

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 22 日現在

機関番号：22604

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2013～2014

課題番号：25887018

研究課題名(和文)トポロジカル超伝導及び超流動におけるダイナミクス

研究課題名(英文)Dynamics of topological superconductor and superfluid

## 研究代表者

吉見 恵美子(荒畑恵美子)(ARAHATA, Emiko)

首都大学東京・理工学研究科・准教授

研究者番号：30706411

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文):本研究ではトポロジカル超伝導及び超流動のダイナミクスを記述する新たな理論的枠組みの構築とその物理現象の解明である。第二種超伝導では渦糸が観測されるが、本研究では超伝導渦糸系について散乱過程やホール項などを取り入れた方程式を数値的に解くためのプログラムの開発を行った。その結果、非対称な局所状態密度と渦糸のメインピークのシフトが確認され、実験と定性的に一致すること明らかにした。一方、現象論的立場から空間反転対称性のない超伝導がツインドメインを形成し、自発磁化を起こすことを明らかにし、ツインドメインの境界でスピンのみだけでなく、超伝導流が流れることを明らかにした。

研究成果の概要(英文): We study dynamics of a two-dimensional s-wave superconductor in the presence of a moving single vortex on the basis of the quasi classical theory. We showed asymmetry in local density of state and shift of the main peak have been observed in experiment. We also study theoretically a model for twin boundaries in superconductors with Rashba spin-orbit coupling, which can be relevant to three-dimensional noncentrosymmetric tetragonal crystals. Within the framework of a Ginzburg-Landau theory, we show that a time-reversal symmetry breaking superconducting state nucleates near the twin boundary if singlet and triplet pairing amplitudes are of comparable magnitude. As a consequence, the tendency towards ferromagnetic order is locally increased along with the emergence of spontaneous supercurrents parallel to the twin boundary. Spin currents, which are present in the form of Andreev bound states, are found enhanced in the time-reversal broken phases.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：超伝導 ホール効果 スピン流

1. 研究開始当初の背景  
 スピン軌道相互作用(SOC)は異常スピンホール効果やトポロジカル絶縁体などにおいて主要な役割を果たしており、ルテニウム酸化物、時間や空間反転対称性のない超伝導体、ヘリウムのB相といった系で盛んに研究されている。このような系におけるスピンの研究は、スピントロニクス分野に広く応用・実用化されており、さらなる新しい応用デバイスの実現も期待されている。しかしながら、固体中でのSOCの大きさの制御は困難であり、SOCに依る物理現象・性質に関しては未解明な部分が多く残されてきた。そのため、強いスピン軌道相互作用によって引き起こされるトポロジカル量子現象は盛んに研究されている。また、従来の超伝導とはメカニズムの異なる新たな超伝導が多く発見され、その性質の解明が急がれている。このような超伝導体に強い磁場を掛けると、量子化された磁束が超伝導体内部を貫き渦糸が発生する。この渦糸が発生するメカニズムは、超伝導の発現メカニズムと密接に関係していることが指摘されている。しかし、結晶構造の複雑さや超伝導を担う電子間の強い相互作用に起因し、実験結果を理論的には十分に説明できていなかった。超伝導の表面及び界面での特異性から、渦糸状態における vortex のダイナミクスに注目が集まっている。一般的に超伝導量子渦糸系の定常状態は準古典的に取り扱ったEilenberger方程式でよく記述されることが知られているが、vortexのコアにおける束縛状態のスペクトルが実験と合わない[1]など、様々な問題点も指摘されていた(図1)。このような“Eilenberger方程式では記述不可能な現象”の理解のために

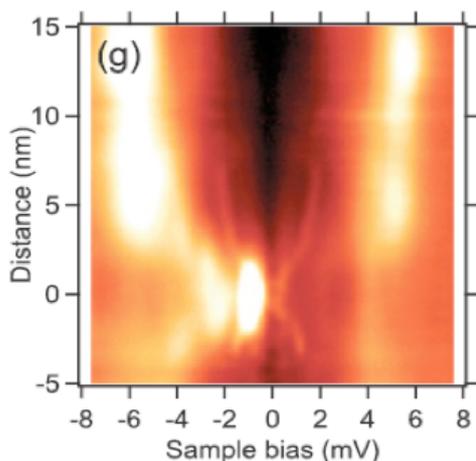


図1 非対称な局所状態密度の様子[1]

Bogoliubov-de Gennes (BdG) 方程式を用いた解析が行われているが、実験のパラメータ領域での解析は行われておらず、理論的に解明されていない実験結果は多かった。さらに、準古典近似で取り扱えないような領域においてはBdG方程式を解く必要があるが、トポロジカル量子現象といった境界の情報が必要な現象を扱うためには、位置依存のある

BdG 方程式を解く必要がある。しかし、その

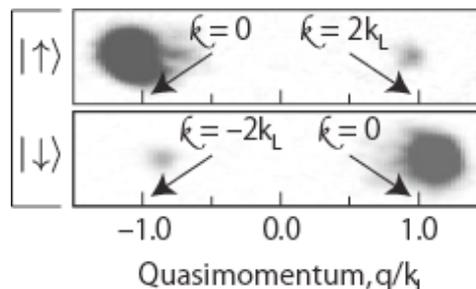


図2 原子気体のSOC実現の様子[2]

ような研究もほとんどなかった。一方、近年、ラマン散乱過程を用いることにより、極低温原子気体においてスピン軌道相互作用を持つ系の作成に成功した。(図2)さらに、近年の実験技術の発達に伴い、固体中に近い状況をレーザーを用い再現することが可能となった。一方で、極低温原子気体の特徴として、“系を記述するパラメータを高い精度で制御でき、理論と実験の比較が容易である”という利点が挙げられる。この利点を活用し、その系でのスピン軌道相互作用の大きさを適切にコントロールしスピン流の観測を試みることで、これまで明らかにされなかった新奇な物理現象・性質の発見・解明が期待されていた。

2. 研究の目的  
 研究の目的は、トポロジカル超伝導及び超流動のダイナミクスを記述する新たな理論的枠組みの構築、及び普遍的な物理現象としての詳細な解明にあった。特に、先行研究で計算の複雑さから無視されてきた本質的な効果(散乱過程やホール項など)を適切に取り入れた方程式を導出し、数値的に解くことで、実験で観測されているが未だに解明されていない現象の解明を行うことを目的としていた。

3. 研究の方法  
 先行研究で計算の複雑さから無視されてきた本質的な効果を取り入れた方程式を導出し、解析計算と近年の発達したパソコンの計算能力を生かした数値計算とを組み合わせ、前述の明らかに定量的な解析を行った。数値計算手法も独自のものを開発し、ワークステーションやスーパーコンピューターなどの大型計算機を使わずに、実験で使われているパラメータを用いた数値計算を行った。まずは解くべき方程式を導出し、定常状態での性質を調べた。トポロジカル超伝導体における vortex のダイナミクスについて研究する。特に、以下の方法で研究を進めた。

①準古典運動方程式の導出  
 最初に散乱過程やホール項などを取り入れた方程式を導出する。特に、小さい不純物が多くある環境に適した近似であるBorn近似を用いる。得られた運動方程式に準古典近似を用いることで、実際に数値計算可能な準

古典運動方程式を導出する。

②数値計算を用いた準古典運動方程式の解析

①で得られた準古典運動方程式を、数値計算を用いて解析した。最初に、定常状態について数値計算を行った。得られた結果から状態密度や電流密度を計算し、実験と比較することで、空間反転対称性の破れた超伝導体の渦糸状態との比較も行った。

③vortex のダイナミクスに関する研究

vortex が一定の速度で運動している状況を考え、この系におけるダイナミクスを明らかにする。準古典運動方程式を一次の応答まで展開して、得られた方程式を自己無撞着に解く。得られた結果から直流伝導度などの電荷応答を計算し、実験との比較を行った。

また、極低温原子気体におけるスピン軌道相互作用を持つ系を取り扱う前にその前段階として、原子対の特定方法について検証した。

#### 4. 研究成果

研究方法で書いたような手順で解析を行い。以下の3つの主要研究成果を得た。

(1) 超伝導渦糸系の直流伝導度

超伝導の表面及び界面での特異性から、渦糸状態における vortex のダイナミクスに注目が集まっている。

超伝導量子渦糸系の定常状態は準古典的に取り扱った Eilenberger 方程式よく記述される。本研究では Eilenberger 方程式に考慮されていない散乱過程やホール項などを取り入れた場合に拡張し、導出された方程式を解くプログラムを開発した。その結果、図3のような非対称な局

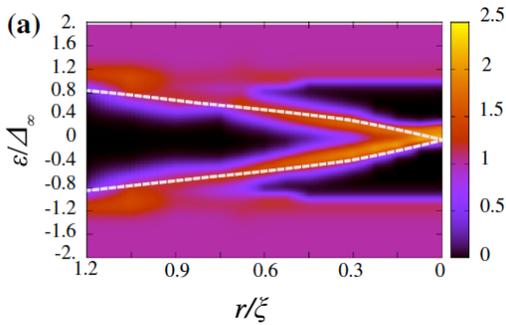


図3 非対称な局所状態密度

所状態密度が確認された。また、実験と

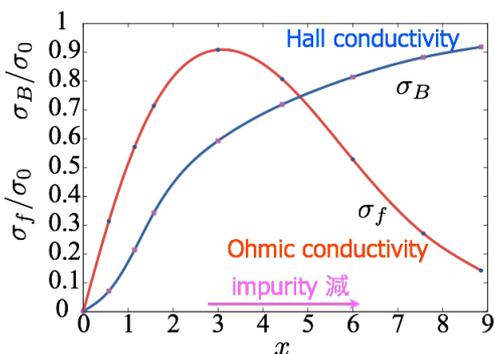


図4 オーム伝導度とホール伝導度

定式的に一致する渦芯でのメインピークのシフトが確認され、散乱過程やホール項の重要性を明らかにした。

また、一定の速度で渦芯が運動している時オーム伝導度やホール伝導度について解析を行った。これにより、超伝導体における磁場の侵入長が長くなるとオーム伝導度やホール伝導度が小さくなることを明らかにした (図4)。

(2) 空間反転対称性のない超伝導のドメイン境界での Ginzburg-Landau 表記

スピン軌道相互作用によって引き起こされるトポロジカル量子現象の一つとして空間反転対称性のない超伝導体のスピン流が注目されている。このような超伝導体はドメイン構造を持ち、特に、ツインドの境界でのスピン流が注目されている。超伝導状態は現象論的には Ginzburg-Landau の理論で説明される。本研究では、このドメインの境界での超伝導を Ginzburg-Landau 表記を用いて解析した。その結果、空間反転対称性のない超伝導体のドメインの境界では自発磁化が起こることを明らかにした (図5)。また、ドメインの境界ではスピン流だけでなく、超伝導流が流れることを明らかにした (図6)。

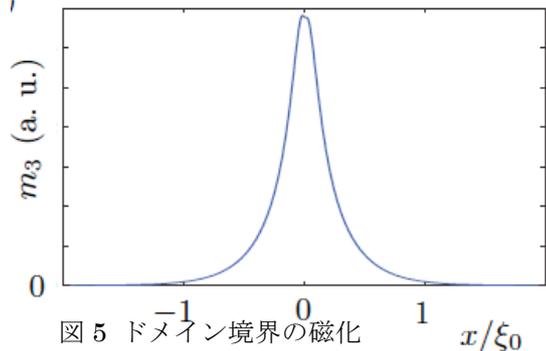


図5 ドメイン境界の磁化

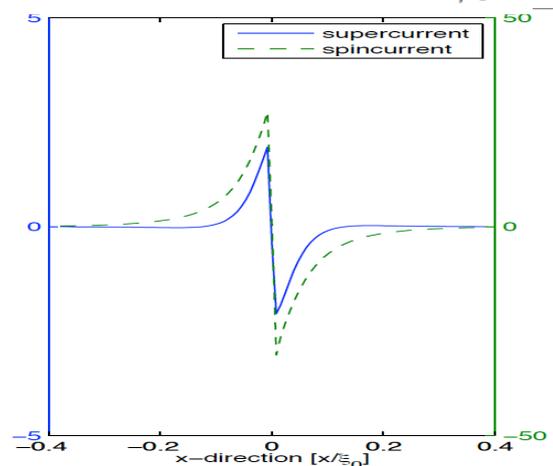


図6 ドメイン境界のスピン流と超伝導流

(3) BCS-BEC クロスオーバー領域での二粒子分光法による理論解析

近年、極低温原子気体において超伝導でのクーパー対形成とその凝縮に相当する、Fermi 気体の超流動が実現され、「BCS

理論的な超流動」から「分子ボソン BEC 超流動」へと連続的に移行する現象 BCS-BEC クロスオーバーの観測が可能となった。その性質の違いは素励起の違いと密接に関係する。したがって、超流動を構成する原子対の特定(クーパ対もしくは2原子分子)が重要となる。しかしながら、BCS-BEC クロスオーバー領域では、光放出分光法による1粒子スペクトル密度の研究が盛んに行われる一方、電子対の性質は調べられていない状況となっている。そこで、申請者は金属超伝導状態の電子対の性質を調べる事が可能な2電子放出分光法に着目し、それに相当する解析をBCS-BEC クロスオーバー領域に適用した。具体的には、2電子放出分光法に相当する“原子対の放出”を記述する表式を導出し、クロスオーバー領域における超流動を構成する原子対の性質

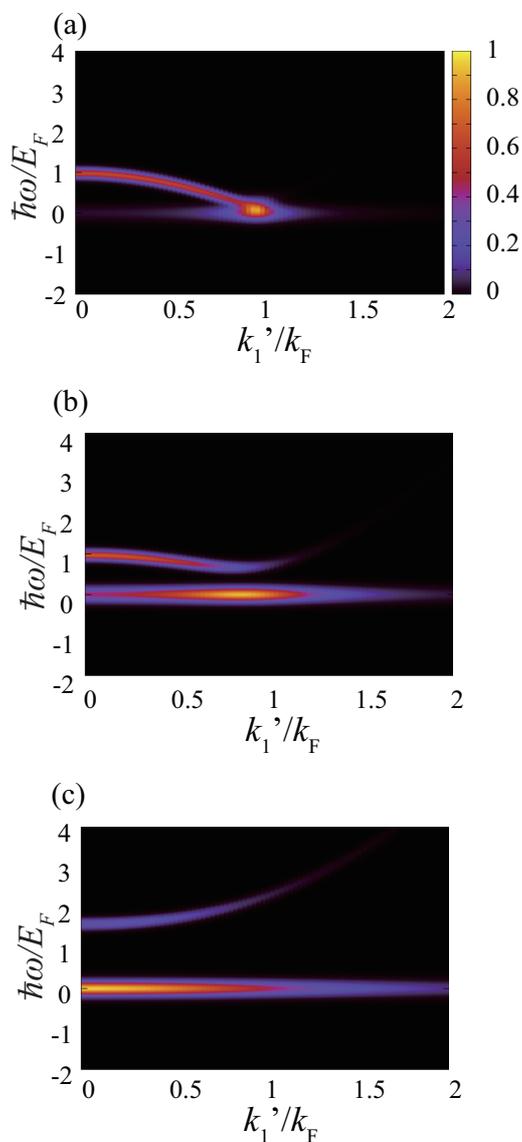


図 7 クロスオーバー領域での2粒子相関関数の様子

を調べた。特に超流動における“原子対から放出された二粒子のスペクトル密度”を計算することで、クロスオーバー領域での超流動を構成する原子対の性質を明らかにすることに成功した(図 7)。2粒子放出分光法によるBCS-BEC クロスオーバー領域での超流動の性質解明を提言した。

<引用文献>

[1] T. Hanaguri et al., Phys. Rev. B 85, 214505 (2012)

[2] Y. J. Lin, K. Jimenez-Garcia, and I. B. Spielman, Nature, **471**, 83 (2011)

#### 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)

① E. Arahata and T. Nikuni, Theory of the Two-Particle Emission from Superfluid Fermi Gases in the BCS-BEC Crossover, Phys. Rev. A 90 043601 (2014) 査読あり

② M. Achermann, T. Neupert, E. Arahata, and M. Sigrist, Ginzburg - Landau Description of Twin Boundaries in Noncentrosymmetric Superconductors, J. Phys. Soc. Jpn 83 044712 (2014) 査読あり

③ E. Arahata and Y. Kato, DC Conductivity in an s-Wave Superconducting Single Vortex System, J. Low Temp. Phys. 175 346 (2014) 査読あり

[学会発表] (計 1件)

荒畑恵美子 加藤雄介 超伝導渦糸系における直流伝導度の解析 物理学会 2013 年秋季大会 2013 年 9 月 27 日 徳島大学

[その他]

ホームページ等

<http://www.comp.tmu.ac.jp/a1208/>

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

荒畑 恵美子 (ARAHATA Emiko )

首都大学東京 理学研究科 准教授

研究者番号 : 30706411