

令和 2 年 7 月 3 日現在

機関番号：92704

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H06009

研究課題名(和文) エニオン統計性を有する分数電荷準粒子の2粒子衝突実験

研究課題名(英文) Collision experiment of fractional quantum Hall quasiparticles

研究代表者

橋坂 昌幸 (Hashisaka, Masayuki)

日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所・量子電子物性研究部・主任研究員

研究者番号：80550649

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 17,600,000円

研究成果の概要(和文)：本課題では、分数量子ホール系の素励起である分数電荷準粒子のエニオン統計性の検証を目指し、分数電荷準粒子の衝突実験を実現することを目的とした。この目的を達成するための基礎技術として、計画通りに【1】量子ホールエッジ状態を伝搬する固有モード(スピン電荷分離現象)の観測、【2】エッジ状態に対するビームスプリッタにおける電荷・スピン状態の観測を行った。また、【3】準粒子衝突実験を実現するためのプラットフォームとして分数・整数量子ホール系の接合に着目し、そこで自発的なエッジ状態内部構造形成、および分数電荷準粒子のアンドレーエフ反射を観測した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

3次元系における粒子はボーズ統計またはフェルミ統計に従うが、2次元系ではこれとは異なるエニオン統計性を持つ準粒子が存在する。エニオン統計性を利用することで、トポロジカル量子計算などの量子情報技術が実現すると考えられている。分数電荷準粒子はエニオン統計性を持つとされる重要な候補である。本課題は、分数電荷準粒子を観測・制御するための基礎技術の確立を目指した点に、学術的意義がある。本課題で得られたスピン電荷分離現象の観測、分数電荷準粒子のアンドレーエフ反射の観測などの結果は、当該分野の今後の進展に繋がる成果であり、将来の準粒子制御技術の基礎となる、社会的意義のある成果と考えている。

研究成果の概要(英文)：This project aims at observing the anyonic statistics of fractional quantum Hall quasiparticles, which are elementary excitations in fractional quantum Hall systems. For this purpose we explored experimental techniques for realizing a collision experiment for fractional quasiparticles. Toward this goal, [1] we studied propagation eigenmodes along quantum Hall edge channels and observed spin-charge separation in co-propagating edge channels and [2] we investigated charge and spin states at a beam splitter formed in a quantum Hall system. In addition, [3] we found that a junction between fractional and integer quantum Hall systems works as a platform for realizing a quasiparticles' collision experiment. We observed spontaneous edge reconstruction and Andreev reflection of fractional quasiparticles at the junction.

研究分野：半導体物性

キーワード：メゾスコピック系 量子ホール効果

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

1980年の発見以来、量子ホール効果は物性物理学における最重要テーマの1つとして活発に研究されてきた。最近、トポロジという数学的な概念を用いて広範な物質・現象にまたがる普遍性を調べる「トポロジカル量子物理学」と呼ぶべき分野が発展し、代表的なトポロジカル量子現象の1つとして、量子ホール効果があらためて大きな注目を集めている。中でも分数量子ホール(FQH)効果は、電子相関に起因する多様な物性の研究舞台として重要視される。FQH系における準粒子のエニオン統計性は、量子多体効果の最も顕著な表れとして学問的に非常に重要であるのみならず、トポロジカル量子計算など次世代の情報技術の基礎となる現象として、応用面からも多くの注目を集めている。

FQH系の準粒子のエニオン統計性は理論的に予言されて久しいが、一方で実験的な確実な証拠は得られていなかった。エニオン統計性の検証のため、量子ホール系のエッジ状態を利用した様々な実験が提案されており、準粒子の衝突実験もその有力候補の一つであった。この実験を実現するために、エッジ状態を伝搬する信号の固有モードの解明や、準粒子を衝突させるためのビームスプリッタの動作検証、さらにはエニオン統計性を評価するための電流相関測定法など、多くの基礎技術が研究途上であった。これらの基礎技術の一つずつ確立していくことで、初めて準粒子衝突実験を実現させることができるとして、世界中で活発な研究が繰り広げられていた。

2. 研究の目的

上記の背景から、本課題「エニオン統計性を有する分数電荷準粒子の2粒子衝突実験」では、まず量子ホールエッジ状態における電子輸送の精密制御技術の確立を目指した。この研究過程における具体的課題として「【1】1次元エッジ状態上の代表的な電子ダイナミクスであるスピン電荷分離現象の観測」を設定した。また、大きな量子ホール系中に占有率の異なる別の量子ホール系を局所的に形成し、これを精密に制御することでビームスプリッタとして動作させる新手法の開発を目指した。この研究過程における具体的課題として、「【2】局所量子ホール系における非平衡バイアス下での電荷・スピン状態観測」を設定した。上記の具体的課題の解決を通して、分数電荷準粒子の2粒子衝突実験を実現させるための基礎技術の確立を目指す計画とした。

3. 研究の方法

GaAs/AlGaAsヘテロ構造に対して微細加工を施すことにより、2次元電子系中にナノスケールの量子構造を形成し、その電気伝導特性を極低温・高磁場下で評価することで、量子ホールエッジ状態および分数電荷準粒子の観測を行った。GHz帯域の高速パルス技術や電流ゆらぎ測定技術などの独自技術を駆使することにより、量子ホール系の輸送現象について、通常の電気伝導度測定では得られない深い知見を得た。

4. 研究成果

当初に計画していた【1】【2】に加え、当初の計画になかった2つの発展的な研究【3】【4】を行い、以下の成果を得た。

【1】スピン電荷分離現象の観測

量子ホール系試料端には、エッジチャンネルと呼ばれる1次元1方向性の伝導チャンネルが生じる。ランダウ準位占有率2の量子ホール系では、スピニアップ、およびダウンの電子を運ぶ2本の並走エッジチャンネルが生じる。この並走チャンネルを伝搬するプラズモンは、チャンネルの1次元1方向伝導特性、およびチャンネル内・チャンネル間クーロン相互作用により、朝永ラッティンジャー液体のダイナミクスに従うと考えられる。我々は、エッジチャンネルにおける伝搬の固有モードを調べる目的で、代表的な朝永ラッティンジャー液体的ふるまいであるスピン電荷分離現象の観測を行った。

本研究では、高速パルスによる電荷波束の伝導制御技術、およびスピフィルターを用いたスピン弁別技術を組み合わせることで、スピン自由度を分解して電荷波形を高速測定できる手法を確立した。この手法により、並走チャンネルを伝搬する電荷波束、およびスピン波束をそれぞれ測定できるようになった。実験では、図1に示すように、並走チャンネルにスピニアップ、またはダウンに偏極した電荷波束を注入し、一定距離伝搬後にスピニアップ電荷の波束を測定した。得られた波形は電荷波束、およびスピン波束のそれぞれに対応するピークまたはディップを示した。スピン波束に対応する信号は、入力したスピンの向きに応じて符号が逆転しており、スピンの向きに応じた信号が得られていることが分かる。この結果は、並走チャンネルにおいて電荷とスピンの時間・空間的に分離することをはっきりと示しており、1次元電子系におけるスピン電荷分離現象を直接観測した世界初の実験結果である。なお、これらの波束が一定距離を伝搬するためにかかる時間を測定することにより、各波束の伝搬速度を測定することもできる。波形データの詳細な解析により、並走エッジチャンネルの朝永ラッティンジャー液体的性質を特徴づける全ての相互作用パラメータを特定することにも成功した。これらの成果は、スピン電荷分離の観測を報告した論文[Nature Physics 2017]、およびエッジチャンネルの朝永ラッティンジャー液体性を議論した論文[Reviews in Physics 2018]にまとめられている。

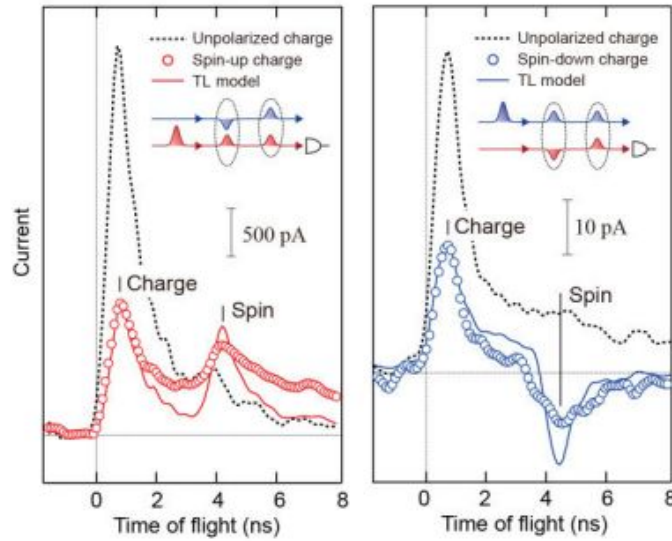


図1 量子ホールエッジチャンネルにおけるスピン電荷分離現象の観測結果

【2】局所量子ホール系における非平衡バイアス下での電荷・スピン状態観測

2次元電子系の電子密度を局部的に制御することにより、占有率の異なる量子ホール状態を同一試料内に併存させることができる。占有率2の量子ホール系内に微小な占有率1の局所量子ホール状態を形成したとき、この局所状態は電流に対してスピントラップとして振る舞う。一方で、局所状態に注入する電流を増やして非平衡にすると、局所状態内部の電荷・スピン状態が変化し、理想的なスピントラップとしての動作が得られなくなることが知られている。本研究では、非平衡バイアス下における局所量子ホール状態のスピントラップ、あるいはビームスプリッターとしての動作検証を行うために、局所状態内部の電荷・スピン状態を、電流ゆらぎ測定、および抵抗検出核磁気共鳴測定によって調べた。

伝導度、ショットノイズ、および核磁気共鳴周波数の測定結果を組み合わせることにより、バイアス下におけるスピン偏極度の低下が、スピンドアウン電子のトンネル伝導によって引き起こされることが分かった(図2)。さらにバイアスを大きくすると、局所領域におけるスピン偏極度のさらなる低下によって交換相互作用エネルギーが抑制され、スピン偏極状態がブレイクダウンする様子が明らかになった。ゲート電圧などのパラメータによって局所領域の形状を調整することにより、トンネル伝導が生じるバイアスやスピン偏極状態が壊れるバイアスの値はある程度制御が可能であることも明らかになった(図2)。以上の結果は論文にまとめられている[Phys. Rev. B 2020]。ここで得られた知見は異なる量子ホール系を組み合わせたハイブリッドデバイスを構成する際に重要になるものと考えている。

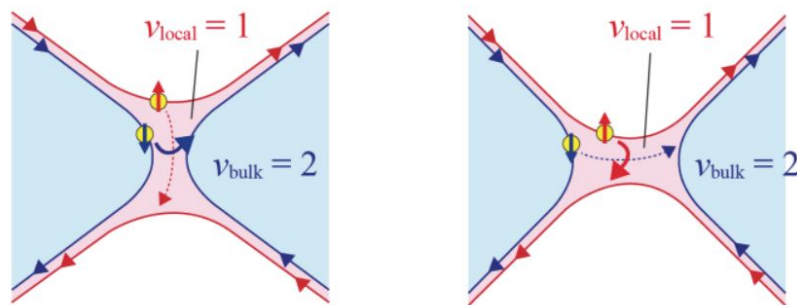


図2 占有率2量子ホール系内に形成された局所占有率1量子ホール系におけるスピン依存伝導

【3】分数・整数量子ホール微小接合

分数・整数量子ホール系の接合では、接合部における両者の性質の差を補償するように、バルク量子ホール系とは異なる現象が生じる。分数量子ホール系内では量子相関効果によってエネルギーギャップが生じているが、整数量子ホール系とつながる接合部では、電子相関の影響によって自発的にエッジ状態の構造が再構成されるという現象が起こる(図3)。このエッジ状

態再構成を電気伝導度測定、および電流ゆらぎ測定によって評価し、分数(1/3)・整数(1)接合に生じる電子状態を明らかにした(国際会議 ICAMD 招待講演、ほか)。

また、この分数・整数量子ホール微小接合に分数側から分数電荷準粒子を入射すると、整数側で電子が励起され、分数側に分数電荷準正孔が反射される。このアンドレーエフ反射は1990年代より理論的に研究が行われてきたが、本課題で初めて実験的に観察することに成功した。

これらの実験結果について、それぞれ論文を執筆中である。

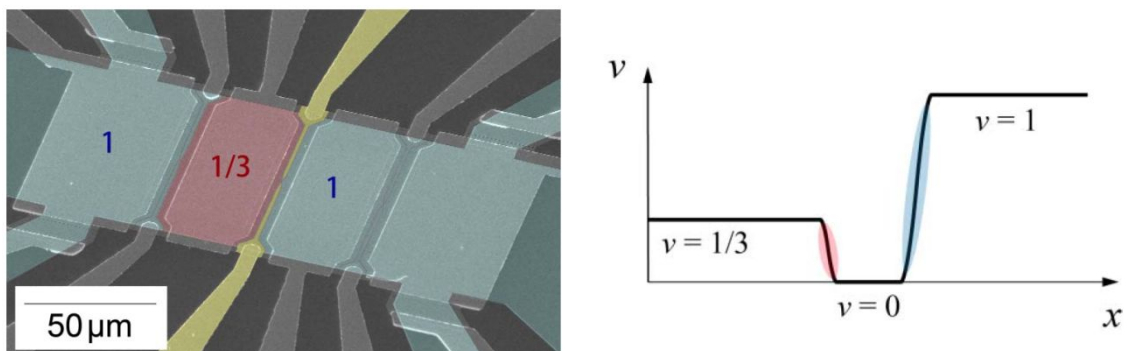


図3(左)分数・整数量子ホール接合試料の電子顕微鏡写真

(右)分数(1/3)・整数(1)接合におけるエッジ状態の再構成

【4】電流ゆらぎ、および電流間の相関測定系の高性能化

量子ホール系を流れる電流を担う分数電荷準粒子の性質を実験的にとらえるには、電流のゆらぎや、電流間の相関を測定する手法が有効であることが知られている。一般に電流ゆらぎや相関信号は非常に小さいため、高精度の測定が必要であり、通常は長時間のデータ積算によって高い精度を得ることが行われる。

世界の一流の研究グループに負けない競争力を維持するには、測定系の精度を高め、データ積算時間を短くして、スピーディに実験を遂行していくことが鍵になる。そこで本課題では、これらの測定のための専用の GaAs 高電子移動度トランジスタを自作し、これを用いた低温増幅器を作製することで、高性能の測定系を確立した。これにより、電流ゆらぎ測定では従来の約10倍、電流間の相関測定系では約50倍の測定効率を実現した。

これらの実験結果について、それぞれ論文を執筆中である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hashisaka Masayuki, Fujisawa Toshimasa	4. 巻 3
2. 論文標題 Tomonaga-Luttinger-liquid nature of edge excitations in integer quantum Hall edge channels	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Reviews in Physics	6. 最初と最後の頁 32～43
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.revip.2018.07.001	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 橋坂昌幸, 藤澤利正	4. 巻 72
2. 論文標題 朝永・ラッティンジャー液体における電荷・スピン密度波束の観測実験	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本物理学会誌	6. 最初と最後の頁 805-809
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 M. Hashisaka, N. Hiyama, T. Akiho, K. Muraki, and T. Fujisawa	4. 巻 -
2. 論文標題 Waveform measurement of charge- and spin-density wavepackets in a chiral Tomonaga-Luttinger liquid	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nature Physics	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/nphys4062	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 T. Ota, M. Hashisaka, K. Muraki, and T. Fujisawa	4. 巻 29
2. 論文標題 Negative and positive cross-correlations of current noises in quantum Hall edge channels at bulk filling factor $\nu = 1$	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Condensed Matter	6. 最初と最後の頁 225302
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-648X/aa6cc0	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29件(うち招待講演 13件/うち国際学会 16件)

1. 発表者名 Masayuki Hashisaka, Koji Muraki, Toshimasa Fujisawa
2. 発表標題 Two-step breakdown of a local $\nu = 1$ quantum Hall state
3. 学会等名 The 7th International Workshop on Emergent Phenomena in Quantum Hall Systems (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masayuki Hashisaka, Takafumi Akiho, Satoshi Sasaki, Koji Muraki
2. 発表標題 Charge equilibration between counter-propagating $\nu = 1/3$ and $\nu = 1$ quantum Hall edge channels
3. 学会等名 The 11th International Conference on Advanced Materials and Devices (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Hashisaka, K. Muraki, and T. Fujisawa
2. 発表標題 Tomonaga-Luttinger-liquid nature of quantum Hall edge excitations
3. 学会等名 China-Japan International Workshop on Quantum Technologies (QTech2018) (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Hashisaka, K. Muraki, and T. Fujisawa
2. 発表標題 Two-step breakdown of a local $\nu = 1$ quantum Hall state
3. 学会等名 The 7th International Workshop on Emergent Phenomena in Quantum Hall Systems (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masayuki Hashisaka, Koji Muraki, and Toshimasa Fujisawa
2. 発表標題 Fractional quasiparticles in the breakdown regime of a microscopic integer quantum Hall system
3. 学会等名 Nanophysics, from fundamental to applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Hashisaka
2. 発表標題 Fractional quasiparticle tunneling through a local quantum Hall system
3. 学会等名 Energy Material Nanotechnology (EMN) meeting on Quantum (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 M. Hashisaka, N. Hiyama, T. Akiho, K. Muraki, T. Fujisawa
2. 発表標題 Time-domain observation of spin- and charge-wave packet separation in chiral one-dimensional channels
3. 学会等名 Energy Material Nanotechnology (EMN) meeting on Optoelectronics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 M. Hashisaka
2. 発表標題 Fractional quasiparticles in a local quantum Hall system
3. 学会等名 Collaborative Conference on 3D and Materials Research (CC3DMR) 2016 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 M. Hashisaka, N. Hiyama, T. Akiho, K. Muraki, T. Fujisawa
2. 発表標題 Time-domain observation of spin-charge separation in copropagating quantum Hall edge channels
3. 学会等名 The 22nd International Conference on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics (HMF-22) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 M. Hashisaka, K. Muraki, and T. Fujisawa
2. 発表標題 Fractional quasiparticles in the breakdown regime of a microscopic integer quantum Hall system
3. 学会等名 Nanophysics, from fundamental to applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

所属グループホームページ http://www.brl.ntt.co.jp/group/butsuryo-g/index-j.html 本人ホームページ http://www.brl.ntt.co.jp/people/hashisaka.masayuki/index.html
--

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
研究協力者	藤澤 利正 (Fujisawa Toshimasa)		

6. 研究組織（つづき）

	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	村木 康二 (Muraki Koji)		
研究協力者	都倉 康弘 (Tokura Yasuhiro)		