

自己評価報告書

平成23年 5月11日現在

機関番号：15301

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2008~2011

課題番号：20740233

研究課題名 (和文) 中性原子気体を舞台とした異方的超流動の定量的研究の展開とマヨラナ粒子の探索

研究課題名 (英文) Quantitative study on anisotropic superfluidity and Majorana fermions in ultracold atom gases

研究代表者

水島 健 (MIZUSHIMA TAKESHI)

岡山大学・大学院自然科学研究科・助教

研究者番号：50379707

研究分野：物性理論

科研費の分科・細目：原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：冷却原子, 異方的超流動, マヨラナ粒子, トポロジカル相転移, 量子渦, ボース凝縮

1. 研究計画の概要

本研究課題の目的は、中性原子気体系における異方的超流動体実現へ向けた理論提案と、マヨラナ準粒子励起の解明を目指すものである。本課題では、マヨラナ型準粒子励起の存在条件とその特異な状態の微視的理解について、定量的な理論を基にして明らかにする。さらに、異方的超流動体特有の現象を通して、冷却原子気体系における異方的超流動性の検出手法法等を提案する。

2. 研究の進捗状況

本研究課題の目的は、中性原子気体系においてマヨラナ準粒子励起が存在条件と異方的超流動体の実現へ向けた理論提案を行なうことであった。この当初目的に対して、微視的理論である Bogoliubov-de Gennes (BdG) 理論を用いた研究を一貫して行なうことで、原子気体系における新奇な超流動性の探索を行なった。この微視的理論の核をなす BdG 方程式は巨大なサイズの固有値問題に帰着されるが、これを効率よく解くために従来のプログラムに対して MPI を用いて並列化を施した。また、低エネルギー固有状態に対する解析計算を援用することで、一連の数値計算の理解を深めた。これらにより、中性原子気体系におけるマヨラナ準粒子励起の性質が明確に理解された。例えば、p 波 フェッシュバハ共鳴近傍では BCS から BEC 状態へのトポロジカル相転移が期待されているが、この相転移点近傍でマヨラナ準粒子励起の性質が定性的に変化することを見いだした。さらには、この特異な準粒子状態が自発的なエッジ流を形成することを指

摘し、その観測方法を提案した。また、中性原子気体に対して得られた知見と理論枠組みを超流動ヘリウム等の異方的超流動体へ適用し、異なる物理系に共有する量子現象と物質固有の現象をそれぞれ見いだした。これらの研究成果は合計で 19 編の論文にまとめられ、Physical Review Letters 誌をはじめとする様々な雑誌において掲載された。また、一連の成果に対する解説記事を日本物理学会誌に掲載し、国内外の学会において招待講演やシンポジウム講演等を行なった。

3. 現在までの達成度

① 当初の計画以上に進展している。

この様に判断した基準は以下の通りである：まず、本研究課題に基づいて得られた研究成果が 2 編の Physical Review Letters 誌を含む計 19 編の論文として掲載された。この要因の一つは、当初の目的である異方的超流動性の研究を中性原子気体に対して行なうだけでなく、超流動ヘリウム等の系に対しても展開できたためである。マヨラナ準粒子の性質が原子気体系固有の現象だけでなく、凝縮系広くに渡って共有されるものであることがわかってきた。さらに、国際会議での招待講演や日本物理学会でのシンポジウム講演等、国内外での学会において招待講演の依頼を多く受けた。加えて、日本物理学会誌において一連の研究成果の解説記事を紹介する機会を与えられた。この様な国内外での学会での評価は、本研究課題の研究成果に対する客観的な評価となっていると判断した。

4. 今後の研究の推進方策

これまでの研究成果により、マヨラナ準粒子励起の存在条件とその性質が明確に理解された。これらの知見を踏まえた上で、今後はこの特異な準粒子状態の実験的な検出を目指した研究を行っていく。特に、マヨラナ励起の存在は準粒子状態がギャップレスな分散を持つことを示唆しており、このため原子気体系では自発的に質量流が生じていることが予測される。この質量流が系の集団励起等にどのように影響するかを調べることで、ギャップレス励起やマヨラナ準粒子の検出方法について議論していく。

5. 代表的な研究成果

(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 19 件)

- ① 水島健, 町田一成, Splitting and oscillation of Majorana zero modes in the p-wave BCS-BEC evolution with plural vortices, Physical Review A **82**, 023624 1-13, 2010
- ② 水島健, 町田一成, Vortex structures and zero energy states in the BCS-to-BEC evolution of p-wave resonant Fermi gases, Physical Review A **81**, 053605 1-14, 2010
- ③ 水島健, 市岡優典, 町田一成, p波超流動体の量子渦に潜むマヨラナ型準粒子, 日本物理学会誌, **64**, 836-840, 2009
- ④ 水島健, 市岡優典, 町田一成, Role of the Majorana Fermion and the Edge Mode in Chiral Superfluidity near a p-Wave Feshbach Resonance, Physical Review Letters **101**, 150409 1-4, 2008
- ⑤ 堤康雅, 川上拓人, 水島健, 市岡優典, 町田一成, Majorana Bound State in Rotating Superfluid $^3\text{He-A}$ of Parallel Plates, Physical Review Letters **101**, 135302 1-4, 2008

[学会発表] (計 25 件)

- ① 水島健, BCS-BEC Evolution and Majorana Zero Modes in p-wave Resonant Fermi Gases, Conference on Research Frontiers in Ultra-Cold Atomic and Molecular Gases,

2011年01月10-14日, インド

- ② 水島健, BCS-BEC Evolution and Majorana Zero Modes in p-Wave Resonant Fermi Gases, 22nd International Conference on Atomic Physics (ICAP2010), 2010年07月25-30日, オーストラリア
- ③ 水島健, Majorana zero modes in the BCS-BEC evolution of p-wave resonant Fermi gases, The International Workshop on Ultracold Fermi Gas: Superfluidity and Strong-Correlation (USS-2010), 2010年5月13-15日, 東京
- ④ 水島健, ^3He マヨラナモードとフェルミ気体, 日本物理学会2009年秋季大会; 2009年09月25-28日, 熊本
- ⑤ 水島健, What are Majorana fermions?, Novel Spin Pairing 2009 (NSP2009), 2009年9月13-16日, 京都

[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：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]