

準結晶上の超伝導電流分布の理論的研究

Theoretical investigation of supercurrent distribution on quasicrystals

所属機関： 大阪大学

代表研究者氏名：竹森 那由多

研究期間： 2023年9月23日～2023年10月27日

区分：個人 A

滞在研究機関： Laboratoire de Physique des Solides, Université Paris-Saclay, 91405 Orsay, France

共同研究者等： Prof. Anuradha Jagannathan

This abstract summarizes the funding provided for a research project titled “Theoretical investigation of supercurrent distribution on quasicrystals.” The project explores the unique phenomenon of weakly-correlated superconductivity in quasicrystals without translational symmetry. Theoretical predictions made in 2017 were experimentally confirmed in 2018, establishing a foundation for further investigation. The objectives of this funding initiative include a collaborative research visit Prof. Anuradha Jagannathan to study superconducting current anomalies in quasicrystals and the development of a quantum computational algorithm to enhance numerical analyses. Expected outcomes include advancements in understanding weakly-correlated superconductivity, groundbreaking predictions of finite paramagnetic currents, and exploration of NISQ device applications in quantum many-body calculations.

海外研究活動概要

並進対象性のない準結晶において現れる弱相関超伝導は、理論的には2017年に代表者らが局所相関の解析により、有限の重心運動量をもつクーパー対により形成される非BCS型s-波弱結合超伝導の発現を予言し、実験的にも2018年にAl-Mg-Zn準結晶において発見された。本研究では、我々が発見した準結晶における非BCS型弱結合超伝導を特徴づける有限の重心運動量のクーパー対により引き起こされる超伝導電流の異常を予言するため、研究方法として、5回回転対称性を持つPenrose構造及び8回回転対称性を持つAmmann-Beenker (AB) 構造上で引力Hubbardモデルを導入し、Bogoliubov-de Gennes方程式を用いて解析を行なった。BdG方程式の固有値と固有関数を用いて、非一様系に一般に適用可能な局所超伝導電流を定式化し、(1)電子数、(2)温度、(3)ベクトルポテンシャルの印可角依存性を解析した。本海外助成を受けて、共同研究者のAnuradha Jagannathan教授(Université Paris-Saclay)・そして実験家のMarc de Boisseiu氏(Université Grenoble)を訪問し、準結晶超伝導体におけるクーパー対の特性および超伝導電流の異常についての議論と論文執筆を行った。さらに、これらの数値解析で用いられる一般化固有値解法の

量子計算アルゴリズム開発を行った。これにより、周期系では発見されていない絶対零度でも有限の常磁性電流の予言を行うとともに、NISQデバイスの量子多体計算への応用についても議論を行った。

研究活動は、渡航前からの準備が順調に進み、渡航中に最終の投稿作業を行い、結果的に帰国直後にPhys. Rev. Res.誌からアクセプトを得た。当初の計画よりも早く研究が進んだため、渡航中は本研究内容の発展的内容として、準周期系における磁束の効果などについて議論し、解析のために必要な数値計算プログラムを完成させ、帰国後も引き続き研究を行っている。また、本助成の一環として、本研究に関するセミナーを開催した。開催したセミナーの概要は以下の通りである。

セミナー名： Superconducting properties of quasicrystals

場所(日程): Institut Néel, Grenoble (10/16), Université Paris-Saclay, Orsay (10/19), École Polytechnique, Palaiseau (10/24)

また、量子多体系に適用可能な量子アルゴリズムの開発についても、関連する研究を行っている大学院生Bo Yang氏(Sorbonne Université)を訪問し、議論を行った。

成果

本研究から得られた主要な成果は以下の通りである。

1. 有限の重心運動量のクーパー対から形成される超伝導状態においては、常磁性電流が絶対零度でも有限となる。
2. 常磁性電流は印加されたベクトルポテンシャルに垂直な方向にも流れることがある。
3. 超伝導電流は、印加されたベクトルポテンシャルと逆方向（二つの内積が負の方向）にも流れることがある。

これらの結果は、2,3 については現在まで報告例のないエキゾチックな超伝導特性を発見したという意義がある。また、1.については、準周期系のみではなく、有限重心運動量を持つ超伝導体中で一般に現れる性質である。例えば、周期系で注目を集めている FFLO(Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov)状態でも起こりうる物理現象である。FFLO 状態は磁場の微細なコントロールが必要である一方で、準周期系における有限重心運動量を持つクーパー対による超伝導状態は、ゼロ磁場で実現可能であるため、実験探索をしやすい系であるというアドバンテージがあり、今後の進展が期待される。

また、量子アルゴリズムについては、フェルミオン画像法によって高次の縮約密度行列の評価を効率化することで、量子アルゴリズムの一つである量子部分空間展開法に必要とされるコストを大幅に削減した。これにより、相関電子系を記述する際にボトルネックを低減することが可能となる。

今後の展望

現在の研究から得られた知見を活かし、今後の研究では、さらに実験家を意識した理論解析を行なっていきたいと考えている。特に、我々が予測している有限重心運動量を実験的に測定する方法の提案や、実験家と協働して有限重心運動量の特徴づける量についての研究を通じた超伝導形成機構の議論などに繋げていきたい。この研究の成果は、周期結晶において注目を浴びている FFLO 超伝導現象に関連する実験観測量についても予測可能となるという分野を超えた波及効果が期待される。

また、量子アルゴリズム開発の観点からは、本研究腕開発した手法は、高次の縮約密度行列を必要とする Adaptive Derivative-Assembled Pseudo-Trotter

ansatz VQE (ADAPT-VQE)や Quantum equation of motion と呼ばれる量子アルゴリズムにそのまま適用可能であり、これらのアルゴリズムのボトルネックを大幅に軽減するため、従来よりも多い軌道数を持つシステムの実機を用いた解析が可能となる。

おわりに

本稿では、フランスの Laboratoire de Physique des Solides, Université Paris-Saclay 滞在中に議論及び取りまとめを行なった研究の成果に関して述べてきた。滞在中から継続して、本研究を発展させた研究も開始した。このような研究と交流の場を通して、研究についてはもちろんのこと、今後のキャリア形成についても考える良い機会となった。また、研究所内のたくさんの理論家・実験家とじっくり議論する機会にも恵まれ、研究の人脈も広がり、新たな共同研究の可能性も広がった。このような機会を与えてくれた貴財団に末筆ながら深謝申し上げたい。また、快く送り出してくれた家族にも感謝したい。

研究の発表

口頭発表

1. Nayuta Takemori, “Correlated electronic states in quasicrystals”, ICQ15 - The 15th International Conference on Quasicrystals, 2023 -- Jun 23, 2023
2. Nayuta Takemori, “Superconducting properties of quasicrystals and its approximants”, SCES2023, Jul 2, 2023 -Jul 7, 2023
3. 竹森那由多、「準周期系における非 BCS 型弱結合超伝導と超伝導電流」、研究会「強相関電子系のフロンティア」、名古屋大学、2023 年 8 月 21—22 日 [招待講演]
4. 福嶋拓海, 竹森那由多, 酒井志朗, 市岡優典, Anuradha Jagannathan, 「準結晶における超伝導電流の空間分布と常磁性電流の応答」、日本物理学会第 78 回年次大会 (2023 年)、東北大学、2023 年 9 月 16 日 - 2023 年 9 月 19 日
5. 竹森那由多、「特異電子構造を持つ系における強相関多体効果の理論的研究」日本物理学会第 78 回年次大会 (2023 年)、東北大学、2023 年 9 月 16 日 - 2023 年 9 月 19 日 [受賞講演]
6. Nayuta Takemori, “Spatial Distribution of Supercurrent in a Quasiperiodic Superconductor”, International conference on complex orders in

condensed matter: aperiodic order, local order,
electronic order, hidden order, Sep 24, 2023 - Sep 29,
2023

誌上発表

1. T. Fukushima, N. Takemori, S. Sakai, M. Ichioka, A. Jagannathan, “Supercurrent Distribution on Ammann-Beenker Structure”, J. Phys. Conf.

Ser. **2461** 012014-012014 (2023).

2. T. Fukushima, N. Takemori, S. Sakai, M. Ichioka, A. Jagannathan, “Supercurrent Distribution in Real-Space and Anomalous Paramagnetic Response in a Superconducting Quasicrystal”, Phys. Rev. Res. accepted (2023).