

研究終了報告書

「準粒子量子光学の確立に向けた量子ホール回路技術」

研究期間：2017年10月～2021年3月

研究者：橋坂 昌幸

1. 研究のねらい

分数量子ホール準粒子は、フェルミオン(電子など)やボソン(光子など)と異なるエニオン量子統計性を持つ。中でも Non-abelian エニオンと呼ばれる準粒子は、2つの準粒子の交換操作を波動関数の位相変化によって記述できず、適切なユニタリ変換によって記述する必要がある、という特異な性質をもつ。このような交換操作は組紐操作(ブレーディング)と呼ばれ、エラー耐性の高いトポジカル量子計算へ利用できると期待されている。ところがさきがけ研究開始当初は、量子ホール系に限らずあらゆる物質・材料系において、また Non-abelian、Abelian 問わず、エニオン統計性が実験的に確認された例はなかった。そこで本研究では、まずは Non-abelian エニオンにこだわらず、Abelian エニオン統計性の確認を目標に掲げた。例えば代表的な分数量子ホール状態である占有率 $\nu = 1/3$ の系では、準粒子の交換によって $\pi/3$ の位相を獲得する Abelian エニオンが期待できる。

この目標を達成するため、具体的な第一の研究目的として、準粒子を制御するためのプラットフォームである「エッジ状態を利用した量子ホール回路技術の確立」を設定した。また第二の研究目的として、この技術を利用して実際に「エニオン統計性を検証する」ことを設定した。

第一目的の達成のためには、量子ホール回路の主要な構成要素である導波路を適切に設計する必要がある。これには分数量子ホールエッジ状態の輸送特性の解明が必須である。分数量子ホール系の試料端では、試料内部における量子相関の影響により非自明な構造と電子ダイナミクスが現れるため、その輸送特性は十分に理解されていない。これを解明し、導波路設計の基本方針を確立することが重要である。これを達成すれば、おのずと第二目的達成のための指針が立つはずであり、また将来のエニオンの量子ホール回路によるトポジカル量子ビットの実現にとって重要な基礎となると期待して、研究を行った。

また上記のメインテーマと並行して、サブテーマとして「電流ゆらぎ測定の高精度化」にも取り組むことにした。エニオンの検証のためには極めて高精度の電流ゆらぎ測定技術が必須であることから、ライバルとなる海外研究グループに対して自身の競争力を強化し、長期的なプレゼンスを高める目的で行った。

2. 研究成果

(1) 概要

第一の研究目的である「量子ホール回路設計技術の確立」のためには、分数量子ホールエッジ状態の輸送特性の解明が必須である。分数量子ホール系の試料端では、試料内部における量子相関の影響により、非自明な構造と電子ダイナミクスが現れる。これまでに占有率 $2/3$ 量子ホール系など、いくつかの分数量子ホール系について理論・実験の双方から研究が行われ、エッジ状態の輸送特性がその固有伝播モードによって決定づけられることが分かってきた。ところが、多くの分数量子ホール系について固有伝播モード形成の微視的

メカニズムが未解明であり、特にモード形成の素過程にあたるエッジ状態間の電荷散乱の観測が大きな課題として残されていた。本研究では、従来の代表的な研究対象である占有率 $2/3$ 量子ホールエッジ状態を直接調べるのではなく、それと電子正孔対称な占有率 $1/3$ と 1 の量子ホール系の界面に注目することで、固有伝播モード形成のメカニズム解明が可能であることを着想した。この $1/3-1$ 量子ホール界面について実験を行い、電荷散乱素過程が分数電荷準粒子のアンドレーエフ反射過程であることを突き止めた。さらに、量子ホール系のカイラリティによってアンドレーエフ反射が連続的に起こり、結果的に固有伝播モード形成につながるシナリオを確認した。

以上の成果は量子ホール回路の導波路設計に基本方針を与えるものであり、これによって本研究の第一目的は達成されたと考えている。これを踏まえて、第二目的の「エニオン統計性を検証する」ための干渉実験のデザインを手掛けている。時間的な制約により、残念ながらさがけ研究期間内に第二目的の実験に手を付けることができなかったが、近日中に実験を開始することを計画している。なお本研究の成果は、トポロジカルな性質と量子多体効果を併せ持つ系のエッジ状態を解明した結果であり、学術的に高い価値を持つ物性物理学の重要な成果であると考えている。

サブテーマの「電流ゆらぎ測定系の高精度化」については、低雑音の高電子移動度トランジスタを自作して、これを精密信号増幅器に組み込むことで、実際に世界最高レベルの高精度電流ゆらぎ測定系を実現した。これについては当初の狙い通り目的が達成された。

(2) 詳細

研究テーマA「量子ホール回路の導波路技術」

占有率 $2/3$ 分数量子ホール系は電子相関効果によるエッジ状態の構造変化が起こる代表例であり、この系のエッジ状態を解明することが、他の様々な占有率の分数エッジ状態の理解につながる。本研究では、電子正孔対称性によって占有率 $2/3$ 量子ホール系と同一とみなせる、占有率 $1/3$ と 1 の量子ホール系界面を調べた。この系には、試料端に自然に生じる占有率 $2/3$ エッジ状態を調べる場合と比較して、エッジ構造に極めて敏感な測定をデザインできるという利点がある。

図1は占有率 $1/3-1$ 量子ホール接合試料の電子顕微鏡写真である。ゲート電圧によって2次元電子系内の電子密度を部分的に変化させ、占有率 $1/3$ 領域と 1 領域を同一試料内で共存させる。これらの領域を微小領域で接触させて、分数-整数量子ホール接合を作製した。この接合の電気伝導度を測定することにより、分数-整数量子ホール界面における電子状態を詳細に評価することができる。

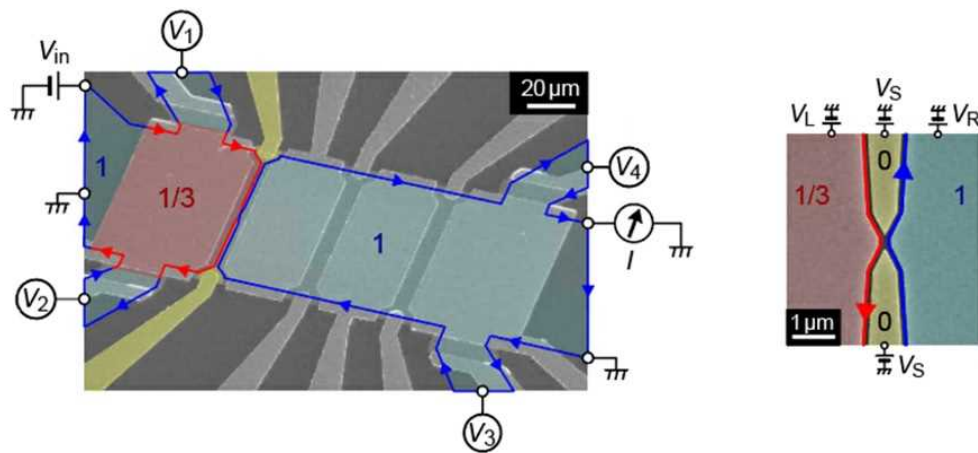


図1(左)試料の電子顕微鏡写真。青に着色された領域は占有率1の整数量子ホール系、赤色の領域が占有率1/3の分数量子ホール系を表す。黄色のスプリットゲートに負電圧を印加し、微小な分数-整数量子ホール接合を形成する。矢印はエッジ状態のカイラリティを表す。(右)分数-整数量子ホール接合の拡大図。

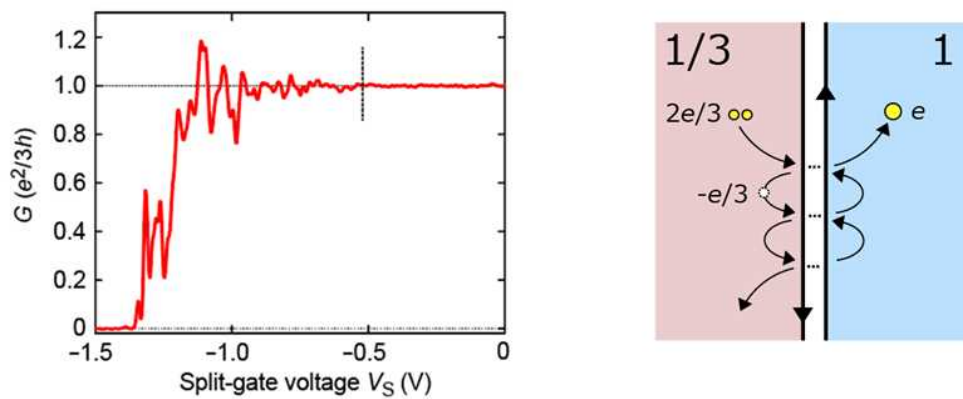


図2(左)1/3-1量子ホール接合の伝導度のゲート電圧依存性。(右)1/3-1接合における複数回の準粒子アンドレーエフ反射を古典的な描像で示した図。

図2(左)は温度 9 mK、磁場 9 T における 1/3-1 接合の電気伝導度 G の測定結果である。負のスプリットゲート電圧 V_S を印加して微小接合が形成されると ($V_S < -0.55$ V)、伝導度が $G = e^2/3h$ の周りで振動する。ここで、占有率 1/3 分数量子ホール系 (伝導度 $G = e^2/3h$) を介した伝導を測定しているにもかかわらず、 G が $e^2/3h$ を超える場合があるという事実が極めて非自明であり、重要である。これは、1/3 領域から入射した 2 つの $e/3$ 分数電荷が、界面でのアンドレーエフ反射によって電子 (電荷 e) を占有率 1 領域に励起し、1 つの $-e/3$ 分数電荷準粒子を反射したためと解釈できる。これは超伝導以外の物質でアンドレーエフ反射を観測した世界初の成果である [論文 1 件 (原著論文 1)、国際学会招待講演 1 件 (その他の研究成果 7)、国内学会発表 1 件]。

伝導度の振動は、1/3-1 界面における複数回のアンドレーエフ反射の結果と解釈できる (図 2 右)。量子ホール系はカイラリティを持つトポロジカル系であるため、アンドレーエフ反射

で励起された電子および準粒子は再び界面に入射し、同様の過程を複数回起こす。この多重散乱プロセス、およびそこでの量子干渉効果により、伝導度はゲート電圧に対して振動する。これは分数量子ホール系に限らず、トポロジカルな性質と量子多体効果を併せ持つ系の試料端において、より一般的に起こりうる普遍的な現象と考えられる。この複数回のアンドレーエフ反射によって対向するエッジ状態が混ざり合うことにより、分数量子ホールエッジ状態を特徴づける固有伝播モードが形成される。実験では、さらに電流ゆらぎ測定によって固有伝播モード(熱輸送モード)を検出し、アンドレーエフ反射が分数エッジ状態の固有伝播モード形成の素過程であることを確認した[論文 1 件準備中、国際学会招待講演 1 件(その他の研究成果5)、国内学会発表 1 件]。

以上の結果は、量子ホール回路の導波路設計技術を確立したことと同等の意味を持つ。本成果の知見を踏まえ、適切な占有率の量子ホール系の組み合わせによって固有伝播モードを設計することで、固体素子中に目的に応じたエニオン導波路を準備できると考えている。これをもって、本研究の第一目的「エッジ状態を利用した量子ホール回路技術の確立」が達成されたものとみなす。第二目的の「エニオン統計性の検証」についても、今回得られた知見を基に近日中に挑戦する予定である。

研究テーマB「電流ゆらぎ測定系の精度向上(サブテーマ)」

半導体メソスコピック系を対象とする、高精度の電流ゆらぎ測定系の作製に取り組んだ。分数量子ホールエニオンを検出する為に、電流ゆらぎ測定は必須の技術である。その精度は測定に用いる電圧増幅器のノイズフロアによって決定され、世界中で低ノイズ増幅器の開発競争が行われている。本研究では、自身で増幅器の電気回路を設計し、これに最適な高電子移動度トランジスタ(HEMT)を自作することで、市販の HEMT を使用する場合と比べてノイズ特性を大幅に改善した低温増幅器を完成させた[論文 1 件(原著論文2)、国内学会発表 1 件]。さらに、この自作 HEMT を用いた低ノイズのトランスインピーダンス増幅器を作製した。この増幅器を用いると複数の電流出力間での時間相関を正確に測定することができる(論文2件準備中、国内学会発表2件)。当該分野の標準的な測定系と比較して、圧倒的に精度の高い電流ゆらぎ相関の評価が実現できることから、今後の研究において強力な武器になると期待している。以上の取り組みにより、サブテーマとして掲げた「電流ゆらぎ測定系の高精度化」を達成した。

3. 今後の展開

最近、占有率 1/3 分数量子ホール系の準粒子について、そのエニオン統計性を検証したとする実験結果が海外の複数グループから発表された。これは量子ホール準粒子を用いたトポロジカル量子計算を目指す研究の幕開けを告げるものであり、この分野が今後急速に発展することを予感させる。今後、この分野の研究の軸足は、エニオン統計性の観測だけでなく、エニオンの制御・操作に移っていくと考えられる。この観点では、量子ホール回路は極めて有望な実験のプラットフォームになると考えており、本さきがけ研究の成果はこれからの研究において大きなアドバンテージになると期待している。

また、これまでに確認されたエニオンは占有率 1/3 分数量子ホール系の Abelian エニオンのみであり、他の占有率における準粒子の評価も必要になる。特に、トポロジカル量子計算の実現に

は Non-abelian エニオンが必要であり、高品質の試料で発現する占有率 $5/2$ などの分数量子ホール準粒子がその候補であることから、これらの占有率における実験を構築することが必須となる。Non-abelian 統計の検証にはこれまでの報告とは異なるアプローチの研究が必要であると予想されるので、本さがけ研究の量子ホール回路の考え方を活かした新規実験について考察を進める。

今後は上記の「エニオンの制御・操作」、「Non-abelian エニオンの検証」を主眼に研究を展開し、量子ホール準粒子を用いて、世界にさがけてトポロジカル量子計算の最初の1量子ビットの作製に挑戦したいと考えている。

4. 自己評価

本さがけ研究では、メインテーマとして「量子ホール回路設計技術の確立」および「準粒子のエニオン統計性の検証」を目的に掲げた。第一の目的については、当初見込み以上に優れた成果が得られ、十分に達成できたと考えている。第二の目的については、研究期間内に海外のグループによって達成されたとの報告があり、先を越された形になった。サブテーマである「電流ゆらぎ測定の高精度化」については、当初の目論見通り優れた測定系の作製に成功した。全体としては、目論み通りに行かなかった部分はあるものの、当初計画以上の成果が得られた部分もあり、期待と同等レベルの成果が得られたと考えている。

本さがけ研究の研究費は主に実験装置などの物品購入費として使用させていただいた。また研究体制については、所属機関の関係者の支援を受けつつ、内外の研究者と連携して実施した。特に東北大学、フランス CNRS の理論研究グループと共同研究を行い、協力関係を確立できたことは大きな財産となった。今後の課題として、国内外の有力研究グループと連携を深め、当該分野の国際的な研究体制の中でプレゼンスを発揮していきたいと考えている。

本研究では、トポロジカルな性質と量子多体効果を併せ持つ2次元系のエッジ状態を解明した。この成果は量子ホール系の研究分野のみならず、広く物性物理学分野において極めて高い学術的価値を持ち、関連分野において様々な新しい展開を誘発する波及効果の大きなものと考えている。特に、超伝導体以外の系で初めてアンドレーエフ反射を実証した実験は、高いインパクトを持つ成果である。広い視点で見れば、本研究はトポロジカル物質科学を情報技術研究へつなげる流れの中に位置づけられる。現段階では社会・経済への直接的な波及効果は見込めないが、現在のトポロジカル物質科学の急速な進展を鑑みて、本研究の成果が将来的に社会・経済に対する意味のある貢献となることを信じている。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 3件

1. M. Hashisaka, K. Muraki, T. Fujisawa, "Two-step breakdown of a local $\nu = 1$ quantum Hall state". *Physical Review B* **101**, 041303(R)-1-5 (2020).

占有率2の整数量子ホール系中に局所的に形成された占有率1の整数量子ホール系について、有限バイアス下における量子ホールブレークダウン現象を調べた。電子のスピンの偏極度をショットノイズ測定、および抵抗検出 NMR 測定で詳細に調べることにより、局所量子ホー

ル系における非平衡電荷ダイナミクスが明らかになった。これにより、ナノスケール量子ホール系の非線形素子としての振る舞いが明らかになった。

2. S. Lee, M. Hashisaka, T. Akiho, K. Kobayashi, K. Muraki, “Cryogenic GaAs high-electron-mobility-transistor amplifier for current noise measurements”. Review of Scientific Instruments **92**, 023910-1-9 (2021).

電流ゆらぎ測定の精度は測定系のノイズフロアと測定に費やすデータ蓄積時間によって決まり、ノイズフロアの小さな測定系を用いることで、短時間で高精度のデータを取得できるようになる。超高精度の電流ゆらぎ測定系を構築するために、GaAs ヘテロ構造を持つ高易動度トランジスタを自作し、これを用いた低温専用の電圧アンプを作製した。市販のトランジスタを用いる場合と比較してノイズフロアを約 1/3 に低減し、これによって約 9 倍の速度で所望の測定精度を得ることができる、高効率の電流ゆらぎ測定系を構築した。

3. M. Hashisaka, T. Jonckheere, T. Akiho, S. Sasaki, J. Rech, T. Martin, K. Muraki, “Andreev reflection of fractional quantum Hall quasiparticles”. Nature Communications **12**, 2794-1-7 (2021).

占有率 1/3 の分数量子ホール系と占有率 1 の整数量子ホール系の界面において、超伝導-状伝導接合におけるアンドレーエフ反射と類似の分数電荷準粒子のアンドレーエフ反射型プロセスを起こすことを観測した。さらに、量子ホール系のトポロジカルな性質により、界面において自然に複数回散乱が生じ、多重アンドレーエフ反射が起こることを観測した。これは 1990 年代に盛んに研究された理論予測を実験で初めてとらえた成果である。

(2) 特許出願

研究期間累積件数: 0 件 (特許公開前のものも含む)

(3) その他の成果 (主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. 文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム H29 年度秀でた利用成果 優秀賞 受賞
2. 平成 30 年度 科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞
3. レビュー論文

M. Hashisaka and T. Fujisawa, “Tomonaga-Luttinger-Liquid Nature of Edge Excitations in Integer Quantum Hall Edge Channels”. Reviews in Physics, **3**, 32 (2018).

4. レビュー論文

K. Kobayashi and M. Hashisaka, “Shot noise in mesoscopic systems: from single particles to quantum liquids”. Journal of the Physical Society of Japan, invited review papers, accepted.

5. 招待講演

M. Hashisaka, T. Akiho, S. Sasaki, and K. Muraki, “Charge equilibration between counter-propagating $\nu = 1/3$ and $\nu = 1$ quantum Hall edge channels”. The 11th International Conference on Advanced Materials and Devices (ICAMD 2019), Jeju, Korea (Dec. 10-13, 2019).

6. 招待講演

M. Hashisaka, K. Muraki, and T. Fujisawa, “Two-step breakdown of a local $\nu = 1$ quantum Hall state”. The 7th International Workshop on Emergent Phenomena in Quantum Hall Systems (EPQHS-7), Beijing, China (June 3– June 5, 2019).

7. 招待講演

M. Hashisaka, “Andreev reflection of fractional quantum Hall quasiparticles”. Transport and Spectroscopy of 2D Systems (TS2DS-2021), Moscow, Russia (online) (August 2– August 6, 2021).