The results show that the Sr_2RuO_4 itself provides spontaneous magnetization. An applied magnetic field changes the chirality of the single domain. We suggest that the Majorana fermions are excited at the edge of Sr_2RuO_4 .

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,090,000	327,000	1,417,000
2010 年度	990,000	297,000	1,287,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,080,000	624,000	2,704,000

研究分野：低次元電子物性

科研費の分科・細目：物理学・物性Ⅱ

キーワード：カイラル超伝導、マヨラナフェルミオン、トポロジカル量子現象、単一ドメイン、量子異常

1. 研究開始当初の背景

異方的超伝導体は、自明でない秩序パラメータを持つために基底状態やその励起状態が大変興味深い。一方で、異方的超伝導体では、クーパー対の内部自由度に起因したドメイン構造が形成されるために異方的超伝導体に特有な物理現象が平均化される可能性がある。これまで異方的超伝導体におけるドメインサイズを十分考慮した物性実験は行われていない。我々は mm サイズの試料より

もドメインサイズが十分小さいとされる異方的超伝導体 Sr_2RuO_4 に注目した。 Sr_2RuO_4 は、様々な実験結果からスピン三重項 ($S = 1$) 及びカイラル p 波 ($L = 1$) の存在が強く示唆されている。最近のいくつかの実験結果からカイラルな単一ドメインのサイズが $1 \sim 50 \mu\text{m}$ 程度であることが明らかになった。また mm サイズの Sr_2RuO_4 単結晶を用いた実験において、平均化を示唆する実験報告がある。したがって、カイラル超伝導体 Sr_2RuO_4 の単一ド

メインサイズの試料で物性実験を行うことが重要である。

2. 研究の目的

単一ドメインサイズの Sr_2RuO_4 試料を作成し電子輸送測定を行うことで、カイラル p 波超伝導体におけるトポロジカルな新奇量子現象の観測を目指す。

3. 研究の方法

本研究で用いる Sr_2RuO_4 単結晶は固相反応法により作成する。この方法ではミリメートルサイズの大きな単結晶の作成は困難であるが、ナノ・マイクロメートルサイズの試料を作成することが可能である。 SiO_2/Si 基板上に取り出した試料に対して組成分析と結晶方位解析をそれぞれ行い、良質な単結晶を選び出す。次に電子ビームリソグラフィ技術により、単結晶に金電極を取り付ける。作成した試料と電極間の接触抵抗が十分小さい試料であることを確認した上で、4端子法により極低温で電子輸送測定を行う。

4. 研究成果

(1) 電子ビーム照射による溶着法

マイクロメートルサイズの Sr_2RuO_4 単結晶へ電子ビームリソグラフィ技術により金電極を作成した(図 1)。このとき微細試料と電極間の接触抵抗を小さくするために SEM 試料室内で試料上の金電極へ局所的に電子ビームを照射し、試料と電極の溶着を行った。その結果、接触抵抗が数十 $\text{k}\Omega$ から数 Ω 程度へと大幅に減少させることに成功した。この技術は銅酸化物や鉄系などの他の微細な異方的超伝導単結晶における電子物性研究を行う上で大変重要な技術である。

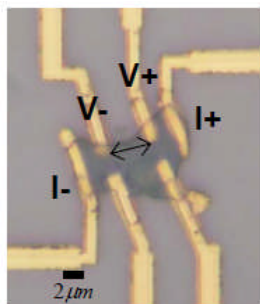


図 1. 金電極が取り付けられた単一ドメインサイズ Sr_2RuO_4 単結晶の光学顕微鏡写真。

(2) パリティの破れた電流 - 電圧 (I - V) 特性の発見

図 2 は $T = 96\text{mK}$ で ab 面へ垂直に磁場を印

加したときの各磁場における I - V 特性の結果である。全ての I - V 特性において、電圧 V が電流 I に対して偶関数となっている。つまり、これはパリティの破れた I - V 特性である。さらに、 0 Oe から 1200 Oe へ磁場を印加したとき、 450 Oe 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、系統的に変化していることがわかった。

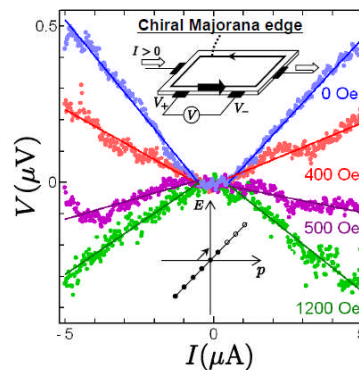


図 2. 各磁場におけるパリティの破れた電流 - 電圧特性と試料端でのマヨラナフェルミオンの励起モデル。

この結果は、 Sr_2RuO_4 試料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、また外部磁場を印加することによって単一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。これは Sr_2RuO_4 がカイラル超伝導体である有力な実験結果である。また、我々はパリティの破れた電流 - 電圧特性の物理的起源として、単一ドメインの試料端におけるマヨラナフェルミオンの励起を提案している。

本研究による Sr_2RuO_4 超伝導体中のマヨラナフェルミオンの発見により、今後は物性実験の立場から素粒子物理とのトポロジーに関する普遍数理構造の追求に興味を持たれる。

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 7 件)

1. "Majorana-Weyl fermions in (2+1)-dimensional superconductors", H. Nobukane, A. Tokuno, T. Matsuyama, and S. Tanda, J. Phys.: Conf. Ser. (2011) (Accepted) 査読有
2. "STM spectroscopy on deuterated κ -(BEDT-TTF-d[n, n]) $_2\text{Cu}[\text{N}(\text{CN})_2\text{Br}]$ ",

- Y. Oka, R. Abe, H. Nobukane, N. Matsunaga, K. Nomura, K. Ichimura, and A. Kawamoto, J. Phys.: Conf. Ser. (2011) (Accepted) 査読有
3. "Majorana-Weyl fermions in the chiral superconductor Sr_2RuO_4 ", H. Nobukane, A. Tokuno, T. Matsuyama, S. Tanda, Physical Review B, **83** 144502(1)-(6) (2011) 査読有
 4. "Transport properties in a single domain of microscale Sr_2RuO_4 single crystals", H. Nobukane, K. Inagaki, S. Tsuchiya, Y. Asano, K. Ichimura, K. Yamaya, S. Takayanagi, I. Kawasaki, K. Tenya, H. Amitsuka, S. Tanda Japanese Journal of Applied Physics, **49** (2010) 020209(1)-(3) 査読有
 5. "Parity-violating current-voltage curves in a single domain of Sr_2RuO_4 superconductors" H. Nobukane, K. Inagaki, K. Ichimura, K. Yamaya, S. Takayanagi, I. Kawasaki, K. Tenya, H. Amitsuka, K. Konno, Y. Asano, S. Tanda, Physica B, **405** S277-S278 (2010) 査読有
 6. "Duality Breaking of Vortex Configuration in a Hierarchical Honeycomb Network", S. Tsuchiya, T. Toshima, H. Nobukane, K. Inagaki, S. Tanda, Physical Review B, **80** 094502(1)-(4) (2009) 査読有
 7. "Parity Violation in a Single Domain of Spin-Triplet Sr_2RuO_4 Superconductors", H. Nobukane, K. Inagaki, K. Ichimura, K. Yamaya, S. Takayanagi, I. Kawasaki, K. Tenya, H. Amitsuka, K. Konno, Y. Asano, S. Tanda, Solid State Communication, **149** (2009) 1212-1215 査読有
- [学会発表] (計 13 件)
1. "Chiral Majorana edge excitations in Sr_2RuO_4 " H. Nobukane, A. Tokuno, T. Matsuyama, K. Ichimura, K. Yamaya, S. Takayanagi, K. Inagaki, K. Tenya, H. Amitsuka, Y. Asano, K. Nomura, and S. Tanda Topological Quantum Phenomena in Condensed Matter with Broken Symmetries (TQP2012), May 16-20, 2012 Nagoya, Japan
 2. "有機超伝導体 λ -(BETS) $_2\text{GaCl}_4$ における STM 分光" 岡雄基、一ノ宮弘樹、延兼啓純、松永悟明、野村一成、ファティマ・スルタナ、小林昭子、小林速男 日本物理学会 第 67 回年次大会、関西学院大学、2012 年 3 月 24 日~3 月 27 日 (口頭発表)
 3. "Majorana fermions at the edge of the chiral superconductor Sr_2RuO_4 " H. Nobukane, A. Tokuno, T. Matsuyama, K. Ichimura, K. Yamaya, S. Takayanagi, K. Inagaki, K. Tenya, H. Amitsuka, Y. Asano, K. Nomura, and S. Tanda 対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象 第 2 回領域研究会、岡山大学、2011 年 12 月 17-19 日 (ポスター発表)
 4. "カイラル超伝導体 Sr_2RuO_4 におけるマヨラナ粒子の観測 II" 延兼啓純、得能光行、松山豊樹、丹田聡 日本物理学会 2011 年秋季大会、富山大学、2011 年 9 月 21 日~24 日、口頭発表
 5. "部分重水素置換 κ -(BEDT-TTF-d[n, n]) $_2\text{Cu}[\text{N}(\text{CN})_2]\text{Br}$ の超伝導ギャップ 3: STM 分光" 岡雄基、阿部良太、延兼啓純、松永悟明、野村一成、市村晃一、河本充司 日本物理学会 2011 年秋季大会、富山大学、2011 年 9 月 21 日~24 日、口頭発表
 6. "Majorana-Weyl fermions in (2+1)-dimensional superconductors", H. Nobukane, A. Tokuno, T. Matsuyama, S. Tanda, 26th international conference on Low Temperature Physics (LT26), Aug 10-17, 2011 Beijing, China (ポスター発表)
 7. "STM Spectroscopy on deuterated κ -(BEDT-TTF-d[n, n]) $_2\text{Cu}[\text{N}(\text{CN})_2]\text{Br}$ ", Y. Oka, R. Abe, H. Nobukane, N. Matsunaga, K. Nomura, K. Ichimura, A. Kawamoto 26th international conference on Low Temperature Physics (LT26), Aug 10-17, 2011 Beijing, China (ポスター発表)
 8. "カイラル超伝導体 Sr_2RuO_4 におけるマヨラナ粒子の観測" 延兼啓純、得能光行、松山豊樹、丹田聡 日本物理学会 第 66 年次大会、新潟大学、

2011年3月25日～28日、口頭発表

9. “部分重水素置換 κ -(BEDT-TTF)₂Cu[N(CN)₂]Br の超伝導ギャップ 2: STM 分光”
岡雄基、阿部良太、延兼啓純、松永悟明、野村一成、市村晃一、河本充司
日本物理学会 第 66 年次大会、新潟大学、2011年3月25日～28日、口頭発表
10. “階層構造超伝導ネットワークにおけるボルテックス配置の双対性の破れ”
土屋聡、豊嶋剛司、延兼啓純、稲垣克彦、市村晃一、丹田聡
日本物理学会 第 65 回年次大会、岡山大学、2010年3月20日～23日、口頭発表
11. “Parity violation in a chiral single domain Sr₂RuO₄: Implication of Majorana fermions”,
H. Nobukane, A. Tokuno, T. Matsuyama, and S. Tanda,
I. F. Schegolev Memorial Conference “Low-Dimensional Metallic and Superconducting Systems
October 11-16, 2009, Chernogolovka, Russia (招待講演)
12. “単一ドメイン Sr₂RuO₄ におけるパリテイ破れの発見”
延兼啓純、稲垣克彦、市村晃一、山谷和彦、高柳滋、川崎郁斗、天谷健一、網塚浩、金野幸吉、浅野泰寛、本間龍也、丹田聡
日本物理学会 2009 年秋季大会、熊本大学、2009年9月25日～28日、口頭発表
13. “Parity-violating current-voltage curves in a single domain of Sr₂RuO₄ superconductors”,
H. Nobukane, K. Inagaki, K. Ichimura, K. Yamaya, S. Takayanayagi, I. Kawasaki, K. Tenya, H. Amitsuka, K. Konno, Y. Asano, S. Tanda,
The 8th International Symposium on Crystalline Organic Metals, Superconductors and Ferromagnets (ISCOM 2009), Hokkaido Sep 12-17 2009 (ポスター発表)

[その他]

ホームページ等

<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