

カイラル超伝導によるトポロジカル量子演算素子の開発



延兼 啓純

北海道大学大学院 理学研究院物理学部門

〒060-0810 札幌市北区北 10 条西 8 丁目

E-mail: nobukane@sci.hokudai.ac.jp

Development of topological quantum devices in a chiral superconductor

Hiroyoshi Nobukane

Department of Physics, Hokkaido University, Kita-10, Nishi-8, Sapporo 060-0810

1 はじめに

カイラル p 波超伝導・超流動状態では、トポロジカル不変量で特徴付けられる新奇な量子状態が現れる [1]. 近年、トポロジカル量子状態を動作原理とする新規デバイスへの応用、特にマヨラナフェルミオン（粒子と反粒子が同一視されるスピン $1/2$ 粒子）の非可換統計性を利用した量子デバイスが提案されている [2].

層状ペロブスカイト酸化物 Sr_2RuO_4 は、これまでの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 [3, 4] であり、カイラル p 波超伝導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。例えば、ゼロ磁場量子ホール効果 [5]、半整数量子渦 [6, 7]、試料端や渦心におけるマヨラナフェルミオン [8] などの観測の可能性が指摘されている。しかし、現状では実験的報告は少ない。これらの観測を難しくしている要因として、クーパー対の軌道自由度に起因したカイラルドメインの形成が挙げられる。ここで、カイラルドメインとは試料中の電子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。最近の研究によりカイラル単ドメインサイズは数 μm 程度であることが報告されている [9, 10, 11, 13]. このことから、我々は単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 における電子輸送測定を行ってきた [12, 13].

本研究では、図 1 に示すような 1 次元エッジ、2 次元ホール効果、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ので報告する。また、マヨラナフェルミオンの非可換統計性を利用した新規な量子演算素子を創成する可能性を探った。

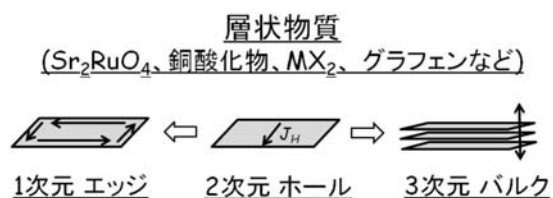


図 1 層状物質において現れるトポロジカル量子現象と次元性.

2 カイラル単ドメイン Sr_2RuO_4 の試料作成

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 [14]。超音波分散による粉碎や劈開法を用いて SiO_2 (300 nm)/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 15~400 nm 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。

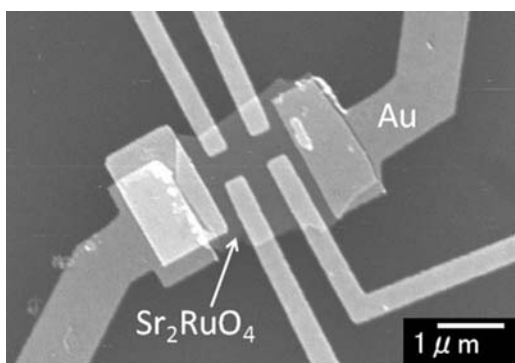


図 2 金電極が取り付けられた Sr_2RuO_4 の SEM 写真。

3 パリティの破れた電流-電圧特性： 1次元マヨラナエッジ伝導

まず、カイラル p 波超伝導体 Sr_2RuO_4 の単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。図 3 は $T = 96$ mK で伝導面へ垂直に磁場

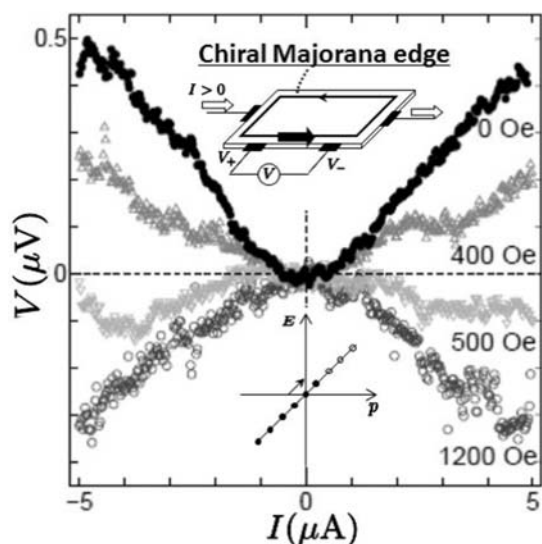


図 3 単ドメイン Sr_2RuO_4 における各磁場でのパリティの破れた $I-V$ 特性。試料端におけるカイラルエッジ電流と線形なギャップレス状態におけるマヨラナフェルミオンの励起 (挿入図)。

を印加した時の $I-V$ 特性の結果である。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 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、系統的な変化を観測した。これは、 Sr_2RuO_4 試料自体がカイラルな単ドメインであり、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端では 1 次元的なカイラルマヨラナエッジ状態が存在し、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 [13]。集束イオンビーム加工により試料端に現れるマヨラナエッジ状態の制御することで、量子演算素子へ応用でき

る可能性がある。

4 量子ホールコンダクタンス：2次元量子ホール効果

(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、 Sr_2RuO_4 微小ナノ薄膜における輸送測定を行った。その結果、超伝導転移温度以下のゼロ磁場において量子ホール抵抗を観測した(図4)。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 [15] や超流動ヘリウム3薄膜 [5] 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効果であると考えられる。このカイラル超伝導体 Sr_2RuO_4 におけるゼロ磁場量子ホール効果の観測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 (RuO_2 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数 $\text{k}\Omega$ より十分小さかった。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 Sr_2RuO_4 と同じ 1.5 K であったのに対して、薄膜試料 (20 nm) では約 3 ~ 3.5 K 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、 Sr_2RuO_4 -Ru 共晶において報告されていた [16]。ところが近年の研究では、純良な Sr_2RuO_4 であっても c 軸方向への一軸性圧力 [17] やナノスケール結晶転位近傍 [18] において T_c が 1.5 K から 3 K へ上昇することが報告されている。我々の Sr_2RuO_4 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 Sr_2RuO_4 微小単結晶薄膜を対象とした研究が重要であることを示唆している。今後、より詳細に Sr_2RuO_4 における量子ホール効果について調べていく予定である。

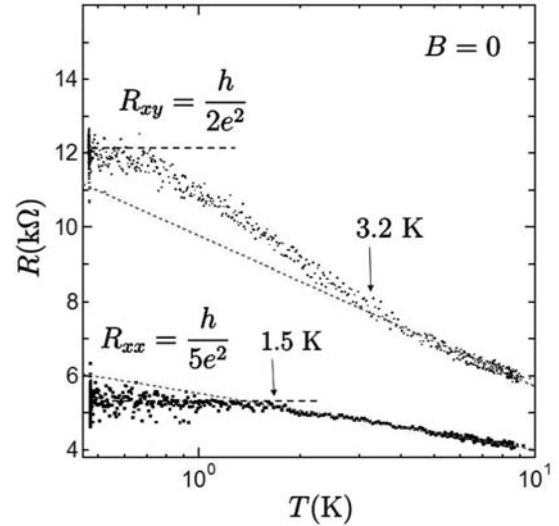


図4 ゼロ磁場における量子抵抗の観測。

5 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 $T_c = 3 \text{ K}$ 以下において自発電圧を観測した。この自発電圧 V は試料の厚さ t を薄くするにつれて増加し、 $V = 1/t$ の関係があることがわかった。これは自発電圧が熱起電力や試料中の微小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 $\pm 1 \text{ T}$ から $\pm 5 \text{ T}$ の範囲内で自発電圧のスイッチング現象を観測した(図5)。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 $E \cdot B$ (菱型の領域) と良く一致していることがわかった。これはトポロジカル不変量をもたらすコンストレーションによるものである。我々は、層間方向を考慮した (3+1) 次元のチャーン・ポントリャー

ギン（トポロジカル θ ）項に由来する 3 次元的な電気分極効果を提案している。今後は電場印加に対する自発磁化の観測を目指している。

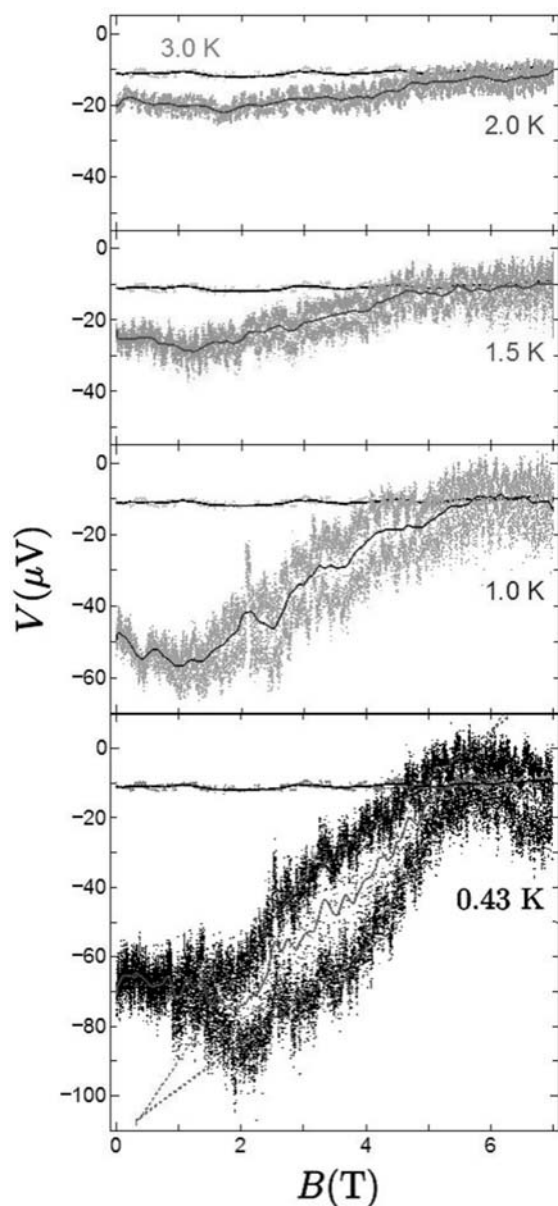


図 5 T_c 以下での自発電圧とスイッチング現象。

6 まとめ

カイラル p 波超伝導 Sr_2RuO_4 の単一ドメインサイズにおける電子輸送から、1 次元カイラルマヨラナエッジ伝導、2 次元量子ホールコンダクタンス、3 次元分数トポロジカル電気分極効果の観測に成功した。これらのトポロジカル量子現象を制御することで新規量子デバイスへ

の応用が期待される。

謝辞

共同研究者である北海道大学の丹田聡氏、奈良教育大学の松山豊樹氏に深く感謝致します。また、本研究を遂行するにあたり北海道大学の浅野泰寛氏、市村晃一氏、山谷和彦氏、高柳滋氏、松永悟明氏、野村一成氏、旭川医科大学物理学教室の稲垣克彦氏、本間龍也氏、College de France の得能光行氏に実験サポートやご助言をいただきましたことを御礼申し上げます。

参考文献

- [1] G. E. Volovik, *The Universe in a Helium Droplet* (Clarendon, Oxford, 2003).
- [2] C. Nayak, S. H. Simon, A. Stern, M. Freedman, and S. D. Sarma, *Rev. Mod. Phys.* **80**, 1083 (2008).
- [3] A.P. Mackenzie and Y. Maeno, *Rev. Mod. Phys.* **75**, 657 (2003).
- [4] Y. Maeno, S. Kittaka, T. Nomura, S. Yonezawa, and K. Ishida, *J. Phys. Soc. Jpn.* **81**, 011009 (2012).
- [5] G. E. Volovik, *Sov. Phys. JETP* **67**, 1804 (1988).
- [6] S. B. Chung, H. Bluhm, and E.-A. Kim *Phys. Rev. Lett.* **99**, 197002 (2007).
- [7] J. Jang, D. G. Ferguson, V. Vakaryuk, R. Budakian, S. B. Chung, P. M. Goldbart, Y. Maeno *Science* **331**, 186 (2011).
- [8] D. A. Ivanov, *Phys. Rev. Lett.* **86**, 268 (2001).
- [9] J. Xia, Y. Maeno, P. T. Beyersdorf, M. M. Fejer, and A. Kapitulnik, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 167002 (2006).
- [10] F. Kidwingira, J. D. Strand, D. J. V. Harlingen, and Y. Maeno, *Science* **314**, 1267 (2006).
- [11] H. Kambara, S. Kashiwaya, H. Yaguchi, Y. Asano, Y. Tanaka, and Y. Maeno, *Phys. Rev. Lett.* **101**, 267003 (2008).

- [12] H. Nobukane, K. Inagaki, K. Ichimura, K. Yamaya, S. Takayanagi, I. Kawasaki, K. Tenya, H. Amitsuka, K. Konno, Y. Asano, and S. Tanda, *Solid State Commun.* **149**, 1212 (2009).
- [13] H. Nobukane, A. Tokuno, T. Matsuyama, S. Tanda, *Phys. Rev. B* **83**, 144502 (2011).
- [14] H. Nobukane, K. Inagaki, S. Tsuchiya, Y. Asano, K. Ichimura, K. Yamaya, S. Takayanagi, I. Kawasaki, K. Tenya, H. Amitsuka, and S. Tanda, *Jpn. J. Apply. Phys.* **49**, 020209 (2010).
- [15] T. Matsuyama, *Prog. Theo. Phys.* **77**, 711 (1987).
- [16] Y. Maeno, T. Ando, Y. Mori, E. Ohmichi, S. Ikeda, S. NishiZaki, and S. Nakatsuji *Phys. Rev. Lett.* **81**, 3765 (1998).
- [17] S. Kittaka, H. Taniguchi, S. Yonezawa, H. Yaguchi, and Y. Maeno, *Phy. Rev. B* **81**, 180510(R) (2010).
- [18] Y. A. Ying, N.E. Staley, Y. Xin, K. Sun, X. Cai, D. Fobes, T. J. Liu, Z. Q. Mao, and Y. Liu, *Nature Communications* **4**, 2596 (2013).