

メゾスコピック量子ホール系の低次元準粒子制御と非平衡現象

Nonequilibrium states of low-dimensional quasiparticles
in a mesoscopic quantum Hall system

課題番号：19H05603

藤澤 利正 (FUJISAWA Toshimasa)

東京工業大学・理学院・教授



研究の概要（4行以内）

強磁場中の半導体ヘテロ構造二次元電子系を用い、機能的量子素子の集積化によって人為的な制御・観測を可能にするメゾスコピック量子ホール系を形成し、一次元系準粒子（プラズモン・スピノン等）、二次元系準粒子（分数電荷・スカーミオン等）の制御による非平衡現象を探求し、量子ホール熱機関やトポロジカル量子工学への指針を得ることを目的とする。

研究分野：物性物理学

キーワード：量子ホール効果、メゾスコピック系、非平衡現象

1. 研究開始当初の背景

量子ホール系は、強磁場中の二次元電子に現れる二次元トポロジカル絶縁体であり、バルク（試料端を除く二次元電子）は絶縁化され、試料端に一方方向（カイラル）に伝搬する一次元電子系（エッジ）が出現する。二次元系（バルク）には、分数の電荷 ($e/3$, $e/5$ など) を有する分数電荷準粒子や、電子スピンの旋回構造であるスカーミオンなどが現れ、一次元系（エッジ）には、集団的電荷励起（プラズモン）や集団的スピン励起（スピノン）が現れる。これらの準粒子は、次元性やトポロジーに起因する特異な性質を示し、一方方向性（非相反性）を利用したプラズモニクスや熱電機関、準粒子（マヨラナ準粒子）のブレーディング（組紐）によるトポロジカル量子計算などへの応用が期待されている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、微細構造を施したメゾスコピック量子ホール系を用いて、一次元系準粒子（プラズモン・スピノン等）や二次元系準粒子（分数電荷・スカーミオン等）の「制御」による非平衡現象を探求し、量子ホール熱機関やトポロジカル量子工学への「応用」指針を得ることである。

一次元系に関しては、整数・分数量子ホール状態における朝永ラッティンジャー液体に関する準粒子輸送や、それを用いた熱輸送・熱電機関の研究を行う。二次元系については、量子アンチドット、超高速走査型偏光分光顕微鏡、ショット雑音測定などを駆使して、準粒子の制御技術を開拓する。

3. 研究の方法

本研究では、AlGaAs/GaAs 半導体テロ構造の量子ホール系を微細加工したメゾスコピック量子ホール系により、非平衡準粒子の制御・応用に関する研究を進める。量子ポイント接合、量子ドット、量子アンチドットなどの機能的な素子を集積化し、一次元・二次元系準粒子のメゾスコピックな“測定系”を構成する。時間分解測定、雑音測定、光学測定、理論などの多角的な解析により、低次元系特有の準粒子（プラズモン・スピノン・分数電荷・スカーミオンなど）の非平衡状態を評価し、輸送特性（電荷流・スピン流・熱流など）を明らかにする。これらの手法で、一次元・二次元系の準粒子の制御技術を確認し、新たな非平衡状態を探索するとともに、準粒子の応用指針を立てる。

4. これまでの成果

出版済みの代表的な成果について記す。この他、量子ホール熱電機関、分数電荷準粒子などの実験や理論研究が進行中である。

(1) 量子ホールエッジチャンネルの量子化された電荷モード [1]

朝永ラッティンジャー液体モデルでは、並走または対向するチャンネル間のクーロン相互作用により、準粒子の伝搬モードが形成される。本研究では、チャンネル間のトンネリングが顕著な場合に、量子化された電荷モードを示すことを検証した。

実験では、図1の量子ホールY接合において、電荷波束が分数化する現象を時間分解測定によって観測した。ランダウ占有率が v_A と v_B の量子ホール領域を形成すると、エッジチャンネルのY接

合が2つ(Y_N , Y_C)形成される。左側から電荷波束を入射すると、 Y_C において電荷が $r : 1-r$ の比で分数化を繰り返し、右側に公比 r の波束列が射出される。得られた値($r = 1/2, 1/3$)は、電荷モードの量子化を示している。

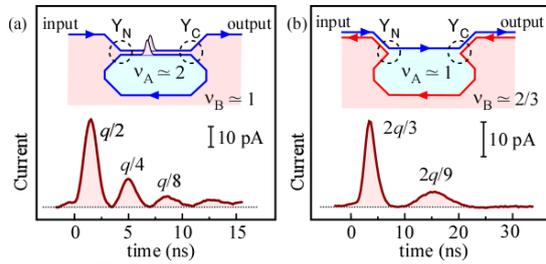


図1 量子ホール Y 接合での電荷波束の分数化 (a)並走整数エッジ (b)対向整数(青)・分数(赤)エッジ

(2) 量子熱機関の仕事率と熱効率のトレードオフの一般則を構築 [2]

量子ホール系で実現されると期待される熱機関を意識し、熱機関の効率に関する一般的な法則を構築した。量子熱機関での量子操作として現実的と思われる準静的過程に近い熱機関を対象とし、熱効率と仕事率の間に成立する普遍的な関係式を導いた。各時刻での系の状態が、各パラメータでの平衡状態に近いことから、平衡状態に対する応答関数を用いることで熱力学長という量を定義できる(図2参照)。この熱力学長は、量子散逸を表す指標になることを示すことができる。熱効率と仕事率の間に成立する普遍的な関係式は熱力学長を基軸にした新しいトレードオフ関係式になり、今後の実験的理論的研究に役に立つと期待される。

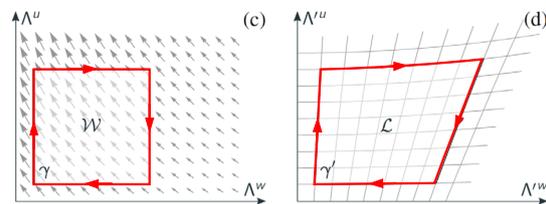


図2 熱機関の制御パラメータ (Λ^u , Λ^w) の閉経路 γ による積分(仕事 W)と、熱力学的計量(Λ^u , Λ^w) の閉経路 γ' による積分(熱力学長 L)によって、熱効率と仕事率のトレードオフを表すことができる。

(3) コルビノ型電極による量子アンチドットの微小電流測 [3]

本研究では、微小円柱状ゲートによる微小量子アンチドットの作製を目指している。従来の測定手法(試料端の電極で電流や電位差を測定)では、大きなエッジ電流により、微弱な電流測定に適さない。本研究では、コルビノ構造でエッジ電流を回避し、微弱電流(\sim pA)でも明瞭な量子アンチドット特性の観測に成功した。

(4) 分光顕微鏡の空間分解能向上と半導体不純物密度測定技術 [4]

既存の走査型共焦点分光顕微鏡の空間分解能をさらに向上させるために、励起光を従来の赤外光(波長800nm)から非線形光学効果を用いた紫外光(波長350nm)に対応できるシステムを構

築した。この技術は半導体特性評価にも応用可能で、GaN中に残存する酸素およびSi不純物密度の空間分布を超高精度に可視化することに成功した(図3)。

(a) O: 357.04 nm (b) Si: 356.91 nm

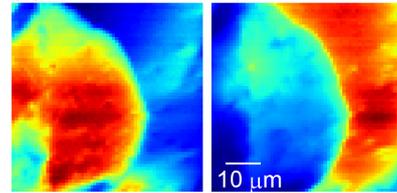


図3 紫外顕微分光による(a)酸素、(b)シリコン不純物の空間分布

(5) 局所量子ホール系のブレイクダウン現象[5]

バルク量子ホール系に占有率の異なる局所量子ホール系を接合した系において、バイアス電圧の増加により、2段階(電子のトンネル効果、およびスピン偏極の崩壊)で量子ホール状態が崩壊する現象を見出した。電流測定・雑音測定・抵抗検出NMR測定による複合解析手法を考案し、メゾスコピック量子ホール系の非線形性非平衡現象を解明した。

5. 今後の計画

これまでの成果をもとに、メゾスコピック量子ホール系における低次元準粒子の制御技術を高め、非平衡現象・熱電機関・トポロジカル量子工学に関する研究を進める。

6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

- [1] C.J. Lin, M. Hashisaka, T. Akiho, K. Muraki, *T. Fujisawa, "Quantized charge fractionalization at quantum Hall Y junctions in the disorder-dominated regime", Nature Commun. 12, 131 (2021).
- [2] K. Brandner and K. Saito, "Thermodynamic Geometry of Microscopic Heat Engines", Phys. Rev. Lett. 124, 040602-1-5 (2020).
- [3] T. Hata, T. Uchino, T. Akiho, K. Muraki and T. Fujisawa, "Sensitive current measurement on a quantum antidot with a Corbino-type electrode", Japan. J. Appl. Phys. 59, SGGI03 (2020).
- [4] A. Kamiyama, K. Kojima, S. F. Chichibu, and G. Yusa, "Analyzing oxygen incorporation in GaN microstructures composed of c-planes and angled facets by confocal magnetophotoluminescence microscopy", AIP Advances 10, 035215-1-5 (2020).
- [5] M. Hashisaka, K. Muraki, and T. Fujisawa, "Two-step breakdown of a local $\nu = 1$ quantum Hall state", Phys. Rev. B 101, 041303(R) (2020).

7. ホームページ等

代表者のホームページ

<http://fujisawa.phys.titech.ac.jp/>