

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22340095

研究課題名（和文） 超流動ヘリウム3の界面で期待されるマヨラナ粒子の探索

研究課題名（英文） Search for Majorana Fermion on the surface of  $^3\text{He-B}$ 

研究代表者

奥田 雄一 (OKUDA YUUCHI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：50135670

研究成果の概要（和文）：

超流動  $^3\text{He-B}$  相は、壁近傍ではユニークな準粒子状態をギャップ内に低エネルギー状態として持つ。我々は横波音響インピーダンスの手法により、その存在を確かめることに成功していた。さらに、壁表面を超流動  $^4\text{He}$  の薄膜で覆い、 $^3\text{He}$  準粒子の散乱条件を変化させることで、その詳細を明らかにした。この表面束縛状態は、specular の極限で Majorana fermion になるという驚くべき結果が導かれ、その磁氣的性質を解明している。

研究成果の概要（英文）：

Superfluid  $^3\text{He}$  is an intensively investigated and well characterized p-wave superfluid. In the bulk BW state, which is commonly called  $^3\text{He B}$  phase, the superfluid gap is opened isotropically but near a flat boundary such as a wall of a container it can harbor interesting quasi-particle states inside the gap. These states are called surface Andreev bound states, and have not been experimentally explored in detail. Transverse acoustic impedance measurement has revealed their existence and provided spectroscopic details of the dispersion of the bound states. Recent theoretical arguments claim that the surface Andreev bound states of superfluid  $^3\text{He B}$  phase can be recognized as the edge states of the topological superfluid and be regarded as a Majorana fermion, a fancy particle which has not been confirmed in elementary particle physics. In this review, we present up-to-date knowledge on the surface Andreev bound states of  $^3\text{He B}$  phase revealed by acoustic spectroscopy and the possible realization of a Majorana fermion, along with related studies on this topic.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	7,500,000	2,250,000	9,750,000
2011年度	5,600,000	1,680,000	7,280,000
2012年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			0
年度			0
総計	14,600,000	4,380,000	18,980,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性Ⅱ

キーワード：超低温・量子凝縮系

### 1. 研究開始当初の背景

スピン 1/2 を持つフェルミ粒子である電子、陽子、中性子などには、それぞれ対応する反粒子が存在する。しかしスピン 1 を持ち電氣的に中性なボース粒子である光子は、それ自身が粒子であり反粒子でもあり、両者の区別は無い。スピン 1/2 を持つ中性粒子で、このような性質を持つ素粒子は存在するのであろうか？1937 年にエッソーレ・マヨラナは、粒子と反粒子の区別が無いスピン 1/2 を持つ相対論的粒子が存在する可能性を示した。以来、このような粒子はマヨラナフェルミ粒子と呼ばれる。ニュートリノ振動を説明するアイデアの一つに、ニュートリノがマヨラナフェルミ粒子であるとするものがある。その検証のため、レプトン数が保存しない崩壊過程である 2 重ベータ崩壊の探索などが行われているが、未だ決着は付いていない。

### 2. 研究の目的

このようなマヨラナフェルミ粒子が凝縮系物質中の準粒子励起として実現できるのではないかと、近年その探索が盛んになっている。候補としては、P 波超伝導・超流動体の表面束縛状態や量子渦芯束縛状態、空間反転対称性の無い超伝導体の表面束縛状態、偶数分母量子ホール状態での準粒子、S 波超伝導に近接するトポロジカル絶縁体やグラフェン、などが提案されている。マヨラナフェルミ粒子が凝縮系物理で注目されている理由として、エラーの少ない量子計算の基本素子としての応用が提案されていることがある。また無散逸のエッジ流やエッジスピン流を運ぶことを利用した、新たなデバイス応用も期待できる。我々は超流動ヘリウム 3-B 相の表面アンドレーエフ束縛状態を研究して来たが、この束縛状態がマヨラナフェルミ粒子と見なせるとの提案がなされた。またその分散関係は、グラフェン中のディラック電子のように運動量に比例するとされた。この線形分散関係は、束縛状態がマヨラナ・フェルミ粒子であるためマヨラナ・コーンと呼ばれる。我々は、マヨラナ・コーンの存在を示す実験結果を得たので報告する。

### 3. 研究の方法

超流動 3He の表面束縛状態を実験的にとらえるのに、壁を面方向へ振動させる横波音響インピーダンスの手法で、振動数を超流動のギャップエネルギー近傍にセットすることで分光学的にとらえることが判明した。これは思わぬ発見であった。また、超流動ヘリウム 4 を微量 3He 液体中に混合することで、フ

ァン・デア・ワールス力の違いにより、4He 薄膜を優先的に壁表面に吸着させることができる。またこの膜厚を変化させることにより、3He 準粒子の散乱条件を diffusive から specular へと変えることが可能となる。これらの手法により、マヨラナ・コーンの詳細を捉えることが可能となった。また、音響インピーダンスは外部磁場に対して鈍感なので、同じ手法による磁場依存性を測定することができる。マヨラナ・コーンの磁氣的性質が、完全な Ising 性を示すことが、音響インピーダンスの磁場異方に反映されるはずで、現在もその実験が進行中である。

### 4. 研究成果

我々は壁の鏡面度 S をヘリウム 4 薄膜でコートすることにより大きくすると、横波音響抵抗の低エネルギーピークが成長することを見出した。この低エネルギーピークの成長は長登らによる理論計算によっても再現された。ラフな極限 S=0 では、準粒子のエネルギー巾が広く線形分散関係はないが、ラフネスが小さくなるにしたがいエネルギー巾がシャープになりマヨラナ・コーンが明確になるという系統的振舞いが見られる。このマヨラナ・コーンの顕在化が、横波音響抵抗の低エネルギーピークを作るのである。

超流動ヘリウム 3-B 相の表面に存在するマヨラナフェルミ粒子が持つとされる性質の一つ、線形分散関係が実験的に確かめられたこととなる。この系においては、異方的な磁気応答や表面スピン流など、マヨラナ性に起因する特異な性質が他にも予言されており、その検証は将来の課題である。素粒子や超伝導体に先駆けて、超流動ヘリウム 3 においてマヨラナフェルミ粒子の実在が示されたことの意義は大きいと考える。

### 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. Surface Andreev bound states of superfluid  $^3\text{He}$  and Majorana Fermions, Y. Okuda and R. Nomura, J. Phys.: Condens. Matter 24, 343201-1-19 (2012), invited review article. DOI:10.1088/0953-8984/24/34/343201 査読有
2. Odd-frequency Cooper pairs and zero-energy surface bound states in superfluid  $^3\text{He}$

- S. Higashitani, S. Matsuo, Y. Nagato, K. Nagai, S. Murakawa, R. Nomura, and Y. Okuda, Phys. Rev. B 85, 024524-1-5 (2012)  
DOI:10.1103/PhysRevB.85.024524 査読有
3. Strong suppression of the Kosterlitz-Thouless Transition in a 4He film under high pressure, S. Murakawa, M. Wasai, K. Akiyama, Y. Wada, Y. Tamura, R. Nomura and Y. Okuda, Phys. Rev. Lett. 108, 025302 (2012). DOI:10.1103/PhysRevLett.108.025302 査読有
  4. Surface Majorana Cone of the Superfluid 3He B Phase, S. Murakawa, Y. Wada, Y. Tamura, M. Wasai, M. Saitoh, Y. Aoki, R. Nomura, Y. Okuda, Y. Nagato, M. Yamamoto, S. Higashitani and K. Nagai, J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 013602(2011). DOI:10.1143/JPSJ.80.013602 査読有
  5. Surface Andreev Bound States of the Superfluid 3He B Phase, R. Nomura, S. Murakawa, Y. Wada, Y. Tamura, M. Wasai, K. Akiyama, M. Saitoh, Y. Aoki and Y. Okuda, Physica E 43, 718-721 (2011).doi.org/10.1016/j.physe.2010.07.037 査読有
  6. Superfluid transition of a 4He thin film pressurized by bulk liquid 3He M. Wasai, S. Murakawa, Y. Tamura, Y. Wada, Y. Aoki, R. Nomura and Y. Okuda J. Low Temp. Phys. 158, 268-274 (2010). DOI10.1007/s10909-009-0017-6 査読有
  7. Transverse acoustic impedance measurements for surface states of superfluid 3He A1 and A2 phases, S. Murakawa, A. Yamaguchi, M. Arai, M. Wasai, Y. Aoki, H. Ishimoto, R. Nomura and Y. Okuda, J. Low Temp. Phys. 158, 141-146 (2010). DOI10.1007/s10909-009-0008-7 査読有
- [学会発表] (計 18 件)
1. R. Nomura, Surface Majorana cone of the topological superfluid 3He B phase (invited talk), APS March Meeting 2013, Invited Session: Superfluids under Nanoscale Confinement, Baltimore, Maryland, 2013/3/21 (米国)
  2. M. Wasai, K. Akiyama, T. Nakao, S. Murakawa, R. Nomura and Y. Okuda, Surface Andreev Bound States and Majorana Fermions in the Superfluid 3He B Phase (poster), International Symp. "Nanoscience and Quantum Phys." (nanoPHYS'12), 東京2012/12/17 (日本)
  3. 秋山綱紀, 和才将大, 中尾武, 野村竜司, 奥田雄一, 超流動 3He-B相における表面アンドレーエフ束縛状態の磁場効果 (ポスター発表)、第6回物性科学領域横断研究会 (領域合同研究会)、東京大学武田先端知ビル5F武田ホール、2012年11月27-28日
  4. R. Nomura, Surface Majorana Cone of the Topological Superfluid 3He B Phase(invited talk), International Conference on Topological Quantum Phenomena, Nagoya, Japan, 2012/5/18
  5. 村川智, 和才将大, 秋山綱紀, 田村雄太, 和田雄一郎, 野村竜司, 奥田雄一、高圧<sup>3</sup>He中における薄膜<sup>4</sup>HeのKT転移の抑制と量子臨界性 (口頭発表)、日本物理学会第67回年次大会 関西学院大学、2012年3月26日
  6. Ryuji Nomura, Andreev-Majorana bound states on the superfluid 3He-B surface (invited talk), Microkelvin workshop 2012, Smolenice, Slovakia, 2012/3/19-23
  7. 野村竜司, 村川智, 和才将大, 秋山綱紀, 和田雄一郎, 田村雄太, 奥田雄一、強相関 4He薄膜における Kosterlitz-Thouless 転移の抑制と量子臨界性 (ポスター発表) Ultracold Gases: Superfluidity and Strong Correlations (USS-2012)、東京理科大学、2012/1/11
  8. 村川智, 和才将大, 秋山綱紀, 和田雄一郎, 田村雄太, 野村竜司, 奥田雄一、高圧<sup>3</sup>He下における<sup>4</sup>He薄膜のKT転移温度の抑制 (口頭発表)、ISSP短期研究会:量子凝縮系における defect と topology 東京大学物性研究所、2012/1/7
  9. 和才将大, 村川智, 秋山綱紀, 和田雄一郎, 田村雄太, 青木悠樹, 斎藤政通, 野村竜司, 奥田雄一、Surface Andreev Bound States and Majorana Fermions in the Superfluid <sup>3</sup>He B Phase、ISSP短期研究会:量子凝縮系における defect と topology、東京大学物性研究所、2012/1/5
  10. 秋山綱紀, 和才将大, 中尾武, 野村竜司, 奥田雄一、超流動<sup>3</sup>He B相における表面アンドレーエフ束縛状態の磁場効果、ISSP短期研究会:量子凝縮系における defect と topology、東京大学物性研究所、2012/1/5
  11. R. Nomura, Surface Majorana Cone of the Superfluid 3He B Phase, (invited talk), ULT2011, the new frontiers of low temperature physics, KAIST, Daejeon, Korea, 2011/8/22
  12. S. Murakawa, M. Wasai, K. Akiyama, R. Nomura, and Y. Okuda, Suppression of KT transition in 4He film under high

- pressure  $^3\text{He}$ , ULT2011, the new frontiers of low temperature physics, KAIST, Daejeon, Korea (poster), 2011/8/21
13. Y.Okuda, Surface bound state of superfluid  $^3\text{He}$ -B and Majorana fermion, LT26, 北京half plenary talk, 2011/8/16、中国
  14. S. Murakawa, M. Wasai, K. Akiyama, R. Nomura, and Y. Okuda, Suppression of KT transition in  $^4\text{He}$  film under high pressure  $^3\text{He}$ , poster, 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26), The Beijing International Convention Center, Beijing, China, 2011/8/15
  15. Ryuji Nomura, Surface Majorana Cone of the Superfluid  $^3\text{He}$  B Phase (invited talk), International Workshop for Young Researchers on Topological Quantum Phenomena, LaforetBiwako, Shiga, Japan, 2011/1/2
  16. 村川智, 山口明, 荒井美穂, 和才将大, 青木悠樹, 石本英彦, 野村竜司, 奥田雄二, 強磁場中における超流動 $^3\text{He}$ の横波音響応答IV (口頭発表)、日本物理学会2010年秋季大会、大阪府立大学、2010年9月24日
  17. S. Murakawa, A. Yamaguchi, M. Arai, M. Wasai, Y. Aoki, H. Ishimoto, R. Nomura, and Y.Okuda, Study for Surface States of Superfluid  $^3\text{He}$  in Non-Unitary Phases at High, Magnetic Fields (poster), International symposium on quantum fluids and solids (QFS2010), Grenoble World Trade Center, Grenoble, France, 2010/8/3
  18. S. Murakawa, Y. Wada, Y. Tamura, M. Wasai, M. Saitoh, Y. Aoki, R. Nomura, Y. Okuda, Y. Nagato, M. Yamamoto, S. Higashitani, and K. Nagai, Surface Majorana Cone of the Superfluid  $^3\text{He}$  B Phase (poster) International symposium on quantum fluids and solids (QFS2010), Grenoble World Trade Center, Grenoble, France, 2010/8/3

[その他]

ホームページ等

<http://www.ltp.ap.titech.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

奥田 雄一 (OKUDA YUICHI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号 : 50135670

### (2) 研究分担者

野村 竜司 (NOMURA RYUJI)

東京工業大学・理工学研究科・助教

研究者番号 : 00323783

### (3) 連携研究者

なし