

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24年 5月 14日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21540365

研究課題名（和文）不均一超流動ヘリウム3における奇周波数状態の線型応答に関する理論的研究

研究課題名（英文）Theoretical study of the linear response of odd-frequency states in inhomogeneous superfluid ^3He

研究代表者

東谷 誠二 (HIGASHITANI SEIJI)

広島大学・大学院総合科学研究科・准教授

研究者番号：70304368

研究成果の概要（和文）：

超流動ヘリウム3の界面に形成されるアンドレーエフ束縛状態が磁場の方向に強く依存した異方的磁気応答を示すことを明らかにした。さらに、奇周波数クーパー対とアンドレーエフ束縛状態のゼロモードとの間に極めて密接な関係があることを指摘し、奇周波数状態とゼロモードという新たな視点からアンドレーエフ束縛状態に関する従来の実験結果を再検討することで、超流動ヘリウム3の界面に実際に奇周波数クーパー対が形成されていることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

It was revealed that the Andreev bound states formed at the surfaces of superfluid ^3He show strongly anisotropic response to magnetic field. Moreover, we pointed out that the odd-frequency Cooper pair is closely related to the zero mode of the Andreev bound states. From this viewpoint, we reexamined previous experiments on the Andreev bound states in superfluid ^3He and revealed that there in fact exist the odd-frequency Cooper pairs near the surfaces of superfluid ^3He .

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	400,000	120,000	520,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	1,900,000	570,000	2,470,000

研究分野：低温物性理論

科研費の分科・細目：物理学・物性II

キーワード：奇周波数クーパー対 奇周波数状態 超流動ヘリウム3 アンドレーエフ束縛状態 スピン帯磁率

1. 研究開始当初の背景

超伝導・超流動状態は、一般に、偶周波数状態と奇周波数状態に大別できる。前者では、秩序変数のフーリエ成分が偶関数になり、後者では奇関数になることがその名前の由来

である。

奇周波数状態は、クーパー対の形成に必要な引力相互作用に特殊なエネルギー依存性を仮定しなければ安定化しない。実際、これまでに発見された超伝導・超流動物質の中で、

奇周波数状態が確立した例はない。このため奇周波数状態はあまり研究されてこなかったが、Ceを含む重い電子系物質でその実現可能性が指摘されて話題となった（参考文献[1]）。

奇周波数状態は、超伝導接合系の研究において新たな関心を集めている。Bergeretらは、超伝導体／強磁性体接合系の界面に奇周波数クーパー対が形成されることを理論的に示した（参考文献[2]）。以来、様々な不均一超伝導系を舞台にした奇周波数状態の理論的研究が行われ（参考文献[3-5]）、多物質との境界面だけでなく、単体の超伝導物質の表面にも奇周波数クーパー対が形成されることがわかってきた。

2. 研究の目的

従来型のs波超伝導体（クーパー対の軌道状態がs波対称性をもつ偶周波数超伝導体）は表面の影響をほとんど受けないことが知られている。このため、s波超伝導体の表面には奇周波数クーパー対は現れない。一方、超流動ヘリウム3、種々の重い電子系物質、銅酸化物超伝導体やそれと類似の結晶構造をもつSr₂RuO₄等で議論されてきた非s波状態は、大きな境界効果を示す。例えば、非s波クーパー対の振幅は、表面散乱による干渉効果のために表面付近で強く抑制される（参考文献[6, 7]）。また、同時に、アンドレーエフ束縛状態と呼ばれる表面付近に局在した準粒子状態が形成されることも知られている（参考文献[8-11]）。このような境界効果を示す超伝導・超流動物質では、母体となる偶周波数状態と共存して奇周波数状態が表面付近に出現すると期待される。

超流動ヘリウム3は、非s波状態が最初に確立した物質であり、そのバルク状態はp波状態であることがすでにわかっている。したがって、超流動ヘリウム3の表面には、アンドレーエフ束縛状態とともに、奇周波数クーパー対が形成されると予想される。

本研究は、空間的な不均一性に伴って超流動ヘリウム3に出現する奇周波数クーパー対の物性研究を通じて、従来型の超伝導体にはない新奇な物理現象を探求し、量子凝縮系物理学における新概念の創出と確立を目指した基礎研究である。

3. 研究の方法

理論の定式化には準古典的グリーン関数法を用いた。この方法は、転移温度付近ではGinzburg-Landau理論に帰着し、常流動相ではLandauのフェルミ液体理論と等価である。また、不均一系での秩序変数の空間変化を低温まで定量的に数値計算するのに有力な方

法であることも知られている。

準古典的グリーン関数法を超流動ヘリウム3に適用し、超流動ヘリウム3薄膜系のスピン帯磁率、表面の偶周波数・奇周波数共存状態の空間構造、奇周波数クーパー対の形成とアンドレーエフ束縛状態との相関等に関する解析的・数値的計算を行った。表面状態の研究では、ランダムS行列理論を用いて（参考文献[12]）、表面の鏡面度をパラメータとした理論を展開し、散漫的な表面散乱の効果を考慮した数値計算を行った。超流動ヘリウム3の実験では、ヘリウム4で表面をコートすることによって、表面の鏡面度を制御できるので、表面物性の鏡面度依存性に関して系統的に実験と理論の比較が可能である（参考文献[13]）。

参考文献：

- [1] Y. Fuseya, H. Kohno, and K. Miyake, *J. Phys. Soc. Jpn.* **72**, 2914 (2003).
- [2] F. S. Bergeret, A. F. Volkov, and K. B. Efetov, *Phys. Rev. Lett.* **86**, 4096 (2001).
- [3] Y. Tanaka and A. A. Golubov, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 037003 (2007).
- [4] Y. Tanaka, A. A. Golubov, S. Kashiwaya, and M. Ueda, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 037005 (2007).
- [5] S. Higashitani, Y. Nagato, and K. Nagai, *J. Low Temp. Phys.* **155**, 83 (2009).
- [6] V. Ambegaokar, P. G. deGennes, and D. Rainer, *Phys. Rev. A* **9**, 2676 (1974).
- [7] L. J. Buchholtz and G. Zwicknagl, *Phys. Rev. B* **23**, 5788 (1981).
- [8] C. R. Hu, *Phys. Rev. Lett.* **72**, 1526 (1994).
- [9] Y. Nagato, M. Yamamoto, and K. Nagai, *J. Low Temp. Phys.* **110**, 1135 (1998).
- [10] Y. Aoki, Y. Wada, M. Saitoh, R. Nomura, Y. Okuda, Y. Nagato, M. Yamamoto, S. Higashitani, and K. Nagai, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 075301 (2005).
- [11] K. Nagai, Y. Nagato, M. Yamamoto, and S. Higashitani, *J. Phys. Soc. Jpn.* **77**, 111003 (2008).
- [12] Y. Nagato, S. Higashitani, K. Yamada, and K. Nagai, *J. Low Temp. Phys.* **103**, 1 (1996).
- [13] S. Murakawa, Y. Tamura, Y. Wada, M. Wasai, M. Saitoh, Y. Aoki, R. Nomura, Y. Okuda, Y. Nagato, M. Yamamoto, S. Higashitani, and K. Nagai, *Phys. Rev. Lett.* **103**, 155301 (2009).

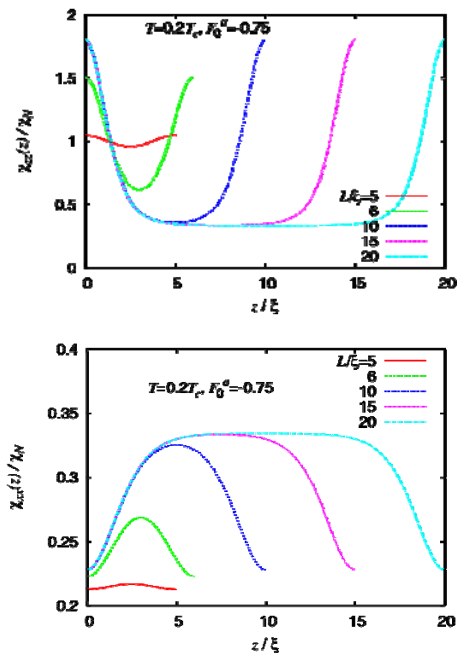


図1: 超流動ヘリウム3 B相薄膜のスピンド磁率の空間依存性。横軸はコヒーレンス長でスケールした膜厚方向の位置座標。表面に垂直に磁場をかけた場合(上のパネル)、表面付近で帯磁率が增大する。磁場を表面に平行にかけた場合は(下のパネル)、このような増大はない。

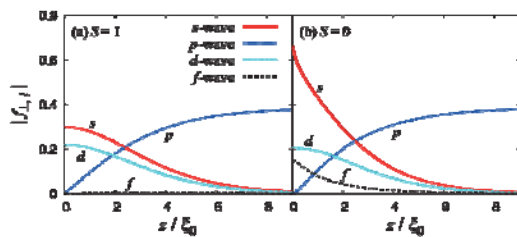


図2: 超流動ヘリウム3 B相の表面状態。横軸はコヒーレンス長でスケールした表面からの距離。Sは表面の鏡面度を表すパラメータで、S=1は鏡面極限、S=0は散漫散乱極限に対応する。図中のs, d波(p, f波)対振幅は奇周波数(偶周波数)対称性をもつ。

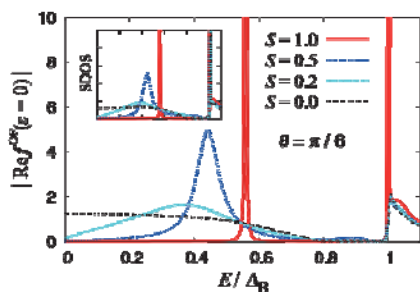


図3: 超流動ヘリウム3 B相の表面奇周波数対振幅のエネルギー依存性。挿入図は表面状態密度。

4. 研究成果

超流動ヘリウム3薄膜のスピンド磁率に関する研究において以下の成果を得た。

超流動ヘリウム3 B相のアンドレーエフ束縛状態に関して、スピンド演算子の行列要素を計算すると、スピンド演算子の表面に平行な成分の行列要素はゼロになり、垂直成分のみが有限な行列要素をもつという結果が得られた。アンドレーエフ束縛状態は、磁場を表面に垂直にかけた場合にのみ磁化に寄与するのである。

このようなアンドレーエフ束縛状態の特異な磁気的性質は、超流動薄膜系の磁気異方性として観測できると考えられる(図1参照)。

この成果は日本物理学会の欧文誌 Journal of Physical Society of Japanの2009年12月号に掲載され、注目論文に選ばれた(発表論文8)。

表面奇周波数状態の研究において以下の成果を得た。

超流動ヘリウム3 B相の表面付近に、偶周波数・奇周波数共存状態が実現することを明らかにした。図2に示した数値計算結果からわかるように、表面のラフネスの度合いに関わらず、常に大きな振幅をもった奇周波数クーパー対が表面近傍に形成される。

奇周波数対振幅のエネルギー依存性についても詳細な解析を行い、表面に形成される奇周波数クーパー対とアンドレーエフ束縛状態の間に極めて密接な関係があることを見いだした。図3に、超流動ヘリウム3 B相における奇周波数対振幅の表面値のエネルギー依存性を示した。挿入図の表面状態密度と比較すると、両者は非常によく似たエネルギー依存性をもっていることがわかる。ゼロエネルギー極限では、両者の値は厳密に一致することを解析的に示すことができる。鏡面極限におけるギャップ内の鋭いピークは(赤線)、アンドレーエフ束縛状態に対応している。表面の鏡面度Sが小さくなるにつれて、ピークはブロードになり、低エネルギー領域に尾を引く。このため、表面のラフネスの度合いが大きいほど、ゼロエネルギー状態密度が増加する。

超流動ヘリウム3 B相の表面状態密度が、上記のようなギャップ内構造をもつことは、東工大の実験グループによる横波音響インピーダンス測定によってすでに観測されている。インピーダンスの周波数依存性には、ゼロエネルギー状態密度を反映した構造が見られる。この実験結果は、アンドレーエフ束縛状態とともに、奇周波数クーパー対が実際に超流動ヘリウム3 B相の表面近傍に存在していることを強く示唆していると言える。

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 8 件)

1. H. Takeuchi, S. Higashitani, K. Nagai, H. C. Choi, B. H. Moon, N. Masuhara, M. W. Meisel, Y. Lee, N. Mulders, Knudsen-to-hydrodynamic crossover in liquid ^3He in a high-porosity aerogel, Phys. Rev. Lett. (2012) in press (査読有)
2. S. Higashitani, S. Matsuo, Y. Nagato, K. Nagai, Odd-frequency Cooper pairs near the surfaces of superfluid $^3\text{He-B}$, Journal of Physics: Conference Series (2012) in press (査読有)
3. K. Nagai, Y. Nagato, S. Higashitani, Low Temperature Properties of the Mermin-Ho Texture of Superfluid ^3He in a Cylinder, Journal of Physics: Conference Series (2012) in press (査読有)
4. H. Takeuchi, S. Higashitani, K. Nagai, Drag force on a high porosity aerogel in liquid ^3He , Journal of Physics: Conference Series (2012) in press (査読有)
5. S. Higashitani, S. Matsuo, Y. Nagato, K. Nagai, S. Murakawa, R. Nomura, Y. Okuda, Odd-frequency Cooper pairs and zero-energy surface bound states in superfluid ^3He , Phys. Rev. B **85** (2012) 024524 [5 pages] (査読有)
DOI:10.1103/PhysRevB.85.024524
6. Y. Nagato, S. Higashitani, K. Nagai, Subgap in the Edge States of Two-Dimensional Chiral Superconductor with Rough Surface, J. Phys. Soc. Jpn. **80** (2011) 113706 [4 pages] (査読有)
DOI: 10.1143/JPSJ.80.113706
7. S. Murakawa, Y. Wada, Y. Tamura, M. Wasai, M. Saitoh, Y. Aoki, R. Nomura, Y. Okuda, Y. Nagato, M. Yamamoto, S. Higashitani, K. Nagai, Surface Majorana Cone of the Superfluid $^3\text{He B}$ Phase, J. Phys. Soc. Jpn. **80** (2011) 013602 [4 pages] (査読有)
DOI: 10.1143/JPSJ.80.013602
8. Y. Nagato, S. Higashitani, K. Nagai, Strong Anisotropy in Spin Susceptibility of Superfluid $^3\text{He-B}$ Film Caused by Surface Bound States, J. Phys. Soc. Jpn. **78** (2009) 123603 [4 pages]. (査読有)
DOI: 10.1143/JPSJ.78.123603

[学会発表] (計 7 件)

1. 竹内宏光, 東谷誠二, 永井克彦, エアロジェル中液体ヘリウム 3 における音波の減衰, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011 年 9 月 21 日-24 日 (富山大学)
2. K. Nagai, Low Temperature Properties of the Mermin-Ho Texture of Superfluid ^3He in a Cylinder, The 26th International Conference on Low Temperature Physics, August 10-17, 2011, Beijing, China
3. S. Higashitani, Odd-Frequency Cooper Pairs near the Surfaces of Superfluid $^3\text{He-B}$, The 26th International Conference on Low Temperature Physics, August 10-17, 2011, Beijing, China
4. 永井克彦, 円筒内の Mermin-Ho 状態の準古典的理論による解析, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010 年 9 月 23 日-26 日 (大阪府大)
5. S. Higashitani, Proximity induced odd frequency pair in liquid ^3He in aerogel, International Symposium on Quantum Fluids and Solids, August 1-7, 2010, Grenoble, France (招待講演)
6. 東谷誠二, 超流動ヘリウム 3 におけるアンドレーエフ束縛状態の理論, 日本物理学会第 65 回年次大会, 2010 年 3 月 20 日-23 日 (岡山大学)
7. 永井克彦, 東谷誠二, 長登康, 高木丈夫, 超流動 $^3\text{He-B}$ 薄膜の非均一状態, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 2009 年 9 月 25 日-28 日 (熊本大学)

[その他]

ホームページ等

科学新聞 2010 年 1 月 8 日 (4 面)

「超流動 ^3He の B 相薄膜のスピン帯磁率の強い異方性—広島大の研究グループ、理論的に示す—」

下記 URL に関連する日本語解説記事

http://www.jps.or.jp/books/jpsjselectframe/2009/2009_12.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

東谷 誠二 (HIGASHITANI SEIJI)

広島大学・大学院総合科学研究科・准教授

研究者番号: 70304368

(2) 研究分担者

永井 克彦 (NAGAI KATSUHIKO)

広島大学・大学院総合科学研究科・名誉教授

研究者番号: 90034743

(3) 連携研究者

()

研究者番号: