

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2019～2023

課題番号：19H05610

研究課題名（和文）非可換エニオンの電氣的光学的制御

研究課題名（英文）Electrical and optical creation and control of non-Abelian anyons

研究代表者

樽茶 清悟 (Tarucha, Seigo)

国立研究開発法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・グループディレクター

研究者番号：40302799

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 140,680,000円

研究成果の概要（和文）：トポロジカル制御技術・物理の開拓を狙いとして、（1）半導体ナノ細線の超伝導接合で弾道的クーパー対分離や磁束渦の準粒子捕捉による超伝導電流の増強効果の実証、（2）結合ジョセフソン接合の超伝導ダイオード効果の発見とアンドレーエフ分子の検出、（3）WTe₂単原子膜に電気制御でジョセフソン接合を形成する技術の開発、（4）ポラリトン凝縮体光格子の形成によるトポロジカルフロケ状態の観測、などに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

半導体ナノ構造-超伝導体接合を基盤とする研究を進め、物理と応用の新展開をもたらした。（1）マヨラナ粒子の実現可能性の検証により、今後の同粒子探索に重要な指針を与えた。（2）アンドレーエフ分子という新概念を実験的に確立し、それに由来する新奇超伝導機能素子の開発可能性を明瞭に示した。（3）2次元トポロジカル絶縁体の理想的なジョセフソン接合の形成技術を構築し、マヨラナ粒子生成と制御に資する技術基盤を実現した。（4）トポロジカルフロケ状態の形成に初めて成功し、光制御によるトポロジカル物理の開拓に新しい舞台を提供するとともに課題とされているエニオンの生成と制御の実現に大きく近づいた。

研究成果の概要（英文）：Aiming to pioneer technology and physics of topological phases of matters, we have succeeded in (1) demonstrating ballistic Cooper pair splitting and supercurrent enhancement due to quasiparticle trapping at magnetic vortices using superconducting junctions of semiconductor nanowires, (2) discovering the superconducting diode effect in coupled Josephson junctions and detecting Andreyev molecules, (3) developing a technique to form Josephson junctions in a WTe₂ monolayer by means of electrical control, and (4) observing a topological floquet state of polariton condensation in the optical lattice.

研究分野：物理学、工学

キーワード：非可換エニオン トポロジカル超伝導 マヨラナ粒子 励起子ポラリトン

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2次元以下の粒子統計では位相変化が任意の値をとり得る粒子、エニオンが存在する。エニオンには可換と非可換の統計性に従うものがあり、後者は組み換えにおいて固有のトポロジカル位相を生じるため量子計算に利用でき、その量子操作にはトポロジカルな耐性があると期待されている。非可換エニオンは早くから特殊な系での実現に関する理論提案がなされていたが、長らく実証には至らなかった。しかし、その一種であるマヨラナ粒子(MF)がトポロジカル超伝導で実現可能であると提案があり、2012年にナノ細線-超伝導体の接合で実験的兆候が観測されたため研究は一気に加熱した。さらに、最近の進展により非可換エニオンが $5/2$ 分数量子ホール効果やスピン液体で発現するという実験が報告された。一方で、欧米ではマイクロソフト社の大規模投資による量子計算への応用研究が加速していた。しかし、このような状況にも関わらず、「エニオンの粒子の組み換えに付随する非可換統計性やトポロジカルの物理とは」、「量子計算における量子操作に対するデコヒーレンス耐性の実体とは」、という研究が進んでいなかった。

2. 研究の目的

MFは、これまで単一ナノ細線-超伝導体の境界、トポロジカル超伝導体のエッジなどにおいて、エネルギー零の状態として発現するという実験が報告されている。しかし、これらの系では高磁場を必要とするため、超伝導体のギャップがソフト化して、MFのトポロジカル保護の特性が劣化すると考えられている。本研究では、安定で制御性の高いMFを発現させるプラットフォームとして予測されている、(1)二重ナノ細線-超伝導体接合、2次元トポロジカル絶縁体-超伝導体接合などの1次元トポロジカル超伝導体、(2)3次元トポロジカル絶縁体-超伝導体接合、(3)励起子ポラリトンのトポロジカル状態、などを用いてエニオンの生成と安定化の技術、その物理的性質と量子計算への応用の可能性を探索する。

3. 研究の方法

【(1) 研究方法】

半導体超伝導体接合について、デバイスの微細加工技術の向上、電子輸送測定、およびマイクロ波分光測定を利用して研究を行う。2次元トポロジカル絶縁体では、ファンデルワールス(vdW)結晶を用いて量子スピンホール絶縁(QSHI)デバイスを開発する。理論研究では、場の理論、ボゾン化法、繰り込み群解析を用いた研究を進める。(2)3次元トポロジカル絶縁体の高品質なジョセフソン接合の作製技術を開発し、デバイスの測定を行う。(3)自由度の高いポラリトン輸送制御の新技术を開発する。また、ポラリトン輸送のダイナミクスの光学測定技術を開発する。

【(2) 研究を遂行する上で生じた問題点及びその解決方法】

(樽茶、松尾)コロナ禍の影響により、研究員の雇用中止や共同研究先の成膜の大幅な遅れ、また長期間にわたる研究所のラボ封鎖と使用制限があったが、非局所ジョセフソン効果の観測と制御に関する実験を行い非局所超伝導相の新たな制御技術を確立することができた。また、2021年1月にMFの実証の決め手となっていた、論文が出版誌から撤回された(2021年3月)。これはMFの実現を否定するものではないが、分野としては大きく後退するものであったため、ナノ細線の実験のみではなく様々な構造の研究を行うことにシフトした。

(ディーコン)コロナ禍の影響により、ラボ封鎖と使用制限、所属研究室の運営の混乱などがあり、計画が大幅に遅れ、また、ドイツの共同研究者の研究室での仕事が全体的に停止するという問題が続いた。最終的には、当初想定していた、超伝導電極のエッジコンタクト法は単層の WTe_2 には適さないことが判明し、より複雑なデバイスアーキテクチャが必要となった。

(ロス)コロナ禍の中でも計画の進行を予定通りに保つために多大な努力をしてきたが、対処しきれない多くの困難があった。ロスはスイスバーゼル大学と理化学研究所に研究室を持っていて、理化学研究所の2名が本研究課題に従事している。この1年近く海外への渡航、入国が制限されたため、特に海外の共同研究者やロス本人が密接に関わる研究課題に関して、オンラインで議論を行ったが、やはり直接対面に比べて、効率が低下した。

なし。(松尾)

(樽茶)励起子ポラリトンに関して、これまでに、ポラリトンの縦方向フローを光で駆動制御する技術を新たに開発した。この方法は、構造をもつ格子と組み合わせることで、ポラリトンのトポロジカル状態を安定に生成することに使える可能性があることから、中間評価後に計画に付け加えた。

【(3) 当初に予定していた研究経費の使用計画を変更して行った研究計画・研究方法】

(樽茶、松尾)計画申請時には1.4T磁石付きデュワー購入を予定していた(2019年度)が取り

やめ、最終的にヘリウム価格の急騰に対応するためヘリウムリサイクル装置の購入とした。また原子層堆積装置に関して、微細加工時の問題を解決するため原子間力顕微鏡の購入に変更した。

【(4) 中間評価で受けた指摘事項に対する対応状況】

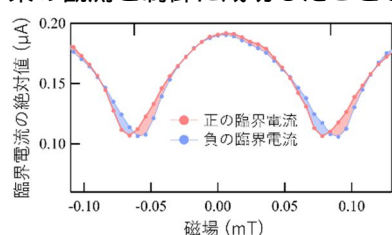
該当なし

4. 研究成果

【(1) 本研究課題による研究成果】

(樽茶・松尾)二重InAsナノ細線超伝導接合については、採択以前に弾道的なクーパ-対分離現象を実験検出していた。採択後に、特に1次元電子間相互作用に対するゲート電圧効果の詳細な評価と解析を行った。これにより、超伝導近接効果によって誘起された非局所近接超伝導のエネルギーが局所超伝導のエネルギーよりも大きくなる条件(無磁場MFの生成に必要)が、ゲート電圧で調整できることを確認した。また、磁場依存性の測定において、クーパ-対分離に起因する非局所近接超伝導が、局所超伝導の臨界磁場のおよそ1/2の磁場で消える原因を考察し、非局所成分のクーパ-対が二本のナノ細線に広がっていることに因ることを指摘した(論文10)。また、採択以前に実験実証していたInAs量子細線の強いスピン軌道相互作用の働く1次元電子系の朝永ラッティンジャー液体性について、ロスチームとの共同研究によりラッティンジャー液体パラメータを評価し、InAsでは電子間相互作用が強く働くこと、しかし、スピン軌道相互作用の影響は非常に小さいことを解明した(Phys. Rev. B 99, 155304 (2019))。今回の成果は、トポロジカルな物質相を実現するためにInAs細線が有望なプラットフォームである、スピン軌道相互作用を有する細線に対して、電子間相互作用の強さを定量評価する指針となると考えられる。

続いて、MFの検証に向けて、単一、及び二重ナノ細線ジョセフソン接合のシャピロ階段の予備実験を行った結果、予想外にも半整数倍の階段を観測した。詳細な解析とゲート電圧の依存性から、半整数倍のシャピロ階段はナノ細線の電子輸送の弾道性に起因する接合の高い透過率が起源であることを明らかにした(Phys. Rev. Research 2, 033435 (2020).)。また、近年報告されていたMFの実験結果に疑義が生じているため、MFに関与する超伝導接合の物理を見直す必要が出てきた。そこで、単一ナノ細線ジョセフソン接合の超伝導電流の磁場依存性を測定し、面直磁場が印加された際にある閾磁場に達すると超伝導電流の大きさが倍程度に増加する現象を観測した。これには同様な先行実験があり、MFを起源とするという議論がなされていた。しかし、我々はゲート電圧により閾磁場が変化しないことや磁場の掃引方向に対して明瞭なヒステリシスが観測されること、さらに磁場方向を回転した際にも、面直磁場の成分のみで閾磁場が決まっていることを実験的に見出した。これらの結果はMFを起源とする現象ではなく、超伝導電極に侵入する磁束渦が熱励起した準粒子を捕捉することにより生じる現象であることを解明した(Phys. Rev. Lett. 128, 207001 (2022)、論文7)。また、二重ナノ細線に関しても、MF生成の基盤となる物理である非局所近接超伝導相の理解を深める必要が生じた。そこで、二重ナノ細線の各細線上に一つの超伝導電極を共有する二つのジョセフソン接合を形成し、超伝導輸送特性を調べた。その結果、片方のジョセフソン接合の超伝導電流がもう他方のジョセフソン接合の位相差や電子密度に依存することを発見した。これは一つの共有する超伝導電極を介して二つのジョセフソン接合がコヒーレントに相互作用していることを意味するもので、非局所ジョセフソン効果の観測と制御に成功したことを示している(Communications Physics 5, 221 (2022).)。



非局所超伝導相の研究を進展させるため、量子井戸上に結合ジョセフソン接合を作製し、その極低温測定を行った。その結果、我々が考案した結合ジョセフソン接合の電流位相関係の評価を行い、ゼーマン効果がなくとも接合同士のコヒーレント結合によって異常ジョセフソン効果が発現することを見出した(論文2)。さらに、異常ジョセフソン効果に由来する超伝導ダイオード効果の検出と位相制御(左図)にも成功した(論文4)。また、高周波を結合ジョセフソン接

合素子に照射することでシャピロ応答を誘起した結果、ダイオード効果の効率を大幅に向上することに成功した(論文準備中。ディーコンチームとの共同研究)。超伝導ダイオード効果は現在低消費電力での整流素子としての応用が期待されている。これらの結果は非局所超伝導相に関する基礎学理の確立に大きく貢献するものであることに加え、非局所超伝導相の制御によって新しい超伝導素子の持つ機能性を創出できることを実証した結果ということができる。さらに、トンネル分光測定を行い、二つの単一ジョセフソン接合が結合した際にアンドレーエフ状態が大きく変調されることを発見した。理論計算との比較の結果、本結果は各接合のアンドレーエフ状態がコヒーレントに結合したことでアンドレーエフ分子状態が形成された結果であるとわかった。加えて、実験的に超伝導ギャップが閉じる振る舞いが観測された(論文3)。近年この結合ジョセフソン接合において、トポロジカル超伝導とMFの実現可能性が提案されており、実験的に観測された超伝導ギャップの消失はMF出現の兆候なる可能性がある。

これらの研究成果は当初目的にあるMFの検出および制御を達成できていないが4. に記載の

あるようにコロナ禍の影響およびMFの実験的検証手法や先行研究への疑義が生じたことによる大きな影響があった。一方で、当初計画にあったクーパー対分離および非局所超伝導相関の研究に関しては当初予定を大きく上回った成果が得られた。非局所超伝導相関の位相制御による超伝導ダイオード効果をはじめとした新機能開拓やアンドレーエフ分子状態という新しい概念の実証の成功などは非局所超伝導現象の物理という新しい研究領域の創出につながる大きな成果である。

(ディーコン)WTe₂ジョセフソン接合デバイスの開発では、まず、特性評価のために積層した単層WTe₂に電気的コンタクトを付ける方法を確立した。研究構想時には、多層WTe₂へのin-situエッチング後に試料端に電極をとるプロセスをテストしていた。しかし、このプロセスは単層および2層デバイスでは不調であることがわかった。そこで、単層を多層フレークで接触させ、その上で端電極をとるという、より複雑なデバイスアーキテクチャを提案、開発した。まず、Pdコンタクトを多層膜WTe₂に施し、熱処理することでPdの拡散によりPdTeが生成され、その結果超伝導状態を容易に形成できることが分かった (Applied Physics Express 15(7) 075003 (2022).)。この手法を用いて単層WTe₂に対して電気的なコンタクトを作製することが可能となった。さらに、単層WTe₂の微細加工工程を最適化することで電気ゲートによる超伝導領域の形成およびジョセフソン接合デバイスの動作の確認にはじめて成功した。また、交流ジョセフソン効果の観測も行い、シャピロ階段の測定に成功した。さらに、デバイスの伝導チャンネルの調整が可能となり、磁気応答の解釈において2次元超伝導性を考慮することが必要であると示した (論文1)。

直流電気測定では得られないMFの情報を得るために、我々はアンドレーエフ束縛状態を直接測定する分光技術の開発およびそのためのデバイス開発を行った。特にデバイスについてはエピタキシャルに成膜された超伝導体とInAsナノ細線系に焦点を当て、複数の手法に取り組んだ。まずInAsナノ細線上にエピタキシャル成膜されたアルミニウムの接合の加工技術を開発し、高い透過率を持つアンドレーエフ束縛状態のトンネル分光測定に成功した (Phys. Rev. Applied 14, 054019 (2020).)。さらに、大きな臨界電流を持つ超伝導体であるNbおよび電子ドープされたInAsナノ細線を用いたジョセフソン接合について研究を行い、ゲート電圧によって臨界電流を0-300 nAの範囲で制御できることを示した (Nanoscale Adv., 3, 1413-1421 (2021). Physical Review Materials 6, 024602 (2022).)。また、ジョセフソン接合を共振器やチップ上の検出回路に結合させる方法を開発した。このためにサファイア基板上に測定回路を作り、その上にインジウムまたは銀のエポキシを使ってデバイスチップを裏返して接着し、電気的な接続を形成する手法を確立した (フリップチップ法)。この手法を用いてInAsナノ細線のジョセフソン接合内に形成されているアンドレーエフ束縛状態の分光実験を行った結果、フリップチップ法によって透過率の高い接合中のアンドレーエフ束縛状態のマイクロ波分光測定に成功した (論文8)。

また、新しいMFの実験系の開発のため、我々はコア(GaAs)/シェル(InAs)ナノ細線デバイスの研究に着手した。近年、表面が超伝導体に覆われた円筒状の1次元電子系を持つナノ細線に関して、位相の巻き数を円筒状電子系内の磁束により制御することでトポロジカル超伝導を実現する方法がデンマークから提案された (S. Vaitiekenas, Science 367, 6485 (2020).)。これまでの研究ではMFの兆候は報告されているが疑念が持たれている。これは、報告されている実験では通常の1次元電子系が使用されており円筒状の電子系を用いるという理論的提案とは異なっているためと考えられる。そこで、GaAs/InAsのコア/シェル系を用いることとした。この系ではシェルであるInAsのみが電子系を有するため理論的に提案のある円筒状の電子系を実現できると考えられる。我々はGaAs/InAsコア/シェルナノ細線のジョセフソン接合の加工技術を確立し、測定の結果、デバイスの形状に起因するアハラノフ・ボーム効果の観測に成功した。これは円筒状の電子系が実現できていることを示す結果である (arXiv:2402.13880 (2024).)。現在、この細線に対して表面を完全に覆う超伝導接合の作製技術を開発している。

以上の成果は当初計画にあったMFの実証には到達していないものの、そのために必要なデバイス微細加工技術やフリップチップ法によるマイクロ波分光手法などの全ての基盤技術の開発に成功している。

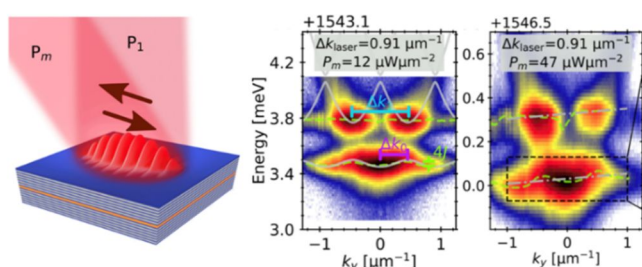
(ロス)樽茶・松尾グループの実験結果を受けて、スピン軌道相互作用を有するラッティンジャー液体の電荷輸送をさまざまな電荷不純物の存在下で解析した。その結果、不純物の種類、電子間相互作用の強さ、スピン軌道結合によるバンドの歪みに依存した指数を持つ、普遍的なスケールリング関係が得られた (論文9)。また、同量子細線が複数サブバンドを有する場合について調べ、内因的または外因的なスピン軌道相互作用によって生成されたヘリカル磁場の存在下での普遍的な輸送特性と分数励起の新しい物理機構を明らかにした。ヘリカル磁場と電子間相互作用の組み合わせにより、特定の占有率で高次の散乱過程が生じる。その結果、材料パラメータに依存しない普遍的な分数値に伝導度ディップが生じ、これを簡単な輸送測定で調べられることがわかった (Phys. Rev. Res. 2, 043208 (2020).) また、試料端に現れるヘリカル状態の特性について、特に半導体での実現可能性や実験的評価の理論的レビューを行った (Semicond. Sci. Technol. 36 123003 (2021).)。また、アンドレーエフ分子を用いた高忠実度での2量子ビットゲート操作の理論提案を行った (Phys. Rev. B 109, 085303 (2024).)

ツイスト二層グラフェンを、相互作用する量子細線の二次元ネットワークとして記述し、そ

の電子相を研究した。その結果、分数充填量においてギャップレスカイラルエッジ状態を持つ絶縁相を実現する条件を解析し、実験で観測された量子異常ホール状態に類似することを解明した。(Phys. Rev. B 108, L121409 (2023).)

(松尾)ゲート制御可能な3次元トポロジカル絶縁体のBiSbTe薄膜を用いてジョセフソン接合を作製し、極低温においてシャピロ階段を測定した。その結果、奇数倍のシャピロ階段の消失は観測されなかったが、その原因が接合に並列に存在する大きな電気容量であること、及び接合の質が悪く近接効果が弱いことにあることを解明した(Phys. Rev. B 101, 115410 (2020).)。また、MFの制御に用いるコルビノ型ジョセフソン接合の輸送特性を実験的に調べた。その結果、通常の平面ジョセフソン接合のフラウンホーファー型の磁場依存性ではなく、大きなヒステリシスのある三角型の特徴的な磁場依存性を得た。これは、接合内にジョセフソン渦が侵入していることを間接的に示している。この磁場特性を解析することにより磁束渦のコア半径を評価した(Phys. Rev. B 102, 045301 (2020).)

(樽茶)微小共振器中での励起子ポラリトンのトポロジカル相を実現し、強相関領域への拡張性を持つ、いくつかの独創的な手法を研究した。まず、我々は「光パドル」手法を用いて、8GHzまでのポラリトン凝縮体の高速回転を初めて観測した。この回転は、1粒子あたり \hbar を超える角運動量を持つことを観測し、複数の量子化渦の核生成を確認した(論文6)。



また、我々はマイクロ波「光コンベアベルト」の手法を用いて、断熱的に励起されたポラリトン凝縮体のトポロジカルフロケ状態を初めて観測することに成功した(左図)。この実験では、2つのレーザーの干渉によって光学格子を形成し、ポラリトンのエネルギーバンドを作り出す。格子を(2つの

のビームの周波数オフセットによって)動的に制御することで、ポラリトンバンドを変調することができることを実証した。また、動的制御によりバンド構造がチャーン数 ± 1 およびブランク定数の勾配を幅広いパラメータにわたってもつことを示した(論文5)。さらに、ポラリトン凝縮が持つ共鳴周波数から外れた光の変化に対する応答を定量評価することで(投稿中)、非平衡超流体における新しい輸送現象が明らかになった。

加えて、我々はポラリトンの光子成分と励起子成分の両方を $1\mu\text{m}$ 以下のポテンシャルトラップと格子に独立かつ高精度に閉じ込めることができる独自の技術(高エネルギー陽子注入による半導体微小共振器の相互拡散)を開発し(Adv. Opt. Mat. 2201569 (2022).)、米国仮特許を取得した[No.18/501,552]。また、ヴェルツブルク大学との共同研究で、作製したカゴメ格子フラットバンド状態におけるポラリトン超流動の輸送を研究し、コンパクトな局在状態に加えエッジ状態での一方向の輸送の両方を実現した(投稿準備中)。

これらのポラリトンに関する成果はエニオンの検出には到達していないものの、当初予定したトポロジカル状態の実現、非散逸のエッジ状態での輸送観察などには成功しており、さらに当初予想した以上の技術開発と基礎学理的知見が得られた。今後これらの技術をもちいてエニオンの創出を目指す。

【(2) 当初に予見していなかった新たな展開等によって得られた研究成果】

研究成果欄にも記載したが、当初非局所超伝導相関の位相制御により超伝導ダイオード効果や異常ジョセフソン効果など新たな超伝導現象を創出することが可能であると実証した。これらの結果は高く評価されており、新たな超伝導デバイス物理の研究指針になる重要な成果と位置付けられる。

また、MFの実験に関する論文の撤回により、単一ナノ細線の超伝導接合に関する実験的証拠の再検証がすることが重要視されてきた。そのため、我々も計画段階では考えていなかったが、単一ナノ細線ジョセフソン接合の超伝導電流が磁場で異常に増大する現象について、MFの実験的証拠であるかを再検証した。その結果、本現象はMFによるものではなく渦糸による重粒子捕捉という古くから知られた機構で説明可能であることがわかった。この研究は論文査読においても重要性を認識され、Editors suggestionにも選ばれている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計29件（うち査読付論文 29件／うち国際共著 29件／うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 Randle Michael D., Hosoda Masayuki, Deacon Russell S., Ohtomo Manabu, Zellekens Patrick, Watanabe Kenji, Taniguchi Takashi, Okazaki Shota, Sasagawa Takao, Kawaguchi Kenichi, Sato Shintaro, Ishibashi Koji	4. 巻 35
2. 論文標題 Gate Defined Josephson Weak Links in Monolayer WTe ₂	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advanced Materials	6. 最初と最後の頁 2301683-2301693
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/adma.202301683	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Matsuo Sadashige, Imoto Takaya, Yokoyama Tomohiro, Sato Yosuke, Lindemann Tyler, Gronin Sergei, Gardner Geoffrey C., Manfra Michael J., Tarucha Seigo	4. 巻 9
2. 論文標題 Phase engineering of anomalous Josephson effect derived from Andreev molecules	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1126/sciadv.adj3698	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Matsuo Sadashige, Imoto Takaya, Yokoyama Tomohiro, Sato Yosuke, Lindemann Tyler, Gronin Sergei, Gardner Geoffrey C., Nakosai Sho, Tanaka Yukio, Manfra Michael J., Tarucha Seigo	4. 巻 14
2. 論文標題 Phase-dependent Andreev molecules and superconducting gap closing in coherently-coupled Josephson junctions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 8271
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-023-44111-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Matsuo Sadashige, Imoto Takaya, Yokoyama Tomohiro, Sato Yosuke, Lindemann Tyler, Gronin Sergei, Gardner Geoffrey C., Manfra Michael J., Tarucha Seigo	4. 巻 19
2. 論文標題 Josephson diode effect derived from short-range coherent coupling	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Physics	6. 最初と最後の頁 1636 ~ 1641
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41567-023-02144-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Y. del Valle Inclan Redondo, X. Xu, T. C. H. Liew, E. A. Ostrovskaya, A. Stegmaier, R. Thomale, C. Schneider, S. Dam, S. Klembt, S. Hofling, S. Tarucha and M. D. Fraser	4. 巻 -
2. 論文標題 Non-reciprocal band structures in an exciton-polariton Floquet optical lattice	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Nature Photonics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41566-024-01424-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 del Valle-Inclan Redondo Yago, Schneider Christian, Klembt Sebastian, Hofling Sven, Tarucha Seigo, Fraser Michael D.	4. 巻 23
2. 論文標題 Optically Driven Rotation of Exciton-Polariton Condensates	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 4564 ~ 4571
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.3c01021	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Sato Yosuke, Ueda Kento, Takeshige Yuusuke, Kamata Hiroshi, Li Kan, Samuelson Lars, Xu Hong Qi, Matsuo Sadashige, Tarucha Seigo	4. 巻 128
2. 論文標題 Quasiparticle Trapping at Vortices Producing Josephson Supercurrent Enhancement	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 207001-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.128.207001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Zellekens Patrick, Deacon Russell S., Perla Pujitha, Grutzmacher Detlev, Lepsa Mihail Ion, Schapers Thomas, Ishibashi Koji	4. 巻 5
2. 論文標題 Microwave spectroscopy of Andreev states in InAs nanowire-based hybrid junctions using a flip-chip layout	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Communications Physics	6. 最初と最後の頁 267
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42005-022-01035-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Ueda Kento, Matsuo Sadashige, Kamata Hiroshi, Baba Shoji, Sato Yosuke, Takeshige Yuusuke, Li Kan, Jeppesen Soren, Samuelson Lars, Xu Hongqi, Tarucha Seigo	4. 巻 5
2. 論文標題 Dominant nonlocal superconducting proximity effect due to electron-electron interaction in a ballistic double nanowire	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eaaw2194 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.aaw2194	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hsu Chen-Hsuan, Stano Peter, Sato Yosuke, Matsuo Sadashige, Tarucha Seigo, Loss Daniel	4. 巻 100
2. 論文標題 Charge transport of a spin-orbit-coupled Luttinger liquid	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 195423 1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.195423	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計126件 (うち招待講演 75件 / うち国際学会 80件)

1. 発表者名 M.D. Randle, M. Hosoda, R.S. Deacon, M. Ohtomo, P. Zellekens, K. Watanabe, T. Tanaguchi, S. Okazaki, T. Sasagawa, K. Kawaguchi, S. Sato, and K. Ishibashi
2. 発表標題 Gate-Defined Josephson Weak-Links in Monolayer WTe ₂
3. 学会等名 Advanced Materials Research Grand Meeting MRM2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kobayashi Shohei, Sato Yosuke, Lindemann Tyler, Gronin Sergei, Gardner Geoffrey, Manfra Michael, Matsuo Sadashige, Tarucha Seigo
2. 発表標題 Superconducting diode effect exhibited by coupled Josephson junctions under in-plane magnetic field
3. 学会等名 25th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-25) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 R.S. Deacon
2. 発表標題 Gate Defined Josephson junctions in monolayer WTe ₂
3. 学会等名 The 1st U-Tokyo ISSP・RIKEN CEMS Collaboration Workshop (招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Seigo Tarucha
2. 発表標題 Hybrid Semiconductor Nanostructure-Superconductor Junctions
3. 学会等名 ENS-UT Workshop on Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Sadashige Matsuo
2. 発表標題 Nonlocal Josephson effect in coherently coupled Josephson junctions
3. 学会等名 Superstripes2023 Quantum complex matter (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松尾 貞茂、井本 隆哉、横山 知大、佐藤 洋介、Lindemann Tyler、Gronin Sergei、Gardner Geoffrey、Manfra Michael、樽茶 清悟
2. 発表標題 ジョセフソン接合同士の結合に起因する非相反超伝導輸送
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Matsuo
2. 発表標題 Experimental study on superconducting junctions of a double InAs nanowire
3. 学会等名 The Future of Topological Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 D. Loss
2. 発表標題 Majorana and Andreev Bound States in Proximitized Rashba Wires and Layers
3. 学会等名 Conference on Signatures of Topology in Condensed Matter (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 松尾貞茂, 樽茶清悟	4. 発行年 2023年
2. 出版社 アグネ技術センター	5. 総ページ数 -
3. 書名 固体物理Vol. 58 No. 4 (通巻686号)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	ロス ダニエル (Loss Daniel) (00524000)	国立研究開発法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・チームリーダー (82401)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	ディーコン ラッセル (Deacon Russell) (40552443)	国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・専任研究員 (82401)	
研究分担者	松尾 貞茂 (Matsuo Sadashige) (90743980)	国立研究開発法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・研究員 (82401)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	フレイザー マイケル デスモンド (Fraser Michael Desmond)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
中国	Peking University			
スウェーデン	Lund University			
米国	University of California	Purdue University	NTT Research, Inc., Sunnyvale, CA	
スイス	Basel University	University of Wurzburg		
ドイツ	University of Wurzburg	The Peter Grunberg Institute		
オーストラリア	Australian National University			