

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 24 日現在

機関番号：31303

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26800216

研究課題名(和文) 蜂の巣格子中の強相関超伝導におけるHiggsモードの量子シミュレーション

研究課題名(英文) Quantum simulations of Higgs mode in strongly correlated atomic gases on the honeycomb lattice

研究代表者

土屋 俊二 (Tsuchiya, Shunji)

東北工業大学・公立大学の部局等・准教授

研究者番号：80579772

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：素粒子物理学におけるHiggs粒子は質量の起源と密接に関連しており、最近の加速器による実験で観測され注目を集めた。他方、磁性体、超伝導体といった身の回りの物質中にもHiggs粒子に相当する粒子が存在する。しかしそれらの粒子の性質については未解明の点が多い。本研究では、極低温にまで冷却され超流動状態となった原子気体中のHiggs粒子の性質について理論的に調べた。その結果、これまで知られていない空間的に局在した新しいHiggs粒子が存在することを発見した。また、グラフェンと同様の蜂の巣格子状の原子配置を持つ気体においては、空間的に非一様な新しい超伝導状態が現れる可能性があることを指摘した。

研究成果の概要(英文)：The Higgs particle plays a central role in the mechanism of mass generation in particle physics. It attracted attention by the recent discovery in the experiments at CERN's Large Hadron Collider. On the other hand, there are particles in solid-state materials such as magnets and superconductors that are analogous to the Higgs particle. These particles are called "Higgs mode". However, Higgs modes have not been much investigated because of the experimental difficulties. We theoretically study a Higgs mode in an atomic gas that is cooled down to ultra-low temperatures. We find a new type of low-energy Higgs mode that is spatially localized in the vicinity of impurities. We also study properties of atomic gases in a crystal that is artificially made of laser beams. We predict the emergence of a novel inhomogeneous superconducting state when the crystal has the honeycomb-lattice structure that is the same crystal structure as graphene.

研究分野：凝縮系物理

キーワード：Higgsモード 光格子 バレー内ペアリング Kekuleパターン Higgs束縛状態

1. 研究開始当初の背景

(1) Higgs モードは、Nambu-Goldstone(NG)モードと共に、自発的対称性の破れ(SSB)に伴い現れる普遍的な粒子であり、物性から素粒子に至る様々な系において存在する。近年の実験の進歩により Higgs モードは s 波超伝導体、磁性体、冷却原子気体等において相次いで観測されており、物性系における Higgs モードの研究が盛んになりつつある。特に冷却原子気体はその高い操作性のために Higgs モードの研究に適していると考えられる。

(2) Higgs モードは秩序パラメタの振幅の揺らぎを伴うため、強相関係の量子臨界点近傍において低エネルギー励起となり、相転移に影響を与えるなど重要な役割を果たす可能性がある。しかし、これまで強相関係超伝導体における Higgs モードの性質については理解が進んでいない。特に秩序パラメタが異方的な対称性を持つ unconventional な超伝導体における Higgs モードの性質は未解明な部分が多い。近年、冷却原子気体において光格子を用いることにより強相関係に関する実験が盛んになされている。そのため冷却原子気体は、強相関係超伝導体における Higgs モードの研究を行う上で有用なプラットフォームを提供すると期待される。

(3) 蜂の巣光格子中のフェルミ原子気体はディラックフェルミオン系として最近特に注目を集めている。これまでの研究において筆者は、蜂の巣光格子中の引力フェルミ原子気体が引力相互作用を大きくすると半金属相から超伝導(超流動)相へと量子相転移を示し、更に量子臨界点近傍で Higgs モードが準粒子に崩壊せず安定に存在することを理論的に示した。また、半金属相における非凝縮クーペ対であるクーペロン励起が、凝縮と共に連続的に Higgs モード、NG モードへと変化することを発見した。

2. 研究の目的

(1) フェルミ原子間に強い斥力が働く場合には、スピン揺らぎを媒介とする原子間の実効的な引力により異方的な対称性を持つ超伝導状態が安定化すると考えられる。本研究では、まず蜂の巣光格子中の斥力フェルミ原子気体を考え、スピン揺らぎの効果を取り入れ、安定な超伝導相を決定する。

(2) (1)において決定した超伝導相とノーマル相の間の量子臨界点近傍では Higgs モードが s 波の等方的な超伝導状態には見られない多様な性質を示すと期待できる。本研究の目的は、これまでの引力系における理論を拡張し、蜂の巣光格子の斥力フェルミ原子気体において予想される unconventional な超伝導相における Higgs モードの性質を明らかにする。さらに冷却原子気体の高い操作性を生かし、これらの多様な Higgs モードを実験的に検出する方法について提案する。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、蜂の巣光格子中のフェルミ原子気を良く記述すると考えられる斥力ハバ

ードモデルを用いて Higgs モードについて解析を行う。乱雑位相近似(RPA)によりフェルミオン間の実効的な引力を取り入れ安定な超伝導状態を特定し、量子臨界点近傍の Higgs モードの特性について明らかにする。また、Higgs モードの実験による観測可能性について検討するため、光格子ポテンシャルを周期的に振動させることによるエネルギー吸収率を計算し、Higgs モードの影響を明らかにする。

(2) より定量性の高い結果を得るため、変分モンテカルロ法により(1)と同様の計算を行い、Higgs モードの励起エネルギーや寿命に関する定量性を向上させる。

4. 研究成果

(1) 原子間に強い斥力が働くと、スピン揺らぎを媒介としてフェルミ原子間に実効的な引力が働く。他方、同一サイトには斥力相互作用が強く働くため、実効的な引力は次近接サイト間に最も強く働くと予想される。そこで、実効的な引力を次近接サイト間の引力相互作用として取り入れた引力ハバードモデルを用いて安定な超伝導相に関する解析を行った。特に超伝導状態のトポロジカルな側面について検討するため、トポロジカル絶縁体のミニマルモデルであり冷却原子気体において実現可能性の高い Kane-Mele(KM)モデルの超伝導状態について調べた。

(2) トポロジカル絶縁体状態において次近接サイト間の引力を T 行列近似により取り入れ超伝導感受率を計算した結果、クーペロン励起がバンドギャップの内部に形成されることがわかった。また、クーペロン励起は運動量がブリルアンゾーンのコーナーに位置する K, K' 点近傍において低いエネルギーを持ち、更に引力を大きくしていくとクーペロン励起が K, K' 点で同時に凝縮することがわかった。このことは、超伝導状態として K, K' 点における各バレーでフェルミオンがクーペ対を組むバレー内ペアリング状態(図 1)が安定化する可能性を示唆している。クーペ対の重心運動量がゼロの BCS 状態とは異なり、バレー内でペアができるとクーペ対の重心運動量は有限となる(図 1)。そのため、この超伝導状態はギャップ関数が空間変調するペア密度波(PDW)状態であると予想される。

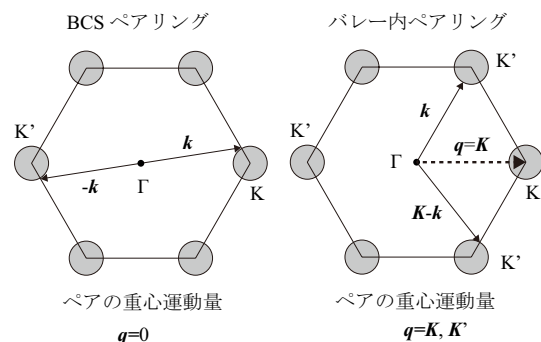


図 1. BCS ペアリングとバレー内ペアリング

(3) 平均場近似により超伝導状態を調べたところ、バレー内ペアリング状態の方が BCS 状態よりもエネルギーが低く、スピン・トリプレットのバレー内ペアリング状態がスピン軌道相互作用により安定化され基底状態となることがわかった。この状態は蜂の巣格子の対称性 C_{6v} の分類によると A_1 の既約表現を持つ。この状態は K, K' 点に凝縮したクーパー対が軌道角運動量 $L_z = +1, -1$ を持っているため、超流動 ^3He の B 相に類似したヘリカルなバレートリプレット状態であり、トポロジカルな超伝導状態と考えられる。更に、この超伝導状態は実空間においてクーパー対の対振幅が空間変調する PDW 状態となっており、対振幅は隣り合うボンドにおいて符号が変化し Kekule パターン(図 2)と呼ばれる実空間分布を持つことがわかった。この新奇超伝導状態は、(2)における解析から K, K' 点におけるディラック点の周りのベリー位相の効果によって出現することを明らかにした。更に、この超伝導状態が冷却原子系以外にも最近実験で超伝導が確認されたグラフェンや遷移金属ダイカルコゲナイドにおいても観測される可能性があることを指摘した。

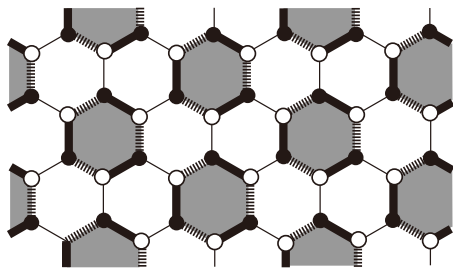


図 2. Kekule パターン:太(点)線は対振幅が正(負)、細線はゼロを表す。

(4) (3)の新奇な超伝導状態が単純な次近接の引力ハバードモデルから出現することは全く予期されておらず、このような超伝導状態の可能性をミクロスコピックな計算により予言したことは本研究の大きな成果である。(1)~(3)の結果は論文にまとめ、現在 *Physical Review B* 誌に投稿中であり、またプレプリント arXiv:1606.00986 として公開している。(5) (3)の PDW 状態にも電荷密度波(CDW)状態の振幅モードと類似した Higgs モードが存在すると考えられるが、本研究期間中にその解析には至らなかった。Higgs モードの解析と、斥力ハバードモデルを用いたより定量性の高い解析は今後の課題として継続して研究を進める。(6) 凝縮系物理においては不純物等の不均一性の効果は物性に本質的な役割を果たす。論文②において不均一な系における Higgs モードの性質を調べるため、光格子中のボース超流動体の Higgs モードに対する不純物の効果について解析を行った。(7) 光格子中のボース粒子系を記述するボースハバードモデルから出発し、系を実効的に

記述する時間依存 Ginzburg-Landau(TDGL)方程式に対する不純物効果の寄与を導いた。この TDGL 方程式により不純物の影響について解析を行った結果、格子の高さの変調による局所的なポテンシャルがあると、秩序パラメタの振幅揺らぎがポテンシャル近傍に局在した新しい励起状態が存在し、その励起がバルクの Higgs モードのギャップよりも低いエネルギーを持つことを発見した(図 3)。この励起状態は論文②において初めて発見され、Higgs 束縛状態と呼ばれる。また、化学ポテンシャルの変調による局所的なポテンシャルがある場合には NG モードと Higgs 束縛状態は局所的に結合し、NG モードがポテンシャルを透過する際に直接散乱と共鳴散乱の干渉による Fano 共鳴が起きることを示した。

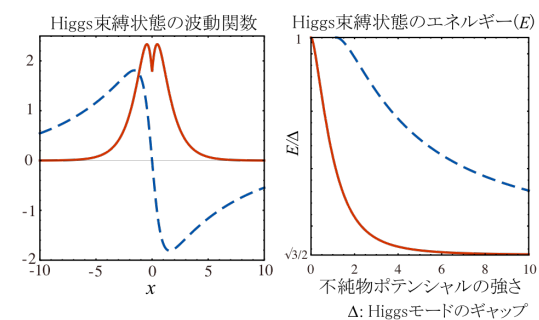


図 3.Higgs 束縛状態の波動関数とエネルギー

(8) Higgs 束縛状態は冷却原子のみならず超伝導体や磁性体など SSB が起きる様々な系においても存在すると予想され、低エネルギー励起として物性に大きく関わっている可能性がある。そのため Higgs 束縛状態の研究は今後大きく発展する可能性がある。Higgs 束縛状態の存在を初めて指摘したことは本研究の大きな成果である。今後は超伝導などの他の物性系における Higgs 束縛状態について研究を進める。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

① R. Yoshii, S. Takada, S. Tsuchiya, G. Marmorini, H. Hayakawa, and M. Nitta, “Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov states in a superconducting ring with magnetic fields: Phase diagram and the first-order phase transitions”, *Phys. Rev. B* 92, 224512 (2015). (査読有)

DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.92.224512

② T. Nakayama, I. Danshita, T. Nikuni, and S. Tsuchiya, “Fano resonance through Higgs bound states in tunneling of Nambu-Goldstone modes”, *Phys. Rev. A* 92, 043610 (2015). (査読有)

DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.92.043610

③ G. Marmorini, R. Yoshii, S. Tsuchiya, and M. Nitta, “Analytic Self-Consistent Condensates in Quasi-1D Superfluid Fermi Gases in the Andreev Approximation”, Proceedings of the 2013 International Conference on Quantum Fluids and Solids, J. Low Temp. Phys. 175, pp.420-426 (2014). (査読有)

DOI: 10.1007/s10909-013-0982-7

④ M. Shinozaki, S. Tsuchiya, S. Abe, T. Ozaki, and T. Nikuni, “Elementary excitations of antiferromagnetic spin-1 bosons in an optical lattice”, Proceedings of the 2013 International Conference on Quantum Fluids and Solids, J. Low Temp. Phys. 175, pp.236-242 (2014). (査読有)

DOI:10.1007/s10909-013-0960-0

[学会発表] (計 7 件)

① 土屋俊二, 御領潤, 荒畑恵美子, Manfred Sigrist, 「ディラック電子系におけるバレー内ペアリングによる p 波超伝導状態」日本物理学会 2015 年度年次大会, 東北学院大学, 2016 年 3 月 21 日.

② S. Tsuchiya, J. Goryo, E. Arahata, and M. Sigrist, “Cooperon condensation and intra-valley spin-triplet pairing in Dirac fermion systems”, International Workshop on Superconductivity and Related Functional Materials 2016, Tohoku University, Advanced Institute for Materials Research, Sendai, Japan, March 17, 2016.

③ I. Danshita, T. Nakayama, T. Nikuni, and S. Tsuchiya, “Fano resonance between Nambu-Goldstone modes and Higgs bound states in a superfluid”, Ugo Fano Symposium, Rome International Center for Materials Science, Rome, Italy, December 17, 2015. (招待講演)

④ 土屋俊二, 中山健, 二国徹朗, 段下一平, “Fano resonance through Higgs bound states in tunneling of Nambu-Goldstone modes”, 京都大学基礎物理学研究所研究会「熱場の量子論とその応用」, 京都大学基礎物理学研究所, 2015 年 9 月 1 日.

⑤ S. Tsuchiya, T. Nakayama, T. Nikuni, and I. Danshita, “Fano resonance through Higgs bound states in tunneling of Nambu-Goldstone modes”, International Workshop on “Cold Atoms meet High Energy Physics”, ECT* Trento, Italy, June 22, 2015.

⑥ S. Tsuchiya, J. Goryo, E. Arahata, and M. Sigrist, “Cooperon condensation and unconventional superconducting states in topological insulators”, International conference on topological quantum phenomena, Kyoto, Japan, 17, December

2014.

⑦ S. Tsuchiya, R. Ganesh, and T. Nikuni, “Higgs mode in a superfluid of Dirac fermions”, International Workshop “Higgs modes in Condensed Matter and Quantum Gases”, 京都大学基礎物理学研究所, 2014 年 6 月 24 日. (招待講演)

[図書] (計 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 件)

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

○取得状況 (計 件)

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

[その他]

アウトリーチ活動

2014 年 10 月 11 日 学都仙台コンソーシアムサテライトキャンパス部会 市民公開講座において講演 タイトル:

「質量の起源を巡るアイデアの変遷 ~超伝導からヒッグス粒子まで~」

6. 研究組織

(1) 研究代表者

土屋 俊二 (TSUCHIYA, Shunji)

東北工業大学・共通教育センター・准教授
研究者番号 : 8 0 5 7 9 7 7 2

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :