

令和元年6月14日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K17432

研究課題名(和文)パラフェルミオンの電氣的制御を目指した理論研究

研究課題名(英文)Theoretical studies that aimed for electric control of parafermions

研究代表者

植田 暁子(Ueda, Akiko)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員

研究者番号：70453537

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：マヨラナフェルミオンを含むパラフェルミオンの検出、制御方法を理論的に研究した。パラフェルミオンが存在するトポロジカル超伝導体が常伝導体と接合している系を考え、パラフェルミオンが存在している証拠が伝導特性にどのように現れるかを考察した。完全係数統計を含む伝導特性をケルディッシュグリーン関数法を用いて計算した。

具体的な物質として、遷移金属ダイカルコゲナイド層状物質を考え、イオン液体ゲートを用いた層状物質の伝導制御を考察した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子コンピュータの実用化を阻んでいるデコヒーレンス(環境との相互作用によって量子状態が壊れること)の問題を解決すると期待されているトポロジカル量子コンピュータの実現のための基礎研究を行った。本研究によって提案されたマヨラナフェルミオンを含むパラフェルミオンの常伝導体を用いた検出方法により、これからさらに検出実験が盛んに行われることが期待される。

研究成果の概要(英文)：We have theoretically proposed the way to detect and control parafermions including Majorana fermions. We have considered the system where the topological superconductor is connected to the normal conductor and have examined the proof of existence of parafermions which appears in the transport properties. The transport properties including the full counting statistics have been calculated using Keldysh Green functions.

We have considered transition metal dichalcogenides as the materials for topological superconductors and have investigated the control of the transistors using the ion liquid gate.

研究分野：ナノ物理学

キーワード：トポロジカル超伝導体 マヨラナフェルミオン

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、量子コンピュータの実用化を目指した研究の技術革新が進んでいる。主に研究されているのは、量子アニーリングやゲート型の量子ビットを用いた量子コンピュータであるが、デコヒーレンス（環境により量子状態が壊れること）の問題が実用化を阻んでいる。

デコヒーレンスに強い量子コンピュータとしてトポロジカル量子コンピュータが注目を集めている。トポロジカル量子コンピュータは、トポロジカル超伝導体中の準粒子状態であるパラフェルミオンを利用した量子コンピュータである。パラフェルミオンは、トポロジカル的に保護された準粒子であることから、フォノンやその他の環境からの影響を受けにくい。パラフェルミオンは、粒子同士を交換しても同じ状態に戻らないアベール統計に従う。トポロジカル量子コンピュータでは、この粒子同士の交換を原理として利用する。

研究開始当初、パラフェルミオンの研究は始まったばかりであり、まだ観測報告のあるマヨラナフェルミオンについても検出の証拠が不十分であるとされていた。また、検出方法や電気的な制御方法は確立されていなかった。そこで、本研究では検出方法、制御方法を理論的に提案することにした。

2. 研究の目的

パラフェルミオンを用いたトポロジカル量子コンピュータを目指し、パラフェルミオンを検出、制御するシステムを理論的に提案する。パラフェルミオンのエネルギー状態や、非アベール性などのパラフェルミオンの特徴を検出するために、パラフェルミオンを含むトポロジカル超伝導体に常伝導体の電極を接合した系を考える。この系でのコンダクタンスやノイズなどを計算し、パラフェルミオンの電気伝導特性への影響を議論する。さらに、具体的な物質を想定した場合について計算シミュレーションを行い、パラフェルミオンの出現条件や制御方法を議論する。パラフェルミオンによる量子ビットの操作方法を考え、パラフェルミオンを用いたトポロジカル量子コンピュータデバイスの設計を行う。

パラフェルミオンを用いたトポロジカル量子コンピュータを実現するために、パラフェルミオンを電気測定で検出する方法、パラフェルミオンを交換する方法を確立する。また、パラフェルミオンを電気的に制御するために必要なデバイス設計を行うためのデバイスシミュレータを開発する。

3. 研究の方法

系としては、s 波超伝導体をスピン軌道相互作用の強い半導体ワイヤで挟んだ系を考える。半導体ワイヤ中の電子間の相互作用が強く、2 つの半導体ワイヤ間の近接ギャップエネルギーが 1 つの半導体ワイヤ中の近接ギャップエネルギーより大きい条件で $n=3$ のパラフェルミオンの出現が期待される。トポロジカル超伝導体と半導体電極が接合しているとする。半導体側はトポロジカル超伝導体の延長上に続いた通常のワイヤが取り付けられていたり、ジョセフソン接合になっていたり、アハラノフ・ボームリングや量子ドットが接合している場合を考える。超伝導体中には、パラフェルミオンが存在し、半導体中の電子と相互作用する。相互作用の強さは、半導体とトポロジカル超伝導体とのトンネルカップリングの強さを操作することで決まる。この系を簡単な有効ハミルトニアンを用いて表し、トポロジカル超伝導体中のパラフェルミオンはその統計性に従う準粒子の演算子を用いて取り扱う。電流の計算は有限バイアスの影響を取り入れることができるケルディッシュグリーン関数法を用いる。コンダクタンスに現れるパラフェルミオンの影響について考察する。アハラノフ・ボームリングの場合は、パラフェルミオンの位相情報がリングを貫く磁場によるコンダクタンスの振動に現れるかを議論する。

パラフェルミオンを実現するのに適した具体的な物質を議論し、量子コンピュータの設計を行う。具体的な物質としては、MoS₂ などの遷移金属ダイカルコゲナイド層状物質を考えた。遷移金属ダイカルコゲナイド半導体に接合する s 波の超伝導体には Nb 等を使う。Tight-binding model を用いて具体的なシステムをモデル化し、パラフェルミオンが出現するかを議論する。また、電気二重層電極などを用いて、MoS₂ 中の電子間相互作用を操作した場合、パラフェルミオンを制御できるかを議論する。電極による MoS₂ の電子密度の変化はポワソン方程式を解くことで取り入れる。

4. 研究成果

[研究 1] 電気伝導特性を用いたマヨラナフェルミオンの検出

トポロジカル超伝導体に常伝導体を取り付けたときの電子輸送の完全係数統計を調べ、完全係数統計に現れるマヨラナフェルミオンの特徴を考察した。ケルディッシュグリーン関数法に計数場を取り入れて、生成関数を求めた。求めた生成関数から、コンダクタンス、ノイズ、尖度を求め、マヨラナフェルミオンに、特有のノイズを発見した。

次に、マヨラナフェルミオンに量子ドットを接合し、AC 電場によって検出する方法を提案した。ケルディッシュグリーン関数法を用いた理論的な解析によってマヨラナフェルミオンの検出方法の理論的検証を行った。トポロジカル超伝導体が class D の時と class BDI の時の検出結果の比較を行った。

また、分子接合を用いてマヨラナフェルミオンを観測する実験が考えられている。分子にトポ

ロジカル超伝導体の電極を接合することにより、トポロジカル超伝導体による近接効果が分子の量子状態を変更するため、この状態変化を用いてマヨラナフェルミオンの検出を行う。この系での伝導特性の計算を非平衡グリーン関数法を用いて行った。最初に前段階の計算として、常伝導体のコンタクトを分子に接合した分子接合の AC コンダクタンスと完全計数統計を議論した。この成果について The Journal of Chemical Physics に論文発表し、日本物理学会において発表を行った。

[研究 2] マヨラナフェルミオンを検出するための奇周波超伝導の研究

トポロジカル超伝導体に常伝導体を取り付けると奇周波超伝導が出現する。図 1 のように常伝導体のスピン軌道相互作用の強い量子ドットで取り付けることで、奇周波超伝導の特徴をコンダクタンスを用いて検出する方法を考案した。通常、s 波超伝導体を取り付けると偶周波超伝導が出現するが、磁場を印加することにより、スピン軌道相互作用に起因して奇周波超伝導が現れる。本研究では、奇周波超伝導と偶周波超伝導の違いが、ゼロバイアスコンダクタンスに現れることを明らかにした。本研究成果を国際会議 EP2DS にて発表を行った。

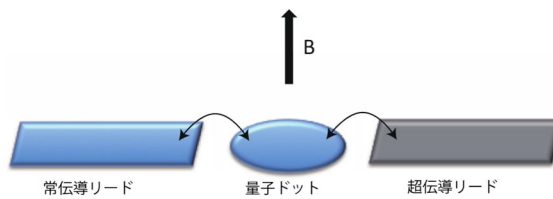


図 1 量子ドット-超伝導体接合の系

[研究 3] 遷移金属ダイカルコゲナイド半導体のイオン液体ゲート制御

トポロジカル超伝導体を発現させる物質の候補として、2次元層状物質が挙げられる。2次元層状物質の1つとして遷移金属ダイカルコゲナイドが挙げられる。2次元遷移金属カルコゲナイドにおいて、超伝導を発現させるためには、強電場を印加する必要がある。強電場を印加するために、図 2 のようなイオン液体ゲートを利用した遷移金属ダイカルコゲナイドトランジスタを用いてトポロジカル超伝導を発現させることを提案した。デバイス設計をするために、イオン液体ゲートを取り入れたデバイスシミュレータを開発した。イオン液体ゲートを取り付けた 2次元層状物質のシミュレーションは、これまで報告されていなかった。

本研究では、イオン液体中のイオンの有限サイズの効果を取り入れたポアソン方程式と半導体の電子とホール輸送のドリフト拡散方程式を自己無撞着に解くシミュレータモデルを考案し、シミュレータを作成した。電気二重層電極などを用いて、遷移金属ダイカルコゲナイド中の電子間相互作用を操作した場合、パラフェルミオンを制御できるかを議論した。イオン液体ゲートトランジスタのデバイスシミュレータを開発するため、ドリフト拡散方程式とポアソン方程式を用いた理論モデルの構築を行った。イオン液体の分布と金属電極-半導体接合を取り入れた理論モデルを考案し、イオン液体ゲートを用いた遷移金属ダイカルコゲナイドトランジスタのデバイスシミュレータの開発に世界で初めて成功した。開発したシミュレータを用いて、図 3 のように、伝導の両極性や pn 接合の形成などの性質を再現することに成功した。また、導出した電荷分布、バンド分布などを用いてイオン液体ゲート WSe₂ トランジスタが両極性を示すメカニズムを明らかにした。研究成果を応用物理学会、IBM ワトソン研究所、ニューヨーク大学で講演し、論文を投稿した。

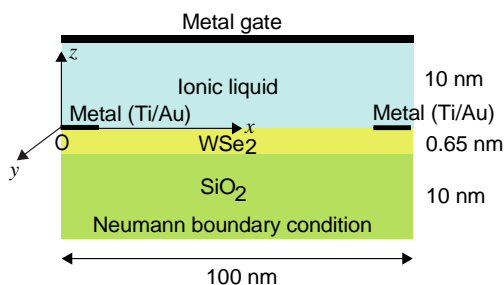


図 2 : イオン液体ゲート WSe₂ トランジスタ

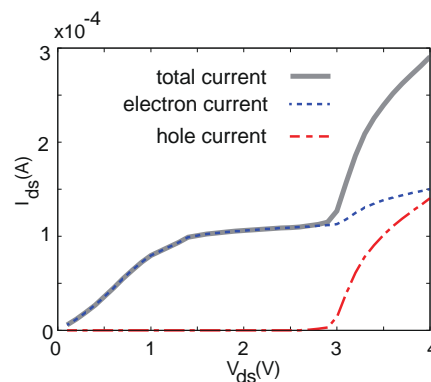


図 3 : 図 2 のトランジスタの I-V 特性

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 4 件)

Akiko Ueda, Yasuhiro Utsumi, Yasuhiro Tokura, Ora Entin-Wohlman, and Amnon Aharony, “AC transport and full counting statistics of molecular junctions in the weak electron-vibration coupling regime”, *Journal of Chemical Physics*, Vol. 146, 092313 (2017).

<https://doi.org/10.1063/1.4973707>

Zeinab Rashidian, Saeid Rezaeipour, Yaser Hajati, Zeinab Lorestaniweiss, and Akiko Ueda, “Fully Valley/spin polarized current and Fano factor through the Graphene/ferromagnetic silicene/Graphene junction”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 424, 207-212 (2017).

<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.10.052>

Akiko Ueda, Yasuhiro Utsumi, Hiroshi Imamura, and Yasuhiro Tokura, “Phonon-induced electron-hole excitation and ac conductance in molecular junctions”, *Journal of the Physical Society of Japan*, Vol. 85,043703 (2016).

<https://doi.org/10.7566/JPSJ.85.043703>

Akiko Ueda, Syuta Honda, and Hiroshi Imamura, “First-principles study of energy band gap of singlelayer $\text{Mo}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 55, 028003 (2016).

<http://doi.org/10.7567/JJAP.55.028003>

[学会発表](計 3 件)

植田 暁子、張 奕勤、佐野 伸行、今村 裕志、岩佐 義宏、「イオン液体ゲートを用いた遷移金属ダイカルコゲナイドトランジスタにおけるデバイスシミュレータの開発」, 応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学、2019/03/11

植田暁子, 内海裕洋, 今村裕志, 都倉康弘, 分子接合におけるフォノンによる電子正孔励起と AC コンダクタンス, 日本物理学会 2015 年年次大会, 金沢、2016/09/13

Akiko Ueda, Full counting statistics for metal-quantum dot-superconductor junctions with unconventional superconductivity, Akiko Ueda, 21st International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS), Sendai, 2015/07/26

6 . 研究組織

本人のみ

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。