

令和 2 年 5 月 25 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14350

研究課題名（和文）準周期系の超伝導の理論研究

研究課題名（英文）Theoretical study of superconductivity in quasiperiodic systems

研究代表者

酒井 志朗 (Sakai, Shiro)

国立研究開発法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・上級研究員

研究者番号：80506733

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：準結晶中で起こる超伝導の基本的性質を明らかにするとともに、磁場下で新しいタイプの超伝導状態を見出した。準結晶の原子配列は規則正しいものの周期的でない。従って、準結晶中を動く電子はフェルミ面をもたない。一方、超伝導の基礎理論であるBardeen-Cooper-Schrieffer(BCS)理論は、フェルミ面上での2電子が対を成すことを出発点としている。この前提が崩れる準結晶は、BCS理論が導く性質とは異なる超伝導物性を示す可能性がある。実際に、数値計算により種々の性質についてBCS理論の予測とは有意に異なる結果を得た。また、磁場下において秩序変数の符号の空間変化を伴う新しい超伝導状態を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

準結晶超伝導体の基本的性質を明らかにしたことは、今後の準結晶超伝導研究の土台を与える。特に、準結晶超伝導体と通常の超伝導体との物性における差異が明らかになったことは、その特徴を実験的に検出する上で重要である。また、磁場下の超伝導状態の研究を通して、準結晶がエキゾチック超伝導と呼ばれるタイプの非従来型超伝導体の候補と成り得ることを示した。更に、これらの研究によって明らかになったフラクタル的非一様性を有する超伝導状態は、今後、フラクタル構造と超伝導の協奏を研究する上での出発点となりうる。

研究成果の概要（英文）：We have revealed the fundamental properties of quasicrystalline superconductors, as well as finding a new type of superconducting state in quasicrystals under a magnetic field. Quasicrystal has a regular but aperiodic arrangement of atoms, and hence no Fermi surface. On the other hand, the Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS) theory, which is a fundamental theory of superconductors, starts from the pairing of two electrons on the Fermi surface. Since the quasicrystal breaks this prerequisite, it may show superconducting properties different from what the BCS theory tells. In fact, through numerical simulations, we have found that some superconducting properties of quasicrystals are substantially different from those of the BCS. We have also discovered a novel type of superconducting state under a magnetic field, which accompanies a spatial modulation of the phase of the order parameter.

研究分野：物性理論

キーワード：準結晶 超伝導 フラクタル 準周期系 非従来型超伝導

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本研究代表者は 2017 年の論文[1]で、並進対称性がなく運動量空間やフェルミ面を定義できない準結晶(準周期系)において超伝導が起こり得るのかという問題を調べ、ペンローズ格子上の引力ハバード模型の数値計算により、低温で超伝導秩序変数が空間変化する非一様な超伝導状態を見出した。その空間パターンは、ペンローズ格子がもつ自己相似性を反映したフラクタル模様を成しており、これまで別々に研究されてきたフラクタルと超伝導に接点があった。また、従来の超伝導理論(Bardeen-Cooper-Schrieffer 理論、以下 BCS 理論)はフェルミ面上の電子による対形成を出発点としているが、フェルミ面が存在しない準結晶における超伝導はその描像で捉えきれない。そのため、BCS 理論でよく説明される従来の超伝導体とは本質的に異なった性質をもつ可能性があり、それがどのような形で現れるか興味をもたれていた。

2. 研究の目的

準結晶超伝導体の基本的性質を明らかにすること、及び、従来の超伝導体にはない新しい現象を見出すことが本研究の目的である。特に、準周期構造がもつフラクタル性と超伝導の巨視的コヒーレンスが組み合わさって生じる新奇現象を開拓する。また、周期結晶超伝導体について BCS 理論が結論する種々の普遍的性質について、準結晶超伝導体における非周期性がどのような差異を生むのか明らかにする。更に、その結果をもとに、準結晶超伝導の特徴を抽出する実験方法の理論提案を行う。

3. 研究の方法

準結晶の構造は複雑であり周期性もないため、第一原理に基づいてその電子状態を論ずるのは難しい。そこで、準周期性と超伝導という問題の本質を捉えた上で単純化した理論模型に基づき、数値シミュレーションを行う。具体的には、ペンローズ格子上の引力ハバード模型を考える。周期性がないため、実空間でできるだけ大きなクラスターを扱う必要がある。本研究代表者は 2017 年の論文[1]で、この模型を自己無撞着に解くことにより、非一様な超伝導状態が得られることを示した。この超伝導状態の基本的性質について調べる。例えば、超伝導ギャップの大きさと臨界温度の比や、超伝導転移温度における比熱の跳びの大きさなど、BCS 理論において普遍的な値が得られている諸量について、準周期系でどのような値になるか計算する。また、計算値と BCS 理論値との違いを通して、どのような測定を行えば実験的に準結晶超伝導体の特徴を抽出できるか考察する。更に、引力ハバード模型に磁場項を付け加えることで、磁場下の超伝導状態のシミュレーションを行い、新奇現象を探索する。

4. 研究成果

(1) 超伝導ギャップと臨界温度の比は BCS 理論ではおよそ 3.53 であるが、我々の計算によってペンローズ格子上の引力ハバード模型ではおよそ 3.38 という値が得られた。これは、準結晶とは別の非周期系であるアモルファスの超伝導体で 4-5 程度の値(BCS 理論値よりも大きな値)が得られていることと対照的であり、準結晶における弱結合超伝導の存在を示唆する。また、比熱の跳びについても BCS 理論値よりも 10-20%程度小さな値が得られた。更に、電流-電圧特性に関して、周期系超伝導体に見られるような閾値における急激な電流の増加がなく、ほぼ電圧に対して線形に電流が増大することが分かった。これは、準結晶超伝導体の秩序変数が空間的に非一様で、電子状態密度がギャップ端で鋭いコヒーレンスピークを示さないことと関係している。この結果に基づいて、電圧閾値付近での電流-電圧曲線の傾きの温度変化を測定することで、準結晶超伝導体の特徴を捉えられることを提案した[2]。

(2) 準結晶超伝導体に対する磁場の効果を初めて理論的に考察した。数値シミュレーションによって、超伝導が壊れる臨界磁場直前の低温領域に、超伝導秩序変数の符号が空間変化する新しいタイプの超伝導状態を見出した。これは周期系で 1960 年代に理論提案された Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov (FFLO) 状態[3,4]と呼ばれる超伝導状態の準周期版と言える。ただし、周期系での FFLO 状態発現の物理描像はフェルミ面の存在を前提としていること、また FFLO 状態が乱れに弱いことを考えると、準周期系でこのような符号変化超伝導状態が安定化されたのは驚きであると言える。その符号変化の空間パターン(図 1)は温度や磁場、電子密度や電子間相互作用といったパラメータによって大きく変化する。この状態の磁場-温度相図(図 2)や磁場-電子密度相図を明らかにし、またフェルミ面の存在に基づかない実空間での物理的解釈を与えた。[5]

[1] S. Sakai, N. Takemori, A. Koga, and R. Arita, Phys. Rev. B 95, 024509 (2017).

[2] N. Takemori, R. Arita, and S. Sakai, arXiv: 2005.03127.

[3] P. Fulde and R. A. Ferrell, Phys. Rev. 135, A550 (1964).

[4] A. Larkin and Y. Ovchinnikov, Zh. Eksp. Teor. Fiz. 47, 1136 (1964).

[5] S. Sakai and R. Arita, Phys. Rev. Research 1, 022002 (2019).

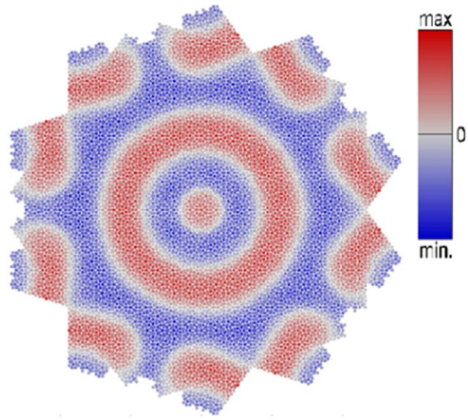


図 1: ペンローズ格子上の磁場下超伝導状態の秩序変数の実空間プロット。[5]

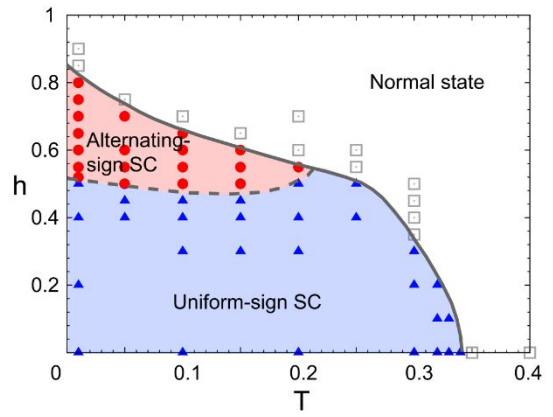


図 2: ペンローズ格子上の引カハバード模型の磁場(h)温度(T)相図。[5]

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 佐藤憲昭、神谷京佑、酒井志朗、竹森那由多	4. 巻 53
2. 論文標題 準結晶の超伝導 - フラクタル超伝導研究の黎明 -	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 固体物理	6. 最初と最後の頁 531-542
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sakai Shiro, Arita Ryotaro	4. 巻 1
2. 論文標題 Exotic pairing state in quasicrystalline superconductors under a magnetic field	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 022002-1,5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.1.022002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Nayuta Takemori, Ryotaro Arita, Shiro Sakai	4. 巻 2005.03127
2. 論文標題 Physical properties of weak-coupling quasiperiodic superconductors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 1,8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 3件/うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Shiro Sakai
2. 発表標題 Theoretical study of quasicrystalline superconductors
3. 学会等名 International Conference on Emerging Advanced Nanomaterials (ICEAN) 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shiro Sakai
2. 発表標題 Superconductivity on Penrose lattice
3. 学会等名 Open space between aperiodic order and strong electronic correlations (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shiro Sakai
2. 発表標題 Superconductivity on quasiperiodic lattice
3. 学会等名 the 28th International Conference on Low Temperature Physics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shiro Sakai
2. 発表標題 Theoretical study of quasicrystalline superconductors
3. 学会等名 CEMS Symposium on Trends in Condensed Matter Physics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shiro Sakai
2. 発表標題 Quasicrystalline superconductors under magnetic field
3. 学会等名 Spectroscopies in Novel Superconductors (SNS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shiro Sakai
2. 発表標題 Exotic pairing state in quasiperiodic superconductors under magnetic field
3. 学会等名 Interdisciplinary Symposium for Quasicrystals and Strongly Correlated Electron Systems (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 酒井志朗
2. 発表標題 準結晶超伝導の理論研究
3. 学会等名 京都大学基礎物理学研究所研究会 「電子相関が生み出す超伝導現象の未解決問題と新しい潮流」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shiro Sakai
2. 発表標題 Exotic superconductivity in quasicrystals under magnetic field
3. 学会等名 14Th ASIA-PACIFIC PHYSICS CONFERENCE (APPC2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----