

報告番号	甲 第 14045 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 **Odd-frequency pairing in a one-dimensional topological superconductor**
(1次元トポロジカル超伝導体における奇周波数クーパー対の理論)

氏 名 高木 大治郎

論 文 内 容 の 要 旨

本論文では、1次元トポロジカル超伝導体におけるマヨラナ粒子と奇周波数クーパー対の関係について述べる。1章では、本論文を理解するのに必要な前提知識について述べる。超伝導、BCS理論、異方的超伝導体、アンドレーエフ反射、トポロジカル超伝導体、マヨラナ粒子、奇周波数クーパー対について説明する。従来型の超伝導は電子-格子相互作用により2電子間に引力が働き、クーパー対を形成するというBCS理論によって説明される[1]。BCS理論から予測される超伝導転移温度は30K程度と言われていた。しかしながら、液体窒素(77K)の沸点を超える銅酸化物高温超伝導体が発見された[2]。その後、銅酸化物超伝導体がd波の対称性をもつことが示された[3,4]。その他にも、 ^3He 超流動[5]、 Sr_2RuO_4 [6]がp波の対称性、 UPt_3 [7]、 UCoGe [8]、 UTe_2 [9]がf波の対称性をもつことが指摘されている。超伝導のペアポテンシャルが波数に対して符号変化し、ギャップが閉じる点をもつものを異方的超伝導体という。

トポロジカル超伝導体は通常の超伝導体とトポロジカル数によって区別される。これはドーナツとボールが穴の数によって区別されるのと似ている。バルクで定義されたトポロジカル数によって、系の端に存在するエッジ状態の有無を区別することができる。

マヨラナ粒子は生成と消滅が区別できない準粒子であり、トポロジカル超伝導体の端にゼロエネルギー状態として現れることが知られている。外部からの擾乱に強いことから、量子コンピュータの量子ビットとしての応用が期待されている。このようなマヨラナ粒子を含めたエッジ状態を調べるのに奇周波数クーパー対が役立つことが知られている。

通常のクーパー対の分類はスピン1重項偶パリティとスピン3重項奇パリティであるが、ペア関数がクーパー対を構成する2電子の時間の入れ替えに対して反対称なペアを考慮すると新たに、奇周波数スピン3重項偶パリティと奇周波数スピン1重項奇パリティの存在が可能になる[10,11]. この奇周波数クーパー対はシングルバンドの超伝導のバルクでは存在が難しく、端や接合をつくる、もしくは磁場を印加することによって、偶周波数クーパー対から生成される. 奇周波数クーパー対は長距離近接効果[12], 常磁性体マイスナー応答[13], 異常近接効果[14]など奇妙な物理現象を引き起こすことが知られている.

2章では, Kitaev 鎖システムにおけるトポロジカル臨界点近傍の超伝導近接効果について述べる[15]. Kitaev 鎖は, スピンレス p 波の対称性をもち, マヨラナ粒子を説明する最も簡単なモデルである[16]. そのトポロジカル相は金属状態のエネルギーバンドによって説明される. マヨラナ粒子と奇周波数クーパー対の関係を扱ったものは, 超伝導ナノワイヤーにおけるグリーン関数の計算[17]やスペクトルバルクエッジ対応[18]などがある. しかし, 両者の空間依存性の類似性について扱ったものはなかった. そこで, 本研究では, Kitaev 鎖の半無限系におけるゼロ周波数近傍の通常グリーン関数(マヨラナ粒子のゼロエネルギー状態に対応する), 異常グリーン関数(奇周波数ペア振幅に対応する)と先行研究で解析的に得られているマヨラナ波動関数[19]を空間的に比較した. 結果として, トポロジカル相やトポロジカル臨界点近くのとポロジカル相において, マヨラナ粒子と奇周波数クーパー対の空間依存性が低周波数領域で一致することを示した. また, トポロジカル相において, 系の端に強く局在する奇周波数ペア振幅が, トポロジカル臨界点ではバルクに向かって広がる特徴を示すことがわかった.

次に, 常伝導金属/不純物を含む金属/Kitaev 鎖の接合における超伝導近接効果についてトポロジカル臨界点近傍を含む領域で調べた. これまでの異常近接効果の研究は解析的な計算をするのに役立つことから準古典近似を用いて計算されてきた[20]. しかしながら, トポロジカル臨界点近傍では, エネルギー変化に対して波数の変化が大きいため近似が破れてしまう. そこで, 再帰グリーン関数法を用いて奇周波数スピン3重項, ぐう周波数スピン1重項のペア振幅の空間依存性を計算した. また, 局所状態密度と微分コンダクタンスについても調べた. その結果, トポロジカル臨界点近傍やトポロジカル臨界点直上では奇周波数ペア振幅の値は抑えられるものの, 奇周波数クーパー対に支配された近接効果が起こることを示した. このとき, トポロジカル臨界点直上ではエネルギーギャップが閉じるために, 微分コンダクタンスの量子化は起こらないが, ゼロエネルギーに状態が存在することを示した.

さらに, トポロジカル臨界点近傍での奇周波数ペア振幅の減少が金属・絶縁体転移によるものではなく, トポロジカル転移によるものであることを示すために, Kitaev 鎖を s 波超伝導体に変え計算を行った. s 波超伝導の場合はトポロジカル臨界点近傍の絶縁体相においても近接効果が起こるのに対し, Kitaev 鎖の場合は非トポロジカル相において近接効果が起こっていなかった. このことからトポロジカル臨界点付近での奇周波数ペア振幅の減少は

Kitaev 鎖のトポロジカル転移に起因することを示した.

3 章では, 非ユニタリ p 波超伝導体において, 複数のマヨラナ粒子が存在するトポロジカル相を奇周波数クーパー対の観点から調べた結果について述べる [21]. スピンレスの p 波の Kitaev 鎖では, 系の端に存在するマヨラナ粒子は 1 つであった. しかしながら, アップスピンとダウンスピンに局在したペアポテンシャルをもつ p 波超伝導体に磁場を印加し, 3 次近接のホッピングを考慮すると, 系の端にマヨラナ粒子が 2, 3, 4 個存在する状態が実現する [22]. このような複数のマヨラナ粒子をもつ系における奇周波数クーパー対の振る舞いを対象とした研究はほとんど存在していないことから, 本研究では, この系におけるマヨラナ粒子と奇周波数クーパー対の関係, 奇周波数ペア振幅の空間依存性とスピン構造について調べた.

本研究において, 半無限系を仮定し局所状態密度に着目をする, 系に存在するマヨラナ粒子が同じゼロエネルギー状態に属するため, その違いを議論するのは容易ではない. そこで, 本研究ではマヨラナ粒子を壊すことを考えた. 具体的には有限のシステムサイズを変化させ系の左右のマヨラナ粒子を干渉させた. また, 系のもつカイラル対称性を壊すために特定方向に微小磁場を印加し, その影響を調べた. まず, マヨラナ粒子に対応する低エネルギーモードのシステムサイズ依存性の計算を行った. その結果, マヨラナ粒子の数が 3, 4 の場合には異なる局在長をもつ低エネルギーモードが存在することがわかった. また, カイラル対称性を破る磁場を印加することによって, 偶数個のマヨラナ粒子をもつ相は非トポロジカル状態に奇数個のマヨラナ粒子をもつ相は 1 個のマヨラナ粒子をもつトポロジカル相に変化することがわかった.

同様に, 系の端の奇周波数ペア振幅のシステムサイズ依存性をグリーン関数を用いて計算した. マヨラナ粒子が 1, 2 個の場合はこのシステムサイズ依存性が 1 つの停滞期をもつことに対し, マヨラナ粒子が 3, 4 個の場合はシステムサイズ依存性が 2 つの停滞期をもつことを示した. この 2 つの停滞期は局在長の異なる 2 つの低エネルギーモードの存在に対応している. また, カイラル対称性を破る弱い磁場を印加した場合は, この停滞期の構造は保持される. これはつまり, 奇周波数ペア振幅の振る舞いがマヨラナ粒子がそこに存在したという足跡となっていることを意味する. カイラル対称性を破る強い磁場を印加した場合, 偶数個のマヨラナ粒子をもつ相の奇周波数ペア振幅は著しく減少してしまう. 奇数個のマヨラナ粒子をもつ相の奇周波数ペア振幅は減少せず, 特に 3 個のマヨラナ粒子をもつ相では, システムサイズ依存性の停滞期の数が 2 つから 1 つに変化する. 奇周波数ペア振幅のシステムサイズ依存性の停滞期の数とカイラル対称性を破る磁場への応答から, 系の端に存在するマヨラナ粒子の数を区別することができる.

系のトポロジカル状態を特徴づける巻き付き数の構造から, 複数のマヨラナ粒子をもつ相にたどり着くには, 非ユニタリのペアポテンシャルが必要であることがわかる. そこで, この非ユニタリなペアポテンシャルが奇周波数クーパー対のスピン構造にどのような影響を与えるのかを調べた. スピン構造を調べる上で, スピン 3 重項ペアポテンシャルを特徴づけ

る d ベクトルにならない, 奇周波数ペア振幅から f ベクトルを定義し, $if \times f^*$ を奇周波数クーパ
ー対のスピンの偏極として計算を行った. 結果として, f ベクトルの向きは全てのトポロジカ
ル相で同じ向き(磁場とほぼ垂直方向)に固定され, 奇周波数クーパ対のスピンは磁場の向
きに傾けられることがわかった.

4 章では, 本論文のまとめと展望を述べる. 本論文では, マヨラナ粒子をもつトポロジカル
超伝導体の理解に奇周波数クーパ対が役に立つことを示している. しかしながら, 実験
での再現が難しいものを扱っている. そのため, 超伝導ナノワイヤーから構成されている
実験に近いモデルにおける輸送現象を扱うことが今後の課題としてあげられる.

- [1] J. Bardeen, L. N. Cooper, and J. R. Schrieffer Phys. Rev. 108, 1175 (1957).
- [2] J. G. Bednorz and K. A. Müller Z. für Phys. B 64, 189 (1986).
- [3] S. Kashiwaya, Y. Tanaka, M. Koyanagi, H. Takashima, and K. Kajimura Phys. Rev. B 51, 1350 (1995)
- [4] Y. Tanaka and S. Kashiwaya Phys. Rev. Lett. 74, 3451 (1995).
- [5] D. D. Osheroff, R. C. Richardson, and D. M. Lee, Phys. Rev. Lett. 28, 885 (1972).
- [6] Y. Maeno, H. Hashimoto, K. Yoshida, S. Nishizaki, T. Fujita, J. G. Bednorz, and F. Lichtenberg, Nature 372 532 (1994).
- [7] G. R. Stewart, Z. Fisk, J. O. Willis, and J. L. Smith, Phys. Rev. Lett. 52, 679 (1984).
- [8] N. T. Huy, A. Gasparini, D. E. de Nijs, Y. Huang, J. C. P. Klaasse, T. Gortenmulder, A. de Visser, A. Hamann, T. Görlach, and H. v. Löhneysen, Phys. Rev. Lett. 99, 067006 (2007).
- [9] S. Ran, C. Eckberg, Q.-P. Ding, Y. Furukawa, T. Metz, S. R. Saha, I.-L. Liu, M. Zic, H. Kim, J. Paglione, and N. P. Butch, Science 365, 684 (2019).
- [10] V. L. Berezinskii, JETP Lett. 20, 287 (1974).
- [11] A. Balatsky and E. Abrahams, Phys. Rev. B 45, 13125 (1992).
- [12] F. S. Bergeret, A. F. Volkov, and K. B. Efetov, Phys. Rev. Lett (2001).
- [13] W. Braunisch, N. Knauf, V. Kataev, S. Neuhausen, A. Grütz, A. Kock, B. Roden, D. Khomskii, and D. Wohlleben, Phys. Rev. Lett. 68, 1908 (1992).
- [14] Y. Tanaka and S. Kashiwaya, Phys. Rev. B 70, 012507 (2004).
- [15] D. Takagi, S. Tamura, Y. Tanaka, Phys. Rev. B 101, 024509 (2020).
- [16] A. Y. Kitaev, Usp. Fiz. Nauk (Suppl.) 44, 131 (2001).
- [17] Y. Asano and Y. Tanaka, Phys. Rev. B 87, 104513 (2013).
- [18] S. Tamura, S. Hoshino, and Y. Tanaka, Phys. Rev. B 99, 184512 (2019).
- [19] S. S. Hegde, S. Vishveshwara, Phys. Rev. B 94, 115166 (2016).
- [20] Y. Tanaka, A. Golubov, Phys. Rev. Lett. 98, 037003 (2007).
- [21] D. Takagi, M. T. Mercaldo, Y. Tanaka, M. Cuoco, arxiv:2112.01009 (2021).

[22] M. T. Mercaldo, M. Cuoco, and P. Kotetes Phys. Rev. B 94, 140503(R).