

令和元年6月11日現在

機関番号：32615

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05183

研究課題名(和文) さまざまな振動数依存性を考慮した超伝導集団励起運動の包括的な理論研究

研究課題名(英文) Theoretical Study of Superconducting Collective Excitations Taking Account of Various Frequency Dependences

研究代表者

平島 大 (HIRASHIMA, DAI)

国際基督教大学・教養学部・教授

研究者番号：20208820

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：さまざまな振動数依存性に注目して、超伝導状態における集団励起運動の研究を行った。まず、時間に関して奇対称の超伝導状態の安定性について研究した。バルクにおいては、安定な解は見出されなかった。弱結合および強結合超伝導体における振幅モードと外部プローブの結合の可能性について検討したが、これまでのところ結合の可能性は見出されていない。一般的な議論から、非保存量に着目する必要があることが結論される。

準1次元量子ハードコアボソン系の超流動密度を、量子モンテカルロ法を用いて計算した。古典系と同じく、位相スリップの抑制によって、1次元極限においても有限温度で有限の超流動密度が得られることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超伝導や超流動はきわめて基本的な量子多体現象である。素粒子物理学におけるヒッグス粒子の発見とも深く関連しているように、物理学における基本的な問題として、研究を進める意義の深い問題である。本研究では必ずしも肯定的な成果は十分に得られなかったが、今後の研究の方向について重要な示唆が得られた。今後の基礎学理として超伝導、超流動研究に資するものである。

研究成果の概要(英文)： Superconducting collective modes are studied paying attention to various frequency dependence. First, the stability of odd-frequency pairing states is examined, but no stable bulk solution has been found. The possibility of coupling between the amplitude mode and external probes is studied not only for weak coupling superconducting state but also for strong coupling ones, where the frequency dependence of the orderparameter is important. However, no finite coupling has been found so far. From a general discussion, it is concluded that we should look at non-conserved quantities such as orbital-selective quantities to find a possible coupling of the amplitude mode.

Simulating a hard-core boson system on a quasi-one-dimensional lattice, it is shown that the superfluid density remains finite at finite temperatures even in the strongly one-dimensional limit if the effect of phase slippage is suppressed. This finding is consistent with the one for a classical system.

研究分野：物性理論

キーワード：超伝導集団励起 ヒッグスモード 奇数振動数対 流体力学的領域 強結合超伝導 準1次元超流動 位相スリップ

## 1. 研究開始当初の背景

超伝導状態における集団励起の研究は、BCS理論のゲージ不変な定式化の問題として、1958年にはP.W. Andersonによって行われた。その研究ではゲージ対称性(位相の対称性)の破れにともなう南部ゴールドストーンモードの生成と、これが荷電粒子系では電荷揺らぎ(縦波ゆらぎ)と結合することによってプラズマ振動数に吸収される(「質量」を獲得する)ことが明らかにされた。これは非相対論系における「ヒッグスメカニズム」に他ならない。一方、超伝導振幅の揺らぎに対応する励起モード(振幅モード)は、長波長極限で2(は超伝導ギャップエネルギー)にとどまることも示されている。振幅モードは、素粒子物理学におけるヒッグス粒子(モード)に他ならない。

ヒッグス粒子は、素粒子物理学の標準模型における最後の未発見のピースであったが、ついに2012年CERNにおいて存在が確認された。この発見は超伝導における振幅モード(ヒッグスモード)の研究に拍車をかけるものとなった。

これまで超伝導状態におけるヒッグスモードの直接観測は、電荷密度波状態との共存相におけるラマン散乱においてのみ報告されていた。しかしながら、近年、強レーザー光を用いた非平衡状態における観測(ポンプ・プローブ分光)によって、ヒッグスモードに対応すると考えられる励起の観測が報告された。

このような状況下で、超伝導状態における振幅モード(ヒッグスモード)をより直接に、なるべく通常のプロブを用いて観測する可能性についてさまざまな研究が進んでいた。

また、準1次元超流動に関して、ねじれ振りをを用いた研究が我が国を中心としてすすみ、低次元であるにも関わらず、有限温度において有限の超流動密度が観測されていた。これは単純な有限サイズ効果では説明不可能であり、測定が動的な測定であることを考慮した説明が必要とされていた。古典系を用いた計算はすでに筆者らによって行われていたが、量子性を取り入れた計算が望まれていた。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、幅広い振動数領域(無衝突領域、流体力学的領域など)において、振幅モード(ヒッグスモード)を含む超伝導秩序変数のダイナミクス(集団励起モード)を明らかにし、その観測可能性を明確にすることである。

特に、対間有効相互作用の振動数依存性が重要となる強結合超伝導体や奇振動数超伝導体における秩序変数のダイナミクスを明らかにし、これらの場合における振幅モードの観測可能性を明らかにすることである。

さらに、超伝導状態でスピン励起スペクトルに生じる共鳴ピークに対する振幅モードの寄与や他の長距離秩序状態と共存する超伝導状態で振幅モードを含む超伝導集団励起が観測量に寄与する可能性を探索する。

液体ヘリウムの超流動状態においては、超伝導密度はしばしばねじれ振りをを用いて測定される。これはねじれ振りの共鳴振動を用いた動的な測定であるため、これによって観測される「超流動密度」を議論する際には動的側面を考慮する必要がある。すなわち、測定の振動数によって、位相スリップの効果が測定結果に影響するか否かが決まるので、位相スリップの効果を制御しながら超流動密度の計算ができることが望まれる。これまでに行ってきた計算は古典系を用いたものであるため、量子系に対しても同様の計算を行う必要がある。そこで、格子上で定義されたボース粒子系を用いて、量子性を考慮しつつ、位相スリップの効果を制御しながら超流動密度の計算を行い、位相スリップ(抑制)の効果が準1次元系の超流動密度にどのような影響を与えるかを調べる。

## 3. 研究の方法

振幅モードと外場との結合に関しては時間反転に関する対称性が重要な因子となる。そこで、まず、時間反転に対して奇対称性をもつ超伝導状態の安定性、通常の偶対称性をもつ状態との共存の可能性を検討し、これらの系における集団励起モードを調べる。

次に、電子間有効相互作用の振動数依存性が顕著となる強結合超伝導体における集団励起モードを検討する。振動数依存性が無視できる弱結合極限では結合が無視できるような場合でも、有効相互作用の振動数依存を通して異なる自由度間あるいは外場との結合が生じる場合が考えられる。

さらに、緩和時間が短くなる流体力学的な領域における振幅モードの緩和を調べ、いわゆるLandau-Khalatnikovメカニズムの微視的な導出を試みる。

準1次元超流動に関しては、格子上ハードコアボソン系において、位相スリップ効果を制御しながら、超流動密度を計算し、位相スリップが抑制されれば(言い換えれば、動的なプローブによって位相スリップの効果が観測されないのであれば)有限温度において有限の超流動密度が観測されることを示す。

## 4. 研究成果

### 1) 時間反転に関して奇対称な超伝導状態に関する研究

時間反転に関して奇対称な超伝導状態が形式的に存在する可能性が指摘されて久しいが、実際に現実的な条件の下でこのような解がバルクな系で安定に存在することができるのか否かについては必ずしもよく理解されていない。経路積分を用いた方法によって、奇対称超伝導状態が安定に存在できる可能性が指摘された。これらの論文では、それまでに安定な解が見出されていなかった理由は誤った分子場の取り方にあるとされている。そこで、特に分子場を仮定することなく(異常グリーン関数が有限であることのみ仮定する)、一般的に奇対称性超伝導状態における秩序変数の形を調べた。その結果、上記の論文の結果とは異なり、現実的なモデルの範囲では、安定な奇対称性超伝導状態の解は得られなかった。経路積分を用いた方法のどこの部分が異なる結論の理由の原因となっているのかを未だ突き止められていない。

また、通常的时间反転に関して偶対称性をもつ超伝導秩序変数と、奇対称性をもつ秩序変数が共存する可能性についても、これまでに議論されてきている。そこで議論されていたのは、外部磁場を印加することによって、外部から秩序変数の共存がもたらされる場合であった。本研究では、自発的な共存の可能性を探り、これまでに調べられているものとは異なる形で偶対称性と奇対称性の超伝導秩序変数が共存する可能性を見出した。仮に自発的に双方の秩序変数が共存する場合には、こちらのほうが実現の可能性が高いと思われる。しかしながら、現実的なモデルを用いた計算では、残念ながらこの共存解が安定に存在する領域は見出されなかった。

時間反転に関して奇対称の超伝導状態に関しては、これまでのいくつかの結果に反して、(自発的に実現する)安定なバルク解は見出されていない。奇対称解が現れるためには、はじめから境界や外部磁場の存在など、(時間反転)対称性の破れた状態などが必要と思われる。ただし、現時点では、安定解の存在を主張する研究のどこの部分が異なる結果の原因となっているのか解明されていない。

### (2) さまざまな弱結合超伝導状態における振幅モード観測の可能性

弱結合超伝導体では、ほぼ振幅モードは外部プローブとは結合しない。プローブの波長が短くなれば結合の可能性は生じるが、振幅モード自体が連続状態の中に入り込み、明確なピーク構造は得られない。

この研究では、通常考えられていないことが多い可能性(たとえば、磁場、大きな粒子-ホール対称性の破れなど)が振幅モードの観測可能性に与える影響を調べた。ここに挙げた、磁場、大きな粒子-ホール対称性の破れに関しては肯定的な結果は得られなかった。さらに、スピン3重項超伝導状態、特に、非ユニタリー状態における振幅モードについても検討した。非ユニタリー状態の可能性はきわめて多く、すべてを網羅的に尽くすことは困難であるが、これまでに調べたいいくつかの場合についてはやはり通常のプローブによる観測は困難という結論である。しかし、一般的に言って非ユニタリー状態では、超伝導振幅の変調は、磁化の変調と関連するので、依然として観測の可能性はあるのではないかと考えている。

### (3) 強結合超伝導状態における集団励起

振幅モードが外部プローブと結合しない理由として対称性を挙げることができる。たとえば、時間反転に対する対称性である。通常、弱結合超伝導体では有効相互作用、そして秩序変数の振動依存性はあらわには考えない。しかし、強結合超伝導体では振動数依存性は実験検証可能な程度には影響をもたらす。実際に、秩序変数の振動数依存性を考慮しながら、強結合超伝導体における集団励起モードの効果を研究した。

その結果、弱結合近似の下では結合のなかったチャンネルを通して、振幅モードと電荷ゆらぎなどの間に結合が(形式的には)生じることが確かめられた。しかし、実際にスペクトルを計算すると種々の寄与がキャンセルし、振幅モードの寄与は現れないことが確かめられた。

以上のように、(2)(3)の研究によって、振幅モードと外部プローブの結合のさまざまな可能性を検討したが、現時点では肯定的な結果は得られていない。問題を一般的な視点から見直すと以下のようなことが結論される: 振幅モードが明瞭に観測される可能性があるのは長波長極限である。一方、一般的な保存則( $f$ 和則)から、長波長極限では、保存される物理量のゆらぎスペクトルは有限振動数ではゼロにとどまることが示される。振幅モードが現れるとすれば、振動数2においてであるから、保存則からの一般的な結論は、保存する物理量のスペクトルに対しては(臨界温度直下を除けば)振幅モードの効果は表れないことになる。

つまり、振幅モードが直接観測されることが期待される物理量としては、非保存量に着目する必要がある。例として挙げられるのは、軌道自由度にかかわる物理量である。これまで多バンド系における超伝導はさまざまな系で研究されているが、これらの系で、軌道選択的な物理量に対する超伝導集団励起の効果を調べることによって振幅モードの関して新たな知見が得られる可能性がある。たとえば、 $MgB_2$ において、バンド間位相モードであるレゲットモード(相対的な位相モード)が観測されたという報告はすでにあるが、より注意深い、バンドあるいは軌道自由ごとの検討を行う価値があると思われる。

#### (4) 流体力学的な場合

超流動に関しては、臨界温度付近で超音波吸収にピークが現れることが知られており、ランダウ-ハルトニコフメカニズムとして(秩序変数のダンピング)説明されている。かつて、重い電子系超伝導体においても、臨界温度直下で超音波吸収のピークが見出され、同様な説明ができるのではないかとされた。そこで、流体力学的な領域への緩和領域での集団励起モード、特に振幅モードの緩和を調べた。しかしながら、保存量ではない秩序変数に関しては衝突項によって明瞭な流体力学的なモードは存在せず、微視的なモデルから出発して、超伝導振幅の緩和を記述する理論の構築には未だ成功していない。当初の計画通り、なんらかの緩和のメカニズムをさらに考慮する必要があると思われる。

#### (5) 準1次元超流動に関する研究

準1次元的な格子上のハードコアボソン系の超流動密度を量子モンテカルロ法によって計算した。その際に、位相スリップの効果を制御するために、格子のなかの1列における飛び移り積分を十分大きな値に設定する。スピン系に焼き直すと、この1列上のスピン間の交換相互作用を十分大きく設定することと等価であり、これによってこの1列上のスピンを1つのスピンの置き換えたことに相当する。これによって位相スリップを抑制することが可能である。

計算の結果、フィルム状の場合でも、バー上の場合でも、1次元性が強い極限においても、有限温度で有限の超流動密度が得られることが確認された。これらの結果はこれまでに古典系に対して得られた結果と同じである。また、フィルム状の場合は、スケーリング解析により、転移はKT転移であり、また、転移温度も2次元系のKT転移温度と同一と考えてよいことが確かめられた。バーの場合にも転移点はほぼ3次元の点と一致するという結果が得られているが、サイズ効果等により明確な結論には至っていない。

この成果は、国際ワークショップ QHS2018 で発表されるとともに、論文として投稿予定である。

### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 1 件)

Akiko Masak-Kato, Seiji Yunoki, and Dai Hirashima: The superfluid transition in quasi-one-dimensional hardcore Bosons: Effect of phase slippage, International Symposium on Quantum Fluids and Solids, Tokyo, July 25-31, 2018.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ：<https://researchers.icu.ac.jp/icuhp/KgApp?kyoinId=ymigygosggo>

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。