

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 27 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25800176

研究課題名(和文) 分数量子ホール系における分数統計の実験的検証

研究課題名(英文) Fractional statistics of Laughlin quasiparticles in a fractional quantum Hall system

研究代表者

橋坂 昌幸 (Hashisaka, Masayuki)

東京工業大学・理工学研究科・助教

研究者番号：80550649

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：分数量子ホール系における分数統計の実験的検証に向けて、極低温下に置かれた固体素子中における、高精度電流ゆらぎ相互相関測定法の開発に成功した。

この手法を用いて、整数量子ホール系中に準備された局所的な分数量子ホール系における、分数電荷準粒子の生成過程を検出することに成功した。

また、整数量子ホール系におけるトンネル準粒子の再分配実験を試み、電子のエネルギー散逸を電流ゆらぎ相互相関測定によって検出する手法の開発に成功した。

研究成果の概要(英文)：We succeeded in developing a high-precision noise cross-correlation measurement system, which is applicable for the shot-noise measurements on solid-state devices placed at very low temperatures. Creation of fractional quasiparticles in a local fractional quantum Hall system embedded in an integer quantum Hall system is detected using the cross-correlation technique. Moreover, energy dissipation in a quantum Hall edge state is measured using the technique in a re-partitioning experiment performed on tunneling quasiparticles. These result encourage us to investigate the fractional statistics of Laughlin quasiparticles in fractional quantum Hall systems.

研究分野：量子輸送現象

キーワード：量子ホール効果 分数電荷準粒子 朝永ラッティンジャー液体 電流ゆらぎ相関測定

1. 研究開始当初の背景

分数量子ホール系における素励起は、素電荷 e よりも小さな電荷を有する分数電荷準粒子である。分数電荷準粒子は、ボソンやフェルミオンとは異なる、分数統計と呼ばれる量子統計性を有すると理論的に予想されている。この分数統計性は、量子多体系における特筆的な予想の一つであるにもかかわらず、未だ決定的な実験的証拠は提出されていない。分数統計性の実証に向けて、世界中で活発な研究が行われている。

粒子の量子統計性を評価する手法として、2 粒子衝突実験がある。衝突後、2 つの出力に現れる信号間の相関を調べることで、粒子の交換によって獲得される位相因子を評価できる。分数量子ホール系において分数電荷準粒子の衝突実験を行うことは必ずしも簡単ではないが、電流をビームスプリッタで分配する際に生じる非平衡電流ゆらぎに着目し、2 出力における電流ゆらぎの相互相関を測定することで、2 粒子衝突と同等の実験が実現され、分数電荷準粒子間の相関を検出できると考えられている。

申請者らの研究グループでは、分数電荷準粒子の量子統計性の実証を目指し、電流ゆらぎ相互相関測定法の開発に着手していた。研究開始段階では、温度 1.5 K 程度の低温環境における予備実験において、この測定法が実現可能であることを示していた。この手法を極低温環境 (100 mK 以下) の測定系に適用することで、分数統計検証実験の実現が期待できる状況であった。

2. 研究の目的

分数電荷準粒子の量子統計性の検証を最終目標として掲げ、この目標に向けて以下の課題を目的として設定した。

- (1) 電流ゆらぎ相互相関測定系を希釈冷凍機に実装し、100 mK 以下の極低温環境における実験系を確立すること。
- (2) 電流ゆらぎ相互相関測定により、分数量子ホール系における素励起の分数電荷を観測すること。
- (3) 分数電荷準粒子の量子統計性を検証するための実験セットアップを確立し、ランダウ準位占有率 $\nu = 1/3$ の系において、有効電荷 $e^* = e/3$ の分数電荷準粒子の量子統計性を検証すること。

3. 研究の方法

第一に、極低温環境における測定技術を確立するため、1.5 K の温度環境で開発された電流ゆらぎ測定系を希釈冷凍機に実装した。この測定系を用いて、量子ポイントコンタクト (QPC: ビームスプリッタとして使用) で発生する非平衡電流ゆらぎ (ショット雑音) の測定を行い、理論と比較した。この比較によって、開発された測定系の定量性 (精度・確度) や安定性を評価した。

第二に、開発された手法を分数量子ホール

系における測定に適用した。量子ホール系において、電流はエッジチャンネルと呼ばれる試料端の 1 次元伝導チャンネルによって運ばれる。エッジチャンネル上に QPC を準備し、これによって入力電流を透過・反射電流に分配すると、発生する非平衡電流ゆらぎは QPC 近傍における素励起の電荷の大きさに比例する。このことを利用して、電流ゆらぎ測定によって局所的な分数量子ホール系における分数電荷準粒子の有効電荷の大きさを評価した [図 1(a)]。

第三に、分数統計性の検証実験セットアップを考案した。先に述べたように、分数電荷準粒子の 2 粒子衝突実験の実現は簡単ではない。これは、単純に QPC などのビームスプリッタに 2 電流を入力して衝突させたとしても、電子のフェルミ統計性に起因したアンチバンチング効果によって電流ゆらぎそのものが発生せず、従って出力におけるゆらぎ相関が測定できないからである。そこで本研究では、分数電荷準粒子の再分配実験 [I. Safi et al., Phys. Rev. Lett. 86, 4628 (2001)] を利用して分数統計性の検証を試みることを考えた。この手法では、量子ホール系中に 2 つの QPC を直列に準備し、電流の複数回の分配過程によって生じる電流ゆらぎを測定する [図 2(a)]。QPC1 における散乱によって分数電荷準粒子を励起し、これを QPC2 で再分配した場合、準粒子の分数統計性を反映した電流ゆらぎ相互相関が期待される。この方法を実現するための試料を実際に作製した。分数統計検証実験に先立ち、この試料に対して整数量子ホール系での予備実験を行い、測定系や試料構造の最適化を検討した。

4. 研究成果

第一の「極低温環境における測定技術を確立」のための取り組みでは、最低電子温度 12 mK、電流ゆらぎ相関の測定精度 $10^{-29} \text{ A}^2/\text{Hz}$ の高信頼性を有する測定系の確立に成功した。電流ゆらぎ相互相関についてこのレベルの高性能測定を実現した例はなく、世界で唯一の強力な測定系が完成した。これは本研究の非常に重要な成果の 1 つとして特筆すべきものである。この手法を利用して、整数量子ホール系における非平衡電流ゆらぎの測定に成功し、本手法が十分な定量性を有することを示した。本測定手法の開発、およびこの整数量子ホール系への適用例は、雑誌論文 2 にまとめて発表された。

第二の「開発された手法を分数量子ホール系における測定への適用」の取り組みでは、QPC 近傍の量子ホール系における準粒子の有効電荷を、電流ゆらぎ測定によって評価した。まずゲート電圧印加によって整数量子ホール系中に局所的に分数量子ホール系を形成した。この分数量子ホール系は電子に対してトンネル障壁として働く。この系では、整数量子ホール系間を電荷がトンネルする際、まず分数電荷準粒子が生成され、その準粒子

の伝導としてトンネル電流が運ばれる。このような局所分数量子ホール系における輸送メカニズムはこれまで知られていなかったが、本研究でトンネル準粒子の分数電荷を測定することによって初めて明らかになった[図 1(b)]。さらに、分数電荷トンネル現象の温度依存性を測定した。それにより、量子ホール系に埋め込まれた局所量子ホール系における電子輸送ダイナミクスには、1次元エッジチャネルの朝永ラッティンジャー液体的性質が重要な役割を果たしていることを明らかにした。これらの結果について学会発表 1,2,5,6,8,10,11 にて発表を行い、雑誌論文 1 にまとめた。

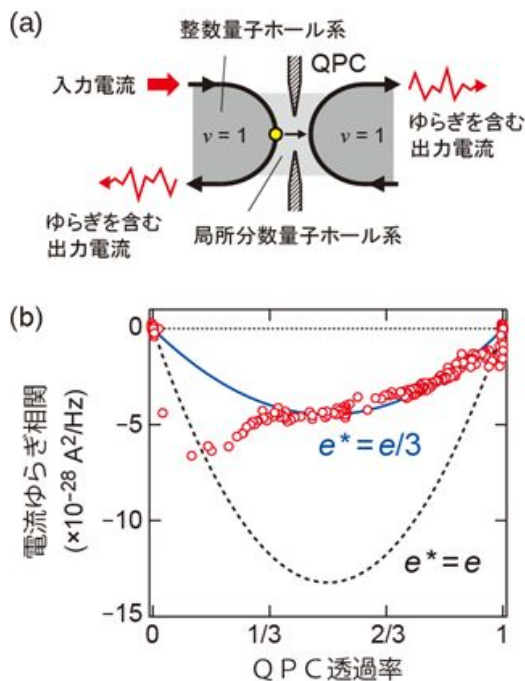


図 1(a) 分数電荷測定実験の概念図。整数量子ホール系に埋め込まれた QPC で発生する非平衡電流ゆらぎは、QPC 近傍の局所的な分数量子ホール系における素励起の有効電荷の大きさを反映する。(b) $\nu = 1/3$ 局所分数量子ホール系における分数電荷トンネル現象の観測例。トンネル電流は素電荷 e (黒点線) ではなく分数電荷 $e/3$ によって運ばれる。

第三の「分数統計性の検証実験」に向け、量子ホール系における電流再分配実験のセットアップを確立し、試料を作製した[図 2(b)]。分数電荷準粒子の再分配実験に先駆けて、まずこの試料を用いた整数量子ホール系における電子の再分配実験について考察した。QPC1 からエッジチャネルに注入された電子が、QPC2 に到達するまでに非弾性散乱によってエネルギーを散逸する過程を、電流ゆらぎ相互相関測定によって検出する手法を考案した。さらに、実際に $\nu = 1$ 整数量子ホール系の実験で本研究の計算の正当性を

確かめた。この成果は学会発表 3,4,7,9 にて発表され、現在、論文を執筆中である。

この取り組みを分数量子ホール系へと拡張することにより、分数電荷準粒子の量子統計性の評価実験が実行可能であると考えられ、本研究の取り組みでは分数統計検証に向けて大きな前進が得られた。

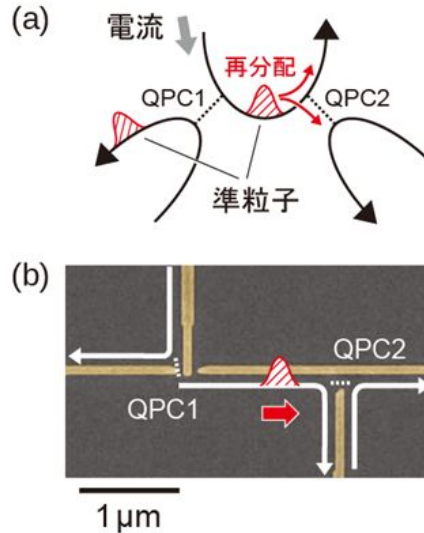


図 2(a) トンネル準粒子の再分配実験の概念図。(b) 本研究で作製した試料の電子顕微鏡写真。QPC1 で励起されたトンネル準粒子が QPC2 で再分配される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2 件)

Masayuki Hashisaka, Tomoaki Ota, Koji Muraki, and Toshimasa Fujisawa, Shot-noise evidence of fractional quasiparticle creation in a local fractional quantum Hall state, *Physical Review Letters* **114**, 056802 (2015) 査読有, doi: PhysRevLett.114.056802.

Masayuki Hashisaka, Tomoaki Ota, Masakazu Yamagishi, Koji Muraki, and Toshimasa Fujisawa, Cross-correlation measurement of quantum shot noise using homemade transimpedance amplifiers, *Review of Scientific Instruments* **85**, 054704 (2014) 査読有, doi: 10.1063/1.4875588.

[学会発表](計 11 件)

Masayuki Hashisaka, Fractional charge tunneling through a local fractional quantum Hall system measured using cross-correlation noise measurements, *New Perspectives in Spintronics and Mesoscopic Physics*, 2015 年 6 月 12 日, 東京大学物性研究所(千葉県柏市)

Masayuki Hashisaka, Creation of fractional quasiparticles in a tunneling process through a

local fractional quantum Hall system, Kwant-workshop, 2015年6月1日, Grenoble (France).

太田智明、橋坂昌幸、村木康二、藤澤利正、電流ゆらぎ相互相関測定による量子ホール端における電子の非弾性散乱の検出、日本物理学会第70回年次大会、2015年3月21日、早稲田大学(東京都新宿区)。

太田智明、橋坂昌幸、村木康二、藤澤利正、量子ホール端における再分配されたショット雑音の相互相関測定、日本物理学会2014年秋季大会、2014年9月7日、中部大学(愛知県春日井市)。

橋坂昌幸、太田智明、村木康二、藤澤利正、局所的な分数量子ホール領域における分数電荷準粒子の生成、日本物理学会2014年秋季大会、2014年9月7日、中部大学(愛知県春日井市)。

Masayuki Hashisaka, Tomoaki Ota, Koji Muraki, and Toshimasa Fujisawa, Fractional Charge Tunneling through a Local Fractional Quantum Hall Region, 32nd International Conference on Physics of Semiconductor, 2014年8月15日, Austin, Texas (USA).

Tomoaki Ota, Masayuki Hashisaka, Koji Muraki, and Toshimasa Fujisawa, Cross-correlation Measurement of Repartitioned Noise in a Quantum Hall Edge Channel, 32nd International Conference on Physics of Semiconductor, 2014年8月14日, Austin, Texas (USA).

Masayuki Hashisaka, Tomoaki Ota, Koji Muraki, and Toshimasa Fujisawa, Shot noise of fractional quasiparticles in a local fractional quantum Hall states embedded in an integer quantum Hall regime, International Symposium on Nanoscale Transport and Technology, 2013年11月28日, NTT物性科学基礎研究所(神奈川県厚木市)。

太田智明、橋坂昌幸、村木康二、藤澤利正、量子ホール端におけるショット雑音の再分配による正の電流相互相関、日本物理学会2013年秋季大会2013年9月26日、徳島大学(徳島県徳島市)。

橋坂昌幸、太田智明、村木康二、藤澤利正、局所的な分数量子ホール領域における分数電荷の分配雑音、日本物理学会2013年秋季大会2013年9月26日、徳島大学(徳島県徳島市)。

Masayuki Hashisaka, Tomoaki Ota, Koji Muraki, and Toshimasa Fujisawa, Shot noise of quasiparticles at local fractional quantum Hall states measured by a cross-correlation technique, 20th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-20), 2013年7月4日, Wroclaw (Poland).

{図書}(計0件)

{産業財産権}
○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

{その他}
<http://fujisawa.phys.titech.ac.jp/~hashisaka/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

橋坂昌幸(Masayuki Hashisaka)
東京工業大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号: 80550649

(2)研究分担者

()
研究者番号:

(3)連携研究者

()
研究者番号: