

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25800194

研究課題名(和文) スピン-軌道相互作用が拓く非一様系で現れる新奇超伝導・超流動現象

研究課題名(英文) Study of spin-orbit coupling effects on superconducting and superfluid properties in spatially inhomogeneous environments

研究代表者

青山 和司 (Aoyama, Kazushi)

大阪大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：00623133

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：固体・液体の基本構成要素である電子や原子には、スピンと軌道の2つの自由度がある。本課題では、超伝導体や超流動体のシステム表面やドメイン境界において、スピン自由度と軌道自由度のカップリングによって現れる磁気電気効果や新奇量子相について研究を行った。反転対称性の破れた超伝導体では、磁気電気効果により双晶界面で臨界磁場がバルクとは異なる値を示すことを明らかにした。また、細い円筒容器中の超流動ヘリウム3においては、容器表面での準粒子散乱と秩序変数の内部自由度(スピンと軌道の自由度)によって、円筒軸方向に自発的に並進対称性が破れたストライプ相が転移温度近傍の高温側から現れることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Electrons and atoms are the elementary particles in solids and liquids. They have spin and orbital degrees of freedom which are respectively relevant to magnetic properties and particle distributions and flows such as the electronic current. In this research project, we discussed effects of the coupling between spin and orbital degrees of freedom on superconducting and superfluid properties at system surfaces and domain boundaries. It was found that in non-centrosymmetric superconductors possessing crystal domains with opposite signs of the spin-orbit coupling, the upper critical field is enhanced at the domain boundary. We also showed that in superfluid ^3He confined in small size containers, a stripe structure is induced due to the surface scattering effects and the internal degrees of freedom of the order parameter which are characteristic of the spin-orbit coupled superfluid ^3He .

研究分野：物性理論

キーワード：スピン-軌道カップリング 超伝導 超流動ヘリウム3

1. 研究開始当初の背景

スピン-軌道相互作用は一般にポテンシャル勾配が存在すれば現れる相互作用である。通常、巨視的なレベルでは、電荷のスクリーニングによって、その効果が顕著に現れることはないが、異なる物質の接合面、系の表面や端など、空間反転対称性が破れている場合には、スピン-軌道カップリング(SOC)の効果が強く物性に反映される可能性がある。実際、古くから半導体界面に誘起される二次元電子系においてSOCに関わる物性が研究されてきたが、今世紀に入り、重い電子系超伝導体CePt₃Siの発見を契機として、反転対称性の破れた超伝導体でSOCに起因した超伝導物性が注目されるようになった。近年では、トポロジカル絶縁体・超伝導の文脈からもSOCが盛んに議論されるようになり、量子凝縮相においてSOCが果たす役割を理解することは重要なテーマであった。

2. 研究の目的

これまでの多くの理論研究がSOCに起因したバルクの超伝導物性に関するものであったのに対し、空間的に不均一な超伝導状態に着目し、一様系では見られない非一様系に固有のSOC効果を見出すことが本研究の目的である。一軸性のポテンシャル勾配によって生じるRashbaタイプのスピン-軌道相互作用(RSOC)がもたらす磁気電気効果に着目して、双晶系に見られるような空間的非一様性を通じてRSOCがどのような新現象を生み出すのかを議論する。また、電荷を伴わない中性原子の超流動状態であっても、閉じ込め容器中では壁面付近で軌道自由度が制限されるためSOC由来の物理が現れる可能性がある。閉じ込め容器中というバルクとは異なる環境下で、系の非一様性を通じてSOCが超流動状態の性質にどのような影響を与えるのかを明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、スピン-軌道カップリング(SOC)が系の非一様性を通じて超伝導・超流動状態にどのような影響を及ぼすのかを明らかにする。そのため、BCS理論に基づいて、SOCを考慮したGinzburg-Landau(GL)自由エネルギーを導出し、超伝導・超流動の安定性を調べる。また、上記の不均一な環境下での準粒子励起も興味の対象である。当問題に関してはGL理論では不十分であり、準古典理論に基づいてEilenberger方程式を数値的に解くことで、非一様系の超伝導・超流動状態においてSOCが準粒子状態にどのような影響を与えるのかを明らかにする。

4. 研究成果

本研究課題の成果は以下の2テーマに大別される。(1)空間反転対称性の破れた超伝導体、(2)制限空間中の超流動ヘリウム3。

(1)空間反転対称性の破れた超伝導体

本テーマの目的は、互いに逆符号のスピン・軌道相互作用を有する2種類の超伝導体が接する系において、接合面に平行に印加された外部磁場が超伝導状態に及ぼす影響を明らかにすることであった。上記の特徴を有するシステムとして、c軸方向の空間反転対称性が破れたRashbaタイプ超伝導体の双晶系、特にc軸方向に積層した双晶に着目して、双晶界面における外部磁場に対する超伝導の安定性を解析した。

GL理論に基づいて、上部・下部臨界磁場の評価を行った結果、積層順序の異なる2種類の双晶境界で、臨界磁場が一方ではバルクの値よりも増大し、もう一方では抑制されることが分かった。この積層順序による臨界磁場の違いは、スピン偏極がスピン・軌道相互作用を通じて超伝導電流を誘起する磁気電気効果によって、一方の双晶境界では外部磁場を打ち消すように、もう一方では増強するように内部磁場が発生することに起因する。本結果は、単結晶試料中に格子欠陥として結晶ドメインを有するようなRashbaタイプ超伝導体では、双晶界面という微小な超伝導領域を敏感に感知するプローブから得られる臨界磁場が、バルク測定から見積もられる上部(下部)臨界磁場よりも高(低)磁場側にあることを示唆している。本内容に関する論文は、Phys. Rev. B誌に掲載された。

(2)制限空間中の超流動ヘリウム3

超流動ヘリウム3は、スピン三重項p波のCooper対凝縮体であり、その秩序変数はスピンと軌道から成る内部自由度をもつ。特にヘリウム3のB相はスピンと軌道がカップルしたフルギャップの対状態であることが知られている。本テーマでは、制限空間中のヘリウム3のB相において、容器表面の準粒子散乱によって超流動状態が受ける影響と、そのときの準粒子状態を明らかにした。

細い円筒容器中の超流動ヘリウム3のB相の安定性をGL理論に基づいて調べ、容器壁面の準粒子散乱による超流動ギャップ抑制とこの系に特有のCooper対の内部自由度によって、円筒軸方向の並進対称性を自発的に破るストライプ構造が現れることを明らかにした。この系は磁場下の空間反転対称性の破れた超伝導体とのアナロジーがあり、ストライプ秩序の発現にはスピン自由度と軌道自由度の結び付きが本質的な役割を果たしていることが分かった。本結果をまとめた論文は、Phys. Rev. B誌に掲載された。

上記の円筒系のGL理論に基づいた解析は平行平板系にも適用でき、薄い平行平板中の液体ヘリウム3を対象に、表面のコンディション(specularかdiffusiveか)が、このストライプ相の安定性にどのような影響を及ぼすかを調べた。基盤上の超流動ヘリウム3に対応する上面specular下面diffusive

の条件では、ストライプ相は両面 specular の場合に比べその安定性は弱まるものの依然として存在すること、両面 diffusive の場合には、ストライプ相の安定領域がほぼ消失してしまうことが分かった。

さらにストライプ相の性質をより詳細に調べるため、平行平板中のストライプ相における準粒子状態の解析を行った。平行平板中のストライプ相では、壁に垂直方向の超流動ギャップは二次元面内で周期的にその符号を変える。すなわち、周期的なドメイン構造を造る。Eilenberger 方程式を数値的に解くことで角度分解局所状態密度を計算した結果、ストライプを横切る準粒子 trajectory に対しては、ドメイン境界付近で、一様系には見られない準粒子束縛状態が現れることが分かった。一方、ストライプに平行な trajectory に対しては、一様系と同様な準粒子励起が現れる。このストライプ構造に起因した束縛状態は有限のギャップをもち、ギャップの大きさとストライプの周期には関係があることも明らかとなった。本内容については、ストライプ相の表面コンディションに対する安定性の結果と合わせて、論文を執筆し J. Phys. Soc. Jpn. 誌に既に投稿済である。

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 3 件)

— 青山和司, “磁場下の非一様な空間反転対称性の破れた超伝導体”, 京都大学低温物質科学研究センター誌, 24 巻, 3-9 (2014) (依頼による執筆) 査読有.
<http://www.ltm.kyoto-u.ac.jp/centers/hi/>

— Kazushi Aoyama, Lucile Savary, and Manfred Sigrüst, “Signatures of the helical phase in the critical fields at twin boundaries of noncentrosymmetric superconductors”, Phys. Rev. B 誌, **89**, 174518 (2014) 査読有.
DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.89.174518>

— Kazushi Aoyama, “Stripe order in superfluid ^3He confined in narrow cylinders”, Phys. Rev. B 誌, **89**, 140502(R) (2014) 査読有.
DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.89.140502>

[学会発表](計 9 件)

— 青山和司, 「異方の超流動ヘリウム 3 に対する表面および不純物散乱の研究」日本物理学会第 70 回年次大会 (2016 年 3 月

21 日、東北学院大学泉キャンパス) 日本物理学会若手奨励賞 (領域 6) 受賞記念講演

— 青山和司, 「表面散乱が誘起する空間変調した超伝導・超流動状態」日本物理学会 2015 年秋季大会 (2015 年 9 月 18 日、関西大学千里山キャンパス) 招待講演

— Kazushi Aoyama, “Striped Superfluid Phases of ^3He in Restricted Geometries” 2015 International Symposium on Quantum Fluids and Solids (2015 年 8 月 14 日、Conference Event Center, Niagara Fall, NY, USA) 招待講演

— 青山和司, 「超流動 ^3He における FFL0 状態」日本物理学会 2014 年秋季大会 (2014 年 9 月 8 日、中部大学春日井キャンパス)

— Kazushi Aoyama, Lucile Savary, and Manfred Sigrüst, “Upper and lower critical fields at twin boundaries of non-centrosymmetric superconductors” The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (2014 年 7 月 8 日、University Campus in Saint Martin d’Heres, Grenoble, France)

— Kazushi Aoyama, Lucile Savary, and Manfred Sigrüst, “Inhomogeneous non-centrosymmetric superconductors in magnetic fields” The ISSP International Workshop “New Horizon of Strongly Correlated Physics” (2014 年 6 月 26 日、東京大学 物性研究所)

— Kazushi Aoyama, “Broken translational symmetry in superfluid ^3He confined in narrow cylinders” International Workshop “Higgs Modes in Condensed Matter and Quantum Gases” (2014 年 6 月 24 日、京都大学 基礎物理学研究所)

— 青山和司, 「円筒容器中の超流動 ^3He におけるストライプ秩序」物性研短期研究会「スーパーマターが拓く新量子現象」(2014 年 4 月 18 日、東京大学 物性研究所)

— 青山和司, Manfred Sigrüst, 「空間反転対称性の破れた超伝導体の双晶界面における臨界磁場」第 21 回渦糸物理国内会議「超伝導体における渦糸状態の物理と応用(2013)」(2013 年 12 月 12 日、東北大学 金属材料研究所)

〔その他〕
ホームページ等
<http://thmat8.ess.sci.osaka-u.ac.jp/>

6．研究組織

(1)研究代表者

青山和司 (AOYAMA, Kazushi)
大阪大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：00623133