

A01 量子ホール系における分数電荷準粒子の生成・消滅過程の研究

東京工業大学大学院理工学研究科 橋坂昌幸

分数量子ホール系は代表的な量子多体系であり、多体効果に起因する多様な固体物性についての理論研究の検証の舞台として、重要な役割を担っている。本研究では、分数量子ホール系における素励起である分数電荷準粒子に着目し、その生成・消滅過程を明らかにすることを目指している。電流ゆらぎ相互相関測定という独自の測定技術を利用し、量子ホール系における準粒子ダイナミクスの解明に取り組んでいる。

初年度に得られた成果は以下の通りである。

1. 局所分数量子ホール系における分数電荷準粒子の生成過程

分数電荷準粒子は、分数量子ホール系における電子相関効果に起因して生じる素励起である。分数電荷準粒子は、これまで単一の分数量子ホール系において、2つの試料端間をトンネルする電流のゆらぎを測定することによって検証されてきた。これに対し本研究では、異なるランダウ準位占有率を持つ複数の量子ホール系の接合を作製することにより、接合界面での準粒子の生成・消滅過程のダイナミクスを観測することを目指した。

整数量子ホール系中に局所的に電子密度の小さい領域を準備すると、局所的な分数量子ホール系 (LFQH 系) を形成することができる (図 1)。この系は、2つの整数量子ホール系の間、トンネル障壁として LFQH 系を挿入した系とみなすことができる。この接合をトンネルする電流の非平衡ゆらぎを測定することにより、トンネル準粒子の電荷を評価した。

図 2 は接合を流れる電流の電気伝導度、及び接合を透過、または反射する電流のゆらぎ相関の測定結果である。高温 [図 2(c): 温度 2.3 K] では、電気伝導度はバイアス電圧に依存せず一定の値となる。この場合、電流ゆらぎ相関の大きさからトンネル準粒子の電荷を計算すると、準粒子が $e/3$ の分数電荷を持つことが分かった。この結果から、LFQH 系を障壁とする接合において、分数電荷準粒子が生成されることによって電荷のトンネルが起こることが明らかになった。

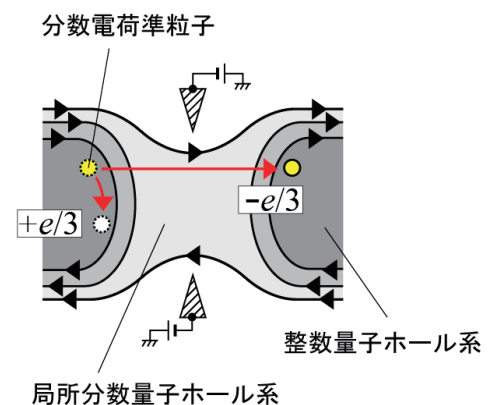


図 1. 分数電荷準粒子のトンネル現象

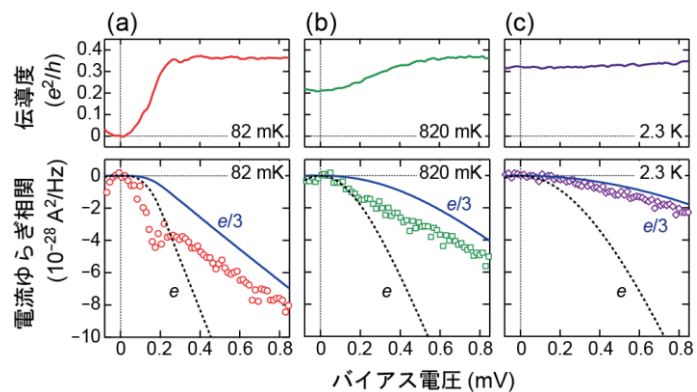


図 2. トンネル接合の電気伝導度、及び透過・反射電流のゆらぎ相関のバイアス電圧依存性。

また、同様の実験をより低温において行なうと、低バイアス領域において電気伝導度に変化し、電流に非線形な振る舞いが見られた[図 2(a)(b)]。この非線形性が見られる領域では、電流ゆらぎ相関の大きさから、トンネル準粒子が素電荷 e を持つことが分かった。この非線形現象はカイラルな 1 次元電子系である量子ホール端状態の性質を反映したものであり、朝永-Luttinger 液体論によって説明されることが分かった。

これらの結果は参考文献(1)にまとめられている。

2. 電流ゆらぎ相関測定による量子ホール端状態の非弾性散乱過程の検出

量子ホール系における電気伝導は、量子ホール端状態と呼ばれる試料端のカイラルな 1 次元電子系によって担われる。上記の分数電荷準粒子のトンネル現象に関する説明でも触れたように、量子ホール系の準粒子ダイナミクスを理解する上で、量子ホール端状態の性質を調べることは非常に重要である。

量子ホール端状態はコヒーレントな伝導チャネルとして知られ、Mach-Zehnder 型干渉計などを用いた干渉実験によって、実際にコヒーレントチャネルとしての性質が確かめられてきた。同時にこれらの実験において、電子波のデコヒーレンスによって干渉度が低下することが確認されてきた。光子と異なり、電子はクーロン相互作用などによって容易に環境と相互作用を起こす。量子ホール端状態は $10\ \mu\text{m}$ 以上の長いコヒーレンス長を有するため、微細加工によってチャネル近傍に様々な環境を準備することによって、固体素子中におけるデコヒーレンスの起源を調べるためのテストデバイスとして利用できる。このことから、量子ホール端状態は近年改めて大きな注目を集めるようになってきている。

このような状況を踏まえ、我々は量子ホール端における非弾性散乱過程を調べる手法として、電流ゆらぎ相関測定を用いる手法を考案した。量子ホール端を流れる電流をビームスプリッタによって分配し、透過した電子と反射した電子の重ね合わせ状態を生成する。透過した電流を再び別のビームスプリッタによって分配することを考える。最初の分配過程ののち、2 つ目のビームスプリッタに到達するまでに電子がコヒーレントに伝搬したとすると、再分配過程で得られる透過・反射電流のゆらぎ相関は必ず負になる。一方、ビームスプリッタ間を伝搬中に非弾性散乱が生じる場合、系に加えるバイアスを適切に設定することで、透過・反射電流のゆらぎ相関を正にできることが分かった。従って、このゆらぎ相関の符号から、量子ホール端における非弾性散乱過程の有無を調べることができる。実際に量子ホールデバイスを用いた実験により、この手法が有効であることを確かめた(2)。

参考文献:

- (1) M. Hashisaka, T. Ota, K. Muraki, and T. Fujisawa, *Phys. Rev. Lett.* **114**, 056802 (2015).
- (2) T. Ota, M. Hashisaka, K. Muraki, and T. Fujisawa, in preparation.