

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2023

課題番号：19K14630

研究課題名（和文）二重量子アンチドットにおけるコヒーレント準粒子輸送

研究課題名（英文）Coherent quasiparticle transport via a double quantum antidot

研究代表者

秦 徳郎（Hata, Tokuro）

東京工業大学・理学院・助教

研究者番号：30825005

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本課題では、二つの量子アンチドットを用いて分数準粒子をコヒーレント操作することを目標とした実験的研究を3つ行った。一つ目は、量子アンチドットを介したトンネリングに伴う微小電流の測定技術の確立である。二つ目は、整数量子ホール系における、変調可能なトンネル結合をもつ二重量子アンチドットの作製である。三つ目は、分数量子ホール系における単一の量子アンチドットの形成である。一つ目および二つ目の実験は、国内外での学会で発表をし、また論文として報告をした。一方、三つ目の実験は学会発表を行い、現在、論文執筆中である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

分数量子ホール系における準粒子はエニオンと呼ばれ、フェルミオン統計やボゾン統計にも従わない。2つのエニオンの交換操作（ブレーディング）を利用することで、トポロジカル量子コンピュータへの応用が期待されている。理論的に、複数の量子アンチドットを利用した交換操作が提案されているが、その実験的な確立はなされていない。本課題では、変調可能なトンネル結合を有する二重量子アンチドットの作製に成功し、さらに分数量子ホール系での単一の量子アンチドットの形成にも成功した。本成果は、分数量子ホール系でのエニオン交換操作に向けた第一歩となるもので学術的意義が高い。

研究成果の概要（英文）：In this project, we conducted three experimental studies aimed at coherent manipulation of fractional quasiparticles using two quantum antidots. The first is the establishment of a technique for measuring small currents associated with tunneling through a quantum antidot. The second is the demonstration of double quantum antidots with tunable tunneling coupling in the integer quantum Hall regime. The third is the formation of a quantum antidot using a high-mobility gallium arsenide substrate so that fractional quantum Hall systems can emerge. The first and second experiments were presented at conferences in Japan and abroad and were reported in articles. The third experiment was presented at a conference, and we are currently preparing a paper.

研究分野：メソスコピック物理

キーワード：量子ホール効果 分数量子ホール効果 量子アンチドット

### 1. 研究開始当初の背景

極めてクリーンな二次元電子系に強磁場を印加すると、量子多体効果によって、分数電荷を準粒子に持つ分数量子ホール効果が現れる。1982年の発見以来、電気測定、光学測定、NMRといった様々な手法でその新奇物理現象が解明されてきた。そして、量子多体研究の発展に大きく貢献し、1998年にはノーベル物理学賞の対象となった。

分数量子ホール効果が注目を浴びる大きな理由の一つは、準粒子の統計性に因る。分数量子ホール系の準粒子は、フェルミ統計およびボーズ統計のどちらとも異なるエニオン統計で記述される。その中でも、非可換な統計性を持つ準粒子を操作することで、従来の量子コンピュータとは異なる仕組みを持つトポロジカル量子コンピュータの実現が近年期待されている。しかし、これまでの分数量子ホール研究は、その基礎物性解明に重きを置いており、準粒子の操作に向けた研究例はほとんどない。

### 2. 研究の目的

トポロジカル量子コンピュータ開発のためには、微小系を用いた準粒子コヒーレント輸送を制御する不可欠である。例えば微小系として、上に凸のポテンシャルを持つ量子アンチドットは AB 効果とクーロン閉塞が共存した系(図 1)であり、強磁場の分数量子ホール状態においてゼロ次元的に粒子を閉じ込めた準粒子を操作するのに適した系である。

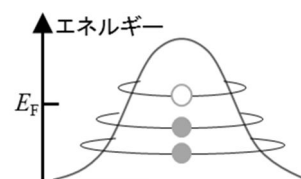


図 1. 量子アンチドットの概念図。閉じ込められた粒子はアンチドットを周回する。

本研究では、量子アンチドットを用いて、分数量子ホール系における準粒子操作に向けた実験を行うことを将来的な目標にして、その礎を築く実験を行うことを目的とした。そのために、(1)量子アンチドットの作製・測定技術の開拓、(2)整数量子ホール系における二重量子アンチドットの作製、(3)分数量子ホール系における量子アンチドットの形成、の三つの研究を行った。

### 3. 研究の方法

GaAs/AlGaAs ヘテロ接合における二次元電子系を試料として用いた。その際、試料に対して、電子線描画法および蒸着法により微細加工を行ってゲート電極を作製した。エアブリッジ構造を有するゲートを使うことで、局所的に電子を空乏化させ量子アンチドットを形成することができる。また、希釈冷凍機を用いて温度 100 mK にて測定を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 量子アンチドットの作製・測定技術の開拓

本実験では、局所的にゲート電圧を印加できるエアブリッジゲートの作製技術を開拓した[図 2(a)および(b)]。負の電圧を印加することで、アンチドットを形成することに成功した。

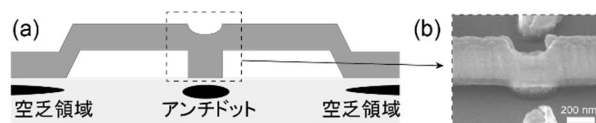


図 2. (a) エアブリッジゲートの概念図 (b) アンチドットを形成するゲート部分の SEM 写真。

また微小電流の測定をするための新たな測定技術の開拓として、コルビノ型電極を利用した量子アンチドットを作製し、量子アンチドットをトンネルする電流を直接測定した[図 3]。バルク部分は絶縁状態で、ゼロ電流からの電流変化を見るため、高抵抗用の電流電圧変換器を使うことで、微小電流を測定することができる。本実験において、pA オーダーのクーロン振動を明瞭に観測し、また、同一試料に対する通常の測定方法との比較から、本手法の優位性を確認した。本成果は Japanese Journal of Applied Physics 誌にて報告した。

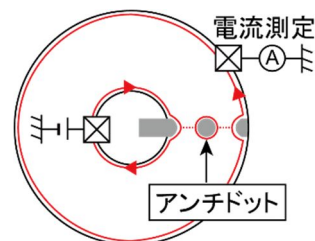


図 3. コルビノ型電極を用いたアンチドット測定。

#### (2) トンネル結合変調可能な二重量子アンチドットの形成

本研究では、二つのエアブリッジゲートを用いて、二つの量子アンチドットを形成した[図 4(a)]。さらに、その間に存在する不純物に起因する局在ポテンシャルをアンチドットとトンネル結合させる。このような

三重量子ビット(二重量子アンチドット+不純物) [図 4(b)]を用いて、真ん中の量子アンチドットのエネルギーをゲート電圧で変えることで、左右の量子アンチドット間の有効的なトンネル結合を変えることができる。

本実験では、このような三重量子ビット(二重量子アンチドット+不純物)の電荷遷移図を伝導度測定で観測した [図 5(a)]。遷移線を明確に示すために、図 5(b)に(a)の結果に対応した電荷遷移図の概略図を示す。二重量子ビット系とは異なり、対角遷移線(実線)が現れており、これは三重量子ビット系の特徴の一つである。また、反交差曲線は、アンチドット間でトンネル結合していることを示している。これらの考察に加えて、マスター方程式を用いて三重量子ビットの電流計算[図 5(c)]は実験結果を再現していることから、トンネル結合した三重量子ビットを実証することに成功した。さらに、この電荷遷移図を解析することにより、二重量子アンチドット間の有効トンネル結合がゲート電圧によって変調できたことを実証した。本成果は Physical Review B 誌にて報告し、国内外の学会にて報告した。

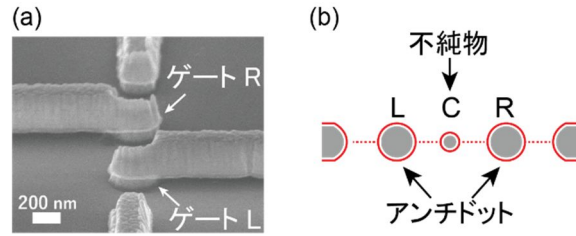


図 4. (a) 二つの量子アンチドットを形成する二つのエアブリッジゲート。(b) 不純物ポテンシャルが二つの量子アンチドットとトンネル結合している三重量子ビットを対象に実験を行った。

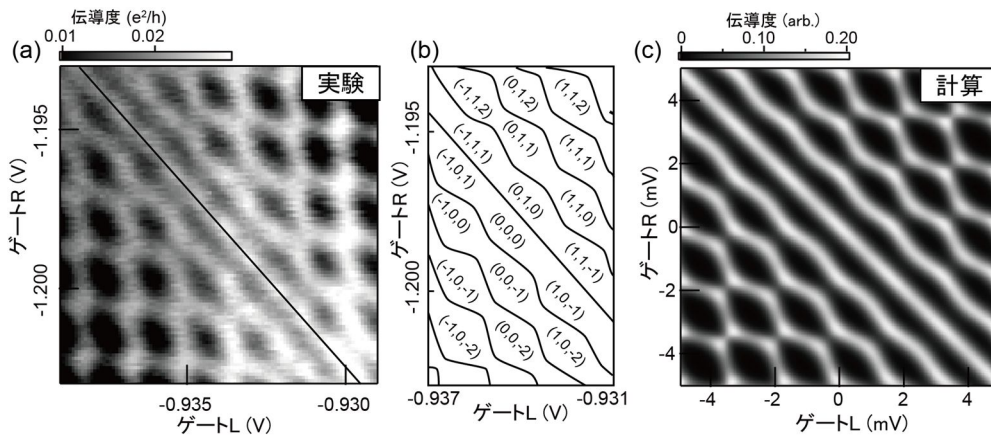


図 5. (a)(b) 本試料において観測した電荷遷移図と概略図。(c) マスター方程式を用いた三重量子ビット系の電流の計算結果。対角の遷移線を境に遷移線の構造が対称的に現れ、実験結果を再現することに成功した。

### (3) 分数量子ホール領域における単一量子アンチドットの形成

分数量子ホール領域用の量子アンチドット試料を用いて実験をした。試料は、分数量子ホール効果が発現するような高い移動度[200 万  $\text{cm}^{-2}/(\text{V}\cdot\text{s})$ ]を持つ二次元電子系基板に、エアブリッジゲートおよびサイドゲートを作製されたものである。図 6 に量子ホール測定の結果を示す。占有率が整数だけでなく、分数  $2/3$  の量子ホール領域を観測した。

この試料を用いて、希釈冷凍機温度 100mK にて電気測定を行った結果、整数領域(占有率 2 および 1)と分数領域(占有率  $2/3$ )の領域で、量子アンチド

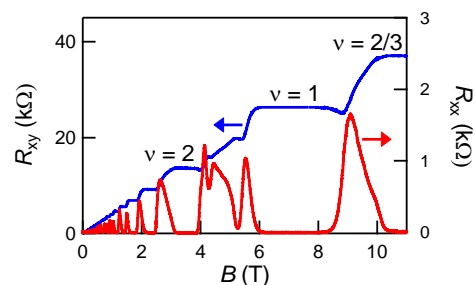


図 6. 高移動度の基板で測定した量子ホール測定。

ットを介したトンネリングに起因する伝導度の測定を行った。その結果、磁場およびエアブリッジゲートに対して伝導度が振動することがわかり、量子アンチドットの形成を実証した。

整数領域と分数領域のクーロン振動の電圧周期を比較したところ、分数領域における電圧周期が整数領域に比べて小さくなることが分かった。この結果は、分数領域の量子アンチドット内に閉じ込められている準粒子が分数電荷を有することを示唆する。また、設計が異なる試料でも同様の実験を行い、再現性を確認した。本研究は、エアブリッジゲートを用いて、初めて分数領域で量子アンチドットを形成することに成功した最初の実験である。また、本実験結果について、物理学会 2024 年春季大会にて口頭発表を行った。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Sakano Rui, Hata Tokuro, Motoyama Kaiji, Teratani Yoshimichi, Tsutsumi Kazuhiko, Oguri Akira, Arakawa Tomonori, Ferrier Meydi, Deblock Richard, Eto Mikio, Kobayashi Kensuke	4. 巻 108
2. 論文標題 Kondo temperature evaluated from linear conductance in magnetic fields	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 205147-205156
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.108.205147	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 Hata Tokuro, Sada Kazuhiro, Uchino Tomoki, Endo Daisuke, Akiho Takafumi, Muraki Koji, Fujisawa Toshimasa	4. 巻 108
2. 論文標題 Tunable tunnel coupling in a double quantum antidot with cotunneling via localized state	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 075432-075440
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.108.075432	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 -
1. 著者名 Hata Tokuro, Teratani Yoshimichi, Arakawa Tomonori, Lee Sanghyun, Ferrier Meydi, Deblock Richard, Sakano Rui, Oguri Akira, Kobayashi Kensuke	4. 巻 12
2. 論文標題 Three-body correlations in nonlinear response of correlated quantum liquid	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 3233
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-021-23467-4	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 Teratani Yoshimichi, Sakano Rui, Hata Tokuro, Arakawa Tomonori, Ferrier Meydi, Kobayashi Kensuke, Oguri Akira	4. 巻 102
2. 論文標題 Field-induced SU(4) to SU(2) Kondo crossover in a half-filling nanotube dot: Spectral and finite-temperature properties	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 165106 - 165128
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.102.165106	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 Hata Tokuro, Uchino Tomoki, Akiho Takafumi, Muraki Koji, Fujisawa Toshimasa	4. 巻 59
2. 論文標題 Sensitive current measurement on a quantum antidot with a Corbino-type electrode	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SGGI03-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab5bb8	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 -

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 秦徳郎, 三谷洋貴, 秋保貴史, 村木康二, 藤澤利正
2. 発表標題 エブリッジゲートを用いた整数および分数量子ホール領域における量子アンチドットのクーロン振動
3. 学会等名 日本物理学会 2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 阪野塁, 秦徳郎, 本山海司, 荒川智紀, Meydi Ferrier, Richard Deblock, 江藤幹雄, 小林研介, 小栗章
2. 発表標題 スピン近藤効果による量子ドットの電流ノイズの磁場応答の理論と実験
3. 学会等名 日本物理学会 2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 佐伯彰彦, 秦徳郎, 本山海司, 寺谷義道, 阪野塁, 荒川智紀, Meydi Ferrier, Richard Deblock, 小林研介, 小栗章
2. 発表標題 カーボンナノチューブ量子ドットの近藤状態における磁場誘起SU(4)-SU(2)クロスオーバーに対する3体的Fermi流体効果II
3. 学会等名 日本物理学会 2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名	R. Sakano, T. Hata, K. Motoyama, Y. Teratani, T. Arakawa, M. Ferrier, R. Deblock, M. Eto, K. Kobayashi, A. Oguri
2. 発表標題	Theory and Experiment of Current Noise through Kondo Dot under Magnetic Fields
3. 学会等名	APS March Meeting 2024 (国際学会)
4. 発表年	2024年

1. 発表者名	T. Hata, K. Sada, T. Uchino, T. Akiho, K. Muraki, and T. Fujisawa
2. 発表標題	Tunable tunnel-coupling in a double quantum antidot with cotunneling via a localized state
3. 学会等名	International Conference on the Physics of Semiconductors 2022 (国際学会)
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	Rui Sakano, Tokuro Hata, Kaiji Motoyama, Yoshimichi Teratani, Yoshihiko Tsutsumi, Meydi Ferrier, Richard Deblock, Mikio Eto, Kensuke Kobayashi, and Akira Oguri
2. 発表標題	Universal Scaling property of Linear Conductance through a Kondo Dot in Magnetic Field and its Application
3. 学会等名	29th International Conference on Low Temperature Physics (国際学会)
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	秦徳郎、佐田和陽、内野智貴、秋保貴史、村木康二、藤澤利正
2. 発表標題	整数量子ホール領域における二重量子アンチドットの形成
3. 学会等名	日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年	2021年

1. 発表者名 秦徳郎、佐田和陽、内野智貴、秋保貴史、村木康二、藤澤利正
2. 発表標題 局在準位を介したコトンネルによる二重量子アンチドットのトンネル結合制御
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tokuro Hata
2. 発表標題 Tunable tunnel-coupling in a double quantum antidot with cotunneling via a localized state
3. 学会等名 The 11th Workshop on Semiconductor/Superconductor Quantum Coherence Effect and Quantum Information
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 秦徳郎
2. 発表標題 量子液体における三体相関の実験的検出
3. 学会等名 Online CMT seminars (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 秦徳郎、内野智貴、秋保貴史、村木康二、藤澤利正
2. 発表標題 コルビノ型電極による量子アンチドットの微小電流測定
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tokuro Hata, Tomoki Uchino, Takafumi Akiho, Koji Muraki, and Toshimasa Fujisawa
2. 発表標題 Sensitive current measurement on a quantum antidot with a Corbino-type electrode
3. 学会等名 2019 International Conference of Solid State Devices and Materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomoki Uchino, Tokuro Hata, Takafumi Akiho, Koji Muraki, and Toshimasa Fujisawa
2. 発表標題 Low-noise current measurement on a quantum antidot in a Corbino disk
3. 学会等名 International Conference on Topological Materials Science 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔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

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