

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 18 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400346

研究課題名(和文)多バンド超伝導体バルク・表面・接合におけるヒッグス・モード

研究課題名(英文)Higgs mode in bulk, surface and junction of multiband superconductors

研究代表者

小山 富男 (Koyama, Tomio)

東北大学・金属材料研究所・教育研究支援者

研究者番号：30153696

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：超伝導状態における励起モードとして、超伝導ギャップの振動モードに対応する集団励起モードが存在する。本研究では、複数の伝導帯を持つ多バンド超伝導体系におけるギャップの振動モードを理論的に考察した。主要な成果は、時間反転対称性が破れた多バンド超伝導体における集団励起モードに対するRPA理論の構築、及び、電界効果により半導体表面に誘起された超伝導体におけるHiggsモードに対する理論の構築である。

研究成果の概要(英文)：In the superconducting state we have collective excitation modes, which are the oscillation modes of the superconducting gap. In this research project we developed a theory for the collective excitation modes in superconductors with multiple conduction bands, i.e. multiband superconductors. The main results of our research are as follows. We constructed a theory based on the RPA approximation for the collective excitation modes in the time-reversal-symmetry-breaking phase of multiband superconductors and a theory for the Higgs mode in field-effect superconductors.

研究分野：凝縮系物理学

キーワード：多バンド超伝導体 集団励起モード ヒッグスモード

1. 研究開始当初の背景

本研究課題において研究対象とする多バンド超伝導体とは、複数の伝導バンドを持ち、かつ、各バンドで明瞭に定義できる超伝導秩序パラメータを持つ超伝導体をいう。2000年以降に発見された高い超伝導転移温度を持つ MgB_2 や鉄系超伝導体が、このような多バンド超伝導体に属することから、近年、多バンド超伝導体に関する研究が活発に行われるようになってきている。本研究では、このような多バンド超伝導体における集団励起モードをテーマに選んでいる。

超伝導状態には、ギャップを持つ1電子励起の他に、超伝導ギャップの振動状態に対応する2電子励起、すなわち、集団励起が存在する。また、超伝導ギャップは、複素数値をとることが許されるので、ギャップの振動モードは、一般的に振幅モードと位相モードに分離することができる。位相モードは、 $U(1)$ 対称性の破れから生じる南部 Goldstone モード、また、振幅モードは Higgs・モードと解釈される。近年、高エネルギー物理学の分野で、ヒッグズ粒子が実験的に検出されたことから、超伝導研究の分野においても Higgs モードの研究が関心を呼んでいる状況である。

超伝導体における集団モードに関する研究は、長い歴史を持つ。しかし、これまでに確立している先行研究は、一様な単一バンドを持つ単純な系を対象にしたものに限られており、多バンド系などの凝縮系特有の複雑な構造を持つ系に対しては、十分な研究が行われてきているとは言い難い。したがって、本研究では、多バンド超伝導体における集団励起モードを統一的に理解する基礎理論の構築を目指している。特に、任意のバンド数を持ち、かつ、ギャップが複素数値を取りうる一般的な場合に対して、位相モードと振幅モードを Ward-高橋恒等式を満たす近似の下で系統的に計算できる手法の開発を主要テーマとした。

超伝導体における集団励起モードの実験的検証を可能とする新超伝導体の発見、及び、実験法の確立も必要とされる状況にある。これは、従来型超伝導体におけるギャップの振動モードが、電氣的に中性なモードであるため、実験的に観測しにくいモードであるからである。このため、集団励起モードの研究に適した系の探索が急務であった。近年発見された強電場中で半導体表面に誘起される電界効果超伝導体のギャップ・モードは、荷電モードである可能性が高く、集団励起モードの実験に適した系であると考えられる。したがって、本研究では電界効果超伝導体中における集団励起モードに対しても研究を行うことにした。

2. 研究の目的

本研究では、多バンド超伝導体における集団励起モードを、統一的に理解することがで

きる基礎理論の構築を目指し、以下の課題に取り組む。

(1) 集団励起モードを近似的に計算するための信頼できる計算法を確立する。このために、場の量子論的手法を用いて、準粒子に対する平均場理論と矛盾しない集団励起モードに対する RPA 近似を構築する。

(2) バンド数が3以上の多バンド超伝導体では、バンド間の BCS 結合定数がフラストレートしている場合に、時間反転対称性が破れた超伝導状態 (TRS B 相) が出現する。この相では、必ず複素数値をとるギャップが現れる。このような複素ギャップを持つ TRS B 相における集団励起モードに対しては、信頼できる近似法は確立していない。本研究では、Ward-高橋恒等式を満たす摂動法を開発し、この方法を用いて TRS B 相における集団励起モードの計算を行う。また、長距離クーロン相互作用がある場合の計算も行い、多バンド系における Anderson-Higgs 機構も考察する。

(3) Higgs モードは、中性モードであるため、電磁場と直接的には結合しない。このため、Higgs モードの実験的検出は極めて難しいとされている。しかし、電界効果により半導体表面に誘起された超伝導系では、超伝導ギャップがゲート電圧に依存するため、振動電場の照射で Higgs モードが励起できる可能性がある。また、この系は本質的に多バンド系となるので、本研究の対象となる。したがって、電界効果により誘起された超伝導体における集団励起モードの理論の構築を行う。

3. 研究の方法

本研究は、理論研究であるので、解析的手法と計算機による数値計算を組み合わせた手法を用いて研究を行う。多バンド超伝導体に対するモデルとしては、多バンド BCS ハミルトニアンを採用する。このモデルでは、クーパ対は、同一バンド内の異なるスピンをもつ電子により形成される。また、クーパ対はバンド間 BCS 結合を通じて、バンド間をホッピングすることができる。具体的には、場の量子論的手法を用いて、 N -バンド・BCS ハミルトニアン系で成立する Ward-高橋恒等式を導出する。次に、この恒等式を用いて、多バンド系の集団励起モードを、位相と振幅の両セクターで同等の近似で系統的に計算することが可能な摂動理論を構築する。

4. 研究成果

(1) 多バンド超伝導体に対する N -バンド BCS ハミルトニアンは、 $U(1)$ 対称性を持つが、超伝導基底状態では、この対称性は自発的に破れる。このような自発的対称性の破れがある系において、電子の self-energy と vertex 関数の間に厳密に成立する Ward-高橋恒等式を N -バンド系で導出した。さらに、

超伝導電子と集団モードとの相互作用を記述する vertex 関数を適切に定義すると、集団励起モードの計算に利用できる有用な関係式が導き出せることを明らかにした。また、この関係式を用いると、電子の self-energy に対してハートリー近似を用いる場合、vertex 関数が一意的に決定できることを見出した。以上の成果は、学術誌に論文として発表した。【T. Koyama, J. Phys. Soc. Jpn. 83, 074715 (2014)】

(2) 上記の成果を用いて、N-バンド系の集団励起モードを乱雑位相近似(RPA)の範囲で種々の系で計算した。バンド数が3以上の系では、時間反転対称性が破れた超伝導状態(TRSB相)が出現し得ることが知られている。この状態における集団励起モードをRPA近似で計算する場合に必要な vertex 関数が Ward-高橋恒等式を用いると一意的に決定できることを明らかにした。また、BCS結合定数による摂動展開で現れる摂動級数を、位相モードが現れる channel と振幅モードが現れる channel に正しく分離する方法を与えた。この方法を用いることにより、TRSB相では、新たに、位相モードと振幅モードが結合する channel が現れることを見出した。したがって、TRSB相における集団励起モードは、バンド数に一致する数の位相モードと振幅モードの他に、位相モードと振幅モードが結合した励起モードが存在することがわかる。集団励起モードに対する具体的計算は、3-バンド系に対して行い、これらの励起モードのスペクトル形状を明らかにした。さらに、我々の計算では、TRSB相が現れる量子臨界点で、レグレット・モードがソフト化することを正しく記述することも示した。また、TRSB相における Anderson-Higgs 機構を与える摂動理論も構築することもできた。以上の成果は、学術誌に論文として発表した。【T. Koyama, Phys. Procedia 81, 25 (2016); J. Phys. Soc. Jpn. 85, 064715 (2016)】

(3) 最近、電界効果を用いて半導体表面に誘起した準2次元伝導電子系で、超伝導が発現することが報告されている。この系は、本質的に多バンド系であり、かつ、ゲート電圧を変化させることにより、バンド数を変えることも可能である。また、Higgs モードは、従来型超伝導体では中性モードであるのに対し、この系では、ギャップの大きさがゲート電圧に依存するので、Higgs モードも振動電場と結合する荷電モードとなることが期待できる。以上のことから、電界効果超伝導体は多バンド系の Higgs モードの研究に適した系であることがわかる。本研究では、RPA近似を用いて、電界効果超伝導体における Higgs モードの計算を行った。さらに、線形応答の範囲で、振動電場に対する応答スペクトルの計算も行った。この結果を用いると、テラヘルツ領域の時間分解型ポンププローブ分光で得られるスペクトルに対する

Higgs モードの効果が計算可能となる。以上の成果は、学術誌に論文として発表した。【T. Koyama, Phys. Rev. B 90, 064514 (2014)】

(4) 多バンド超伝導体における古典的超伝導電流が満たす巨視的方程式の導出を行った。このために、まず、梅沢グループにより70年代に開発された boson method と呼ばれる場の理論の手法を多バンド系に拡張することを試みた。この方法を用いると、N-バンド系の電子の Heisenberg 演算子を、超伝導状態における物理的粒子である準粒子の演算子で表現する dynamical map を決定することができる。さらに、U(1)対称性を物理的粒子の対称性に map する dynamical rearrangement of symmetry も明らかにした。以上の結果を用いることにより、超伝導電流に対する非局所的な巨視的方程式を導出できる。この理論から、多バンド超伝導体における渦糸間の相互作用を微視的なバンドパラメータを用いて表現することを行った。得られた結果から、第1種超伝導体的なパラメータを持つバンドと第2種超伝導体的なパラメータを持つバンドが存在する2バンド系で渦糸間相互作用に引力部分が現れる条件を明らかにした。以上の成果は、日本物理学会(2016.9 金沢大学)で口頭発表した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

T. Koyama, “Perturbative Approach to the TRSB Phase of Multiband Superconductors”, 査読有, J. Phys. Soc. Jpn. 5, 064715/1-11 (2016), DOI: 10.7566/JPSJ.85.064715

T. Koyama, “Collective modes in the TRSB phase of multiband superconductors”, 査読有, Physics Procedia 81, 25-28 (2016) DOI: 10.1016/j.phpro.2016.04.011

T. Koyama, “Higgs mode in electric field induced superconductors”, 査読有, Phys. Rev. B90, 064514/1-7 (2014) DOI: 10.1103/PhysRevB.90.06451

T. Koyama, “Collective Modes in Multiband Superconductors: Rigorous Study Based on the Ward-Takahashi Relations”, 査読有, J. Phys. Soc. Jpn. 83, 074715/1-4 (2014) DOI: 10.7566/JPSJ.83.074715

〔学会発表〕(計 4 件)

小山富男 「多バンド超伝導体における非局所ロンドン方程式」日本物理学会2016年秋季大会(2016年9月13-16、金沢大学、金沢)

小山富男 「固有ジョセフソン接合における超伝導位相のダイナミクス」日本物理学会第71回年次大会(2016年3月

19-22 日 東北学院大学、仙台)

T. Koyama, “Collective modes in the TRSB phase of multiband superconductors”, 28th International Symposium on Superconductors (2015 年 11 月 16-18 日 船堀タワーホール、東京都江戸川区)

T. Koyama, “Higgs mode in multiband superconductors”, 27th International Symposium on Superconductors (2014 年 11 月 25-27 日、船堀タワーホール、東京都江戸川区)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小山富男 (KOYAMA, Tomio)
東北大学・金属材料研究所・教育研究支援者
研究者番号：30153696

(2) 連携研究者

町田昌彦 (MACHIDA, Masahiko)
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・計算科学技術センター・研究主幹
研究者番号：60360434