

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 2 日現在

機関番号：82401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2015～2016

課題番号：15H06858

研究課題名(和文)トポロジカル物質の理論設計と物性の解明

研究課題名(英文)Theoretical modeling of topological materials and their properties.

研究代表者

中河西 翔 (NAKOSAI, Sho)

国立研究開発法人理化学研究所・古崎物性理論研究室・基礎科学特別研究員

研究者番号：80755116

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)：平行に並んだ2本のKitaev鎖中の相対的な超伝導位相を調べ、マヨラナ端状態がもたらす特異なジョセフソン結合を議論した。マヨラナ端状態間のジョセフソン結合は鎖間のトンネル結合の1次の効果として現れるため、通常のジョセフソン結合と位相差が生じる。競合の結果として位相が変調し、有限系においても基底状態に縮退が現れうることを明らかにした。

従来型超伝導状態を示す電子に対してスカーミオン構造をもつ局所磁場の影響を調べた。磁気不純物周りに局在する状態として良く知られるシバ状態に類似の状態がスカーミオンの中心に現れることを明らかにした。ただし波動関数が冪的に減衰する点において両者は質的に異なることを示した。

研究成果の概要(英文)：We discuss the phase degrees of freedom in superconducting order parameters in two parallel Kitaev chains. Majorana states locating at the ends of system give anomalous Josephson coupling different from usual coupling at the intermediate region of the system. Their competition results in spatially varying configuration of the phase along the system. Although the coupling between Majorana states give finite energy, the tunneling between different configuration of the phase remedies the degeneracy in the ground states of the system. A skyrmion coupled to superconductor gives quasi-bound states around the skyrmion core. The states are similar to Shiba state, which is a bound state arising around single magnetic moment in superconductor, but have different behavior in their wave function distribution. They decay in power law contrasted to the exponential decay of a Shiba state.

研究分野：物性理論

キーワード：トポロジカル超伝導 マヨラナ状態 スカーミオン

1. 研究開始当初の背景

電子状態のトポロジカルな性質が物性物理学の分野で盛んに研究されている。超伝導状態に対してもそのような観点から研究が行われトポロジカル超伝導状態を発現する系が理論提案に基づいた実験で実現されている。トポロジカルに保護された状態として現れる Majorana 状態の性質を議論し、実験結果との比較検証、どのような実験を行えばよいかなどを理論的に明らかにすることが望まれている。

2. 研究の目的

以下の2点について研究を行う。

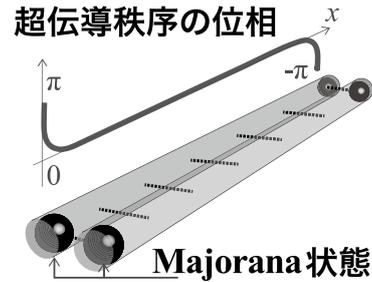
- (1) これまでに行われてきた実験の1つに1次元量子細線を用いたものがあるが、細線が複数並んだ際の Majorana 状態の振る舞いがどのようになるか、Majorana 状態間の結合に由来して超伝導秩序パラメータに空間依存性が表れることが期待されるが、特に位相部分に注目し従来の Josephson 効果と比較する。
- (2) 磁性体などの他の物質と超伝導体の接合系を考えることでトポロジカル超伝導状態を創り出す。トポロジカル絶縁体の表面状態や非自明な磁気構造と超伝導を組み合わせることでゼロエネルギー状態を生み、その性質を議論する。

3. 研究の方法

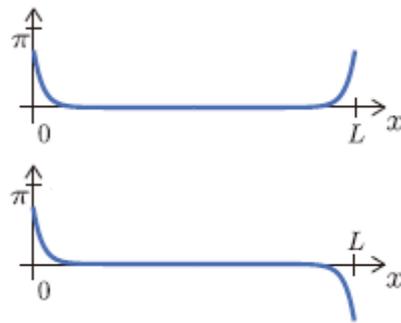
- (1) もっとも簡単な配列として2本の1次元系が平行に並び互いに結合した系を考える。このとき両端に存在する Majorana 状態間の結合を通じて超伝導秩序の位相が空間的に変調する様子を Ginzburg-Landau 理論に基づき解析することで議論した。Majorana 状態は結合を通じて有限のエネルギーを獲得し基底状態の縮退は失われてしまうと考えられるが、得られた位相の空間分布間のトンネル効果を取り入れて縮退が改めて現れるパラメータ領域を調べる。
- (2) 非自明な磁気構造として非共線磁気秩序であるスカーミオンを考える。スカーミオンが密に並び結晶を組んでいる時にはカイラル p 波超伝導状態が現れることを以前に明らかにしているが、本研究課題では単体のスカーミオンを用いてそのスペクトルを解析した。強束縛模型を用いた数値計算およびスカーミオンを単純化した上で T 行列を用いた解析計算を行い、超伝導ギャップ中に位置する状態の有無を調べた。特徴的な状態を注目しその波動関数の空間的な振る舞いを議論し、従来知られている Shiba 状態や Majorana 状態との違いを検証した。

4. 研究成果

- (1) 図に示したように2本の1次元系の中の

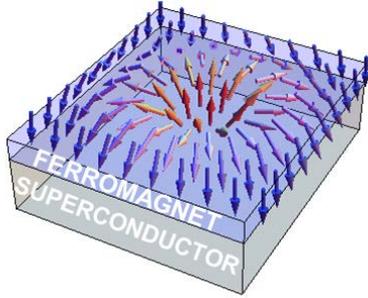


結合を考えると系の内部と端とは異なる Josephson エネルギーが得られることが分かった。具体的には内部では通常の Josephson 結合のように  $\cos(\theta)$  の依存性を示すのに対して、系の端では Majorana 状態が媒介することで  $\sin(\theta/2)$  の依存性になる。ここでは Josephson 結合が結びつけている超伝導体間の位相差を  $\theta$  としている。これにより内部では0シフト、端では $\pi$ シフトがエネルギー利得を生むことになり位相差は図に示すとおり空間的に変調し端にかけて有限になるキック構造をとることが分かる。空間的なスケールは超伝導秩序の固さ  $\rho$  と結合の大きさ  $J$  で決まり、その典型的な長さは  $(\rho/J)^{1/2}$  となる。

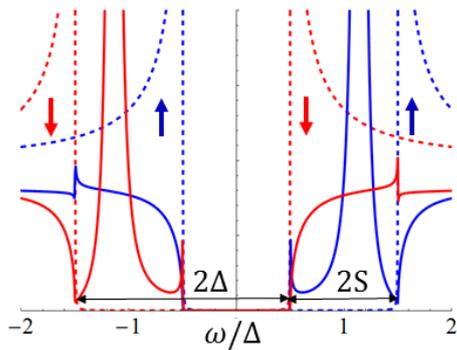


図は2つの異なる位相配置を示している。両端にそれぞれキック構造を持つが、左右のキックは相互作用している。上図では引力が働きよりエネルギーが低い配置となっている。Majorana 状態は単体の1次元系ではゼロエネルギーに位置しているが、この結合をとおして有限のエネルギーを持ち基底状態の縮退が失われ自明にギャップが開いた系となってしまう。しかし次のように、i) 有限サイズによる両端の Majorana 状態間の波動関数の重なり、ii) 左右のキック間の相互作用、および iii) 位相変調に関して  $\pm\pi$  の間のトンネル効果を考えると、有限のパラメータ領域において基底状態に縮退が現れることを明らかになった。これは超伝導量子ビットにおけるフラックス量子ビットに対応する状態と言える。

(2) s 波超伝導体上にスカーミオン構造を持つ磁性体を接合した系を考える(図参照). 超伝導体中の電子は交換相互作用を通じて磁気構造を背景磁場として感じるようになる.

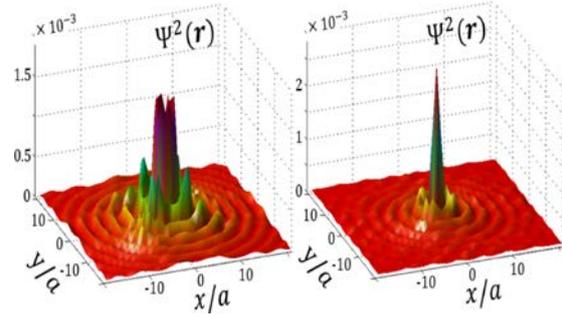


磁気モーメントが単体で超伝導体中に存在するときは Shiba 状態と呼ばれるインギャップ状態が現れることが知られている. この状態はスピンの磁気モーメントの向きに従って完全にスピン偏極している. 考えている系ではスカーミオン構造を形作る磁気モーメントの分だけ多数の Shiba 状態が現れて超伝導ギャップを埋めるスペクトルが得られる.



ここで  $\Delta$ : 超伝導ギャップの大きさ,  $S$ : 交換相互作用の大きさ, 矢印は準粒子状態のスピン状態を表す. スカーミオン構造は非共線的であり, 典型的な径付近では面内の磁気モーメントが有限になる. この面内成分がスピンアップとダウンの準粒子状態間の結合を生むことでピークには有限の幅が生じていることが分かる. スピンアップが支配的な準粒子状態に着目すると, それは遍歴しているスピンドアウン状態の準粒子スペクトル内に位置している. このため波動関数の空間的な広がりにはスカーミオン芯を中心として指数関数的に振る舞うのではなく, 冪的な振る舞いを見せることが分かった. この系ではインギャップ状態を得ることは出来ないことが解析的な計算から明らかになった. すなわちトポロジカルに非自明な状態ではない. 次図に示したのは数値計算から得られた2つの準束縛状態の波動関数の空間的な広がりである. 左図では中心周りにいくつかの節を持つ様子が見られるのでスカーミオン構造の周りには高次の角運動量を持つ散乱状態も現れていることが分かる. 右図は s 波チャ

ネルに対応する散乱状態で得られる状態の中では最も空間的に局在しているものである.



これらの状態を連続したスペクトルから抽出する際には Inverse Proportional Ratio と呼ばれる量に注目し, 数値計算で得られた各エネルギー固有状態に対して  $IPR = \sum 1/|\Psi|^4$  を計算した. これは波動関数の空間的な広がりをはなるとある領域に局在している場合に小さな値をとる.

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

(1)

S. S. Pershoguba, S. Nakosai, A. V. Balatsky  
 “Skyrmion-induced bound states in a superconductor”  
 Phys. Rev. B **94**, 64513(2016).

査読有

[学会発表] (計 3 件)

(1)

S. Nakosai, S. Onoda  
 “Magnetic Analogue of Superconductivity in Quantum Spin Ice”  
 International workshop on Nano-Spin Conversion Science and Quantum Spin Dynamics, 2016. 10. 12-15, 東京大学, 東京

(2)

S. Nakosai, S. Onoda  
 “Magnetic analogue of superconductivity in the Higgs ferromagnetic phase of spin ice”  
 International Conference on Highly Frustrated Magnetism 2016, 2016. 9. 7-11, Taipei, Taiwan

(3)

S. Nakosai, S. S. Pershoguba, A. V. Balatsky  
 “Skyrmion-induced Bound States in Superconductors”  
 APS March Meeting 2016, 2016. 3. 14-18, Baltimore, USA

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中河西 翔 (NAKOSAI, Sho)

国立研究開発法人 理化学研究所

古崎物性理論研究室

基礎科学特別研究員

研究者番号 : 80755116