

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21740220

研究課題名（和文）

経路積分モンテカルロ法によるメゾスコピック素子の動的応答解析

研究課題名（英文）

Path-integral Monte Carlo study of dynamic response in mesoscopic devices

研究代表者

加藤 岳生（KATO TAKEO）

東京大学・物性研究所・准教授

研究者番号：80332956

研究成果の概要（和文）：

量子ホール効果を利用して作成された一次元電子系と量子ドットを結合させた系の動的輸送特性を理論的に解析した。電子間相互作用が強くなると量子相転移現象が生じ、電子の量子コヒーレンスが完全に失われて、これまでの理論で記述できない動的応答が得られることを示した。また単一電子注入における電子間相互作用が量子コヒーレンスに及ぼす影響を評価した。近藤量子ドットの電流相関や非平衡版オンサーガー関係式についても研究を行った。

研究成果の概要（英文）：

Dynamic transport properties in hybrid systems with one-dimensional electrons made by edge states of quantum Hall effect and a quantum dot have been studied theoretically. It has been shown that strong electron-electron interaction causes quantum phase transition and that conventional theory cannot be applied to the resultant state as electron coherence is completely suppressed there. Decoherence effect of electron-electron interaction on single electron injection has also been evaluated. Current correlations in Kondo dots and Onsager's relations extended to non-equilibrium states have also been studied.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2010 年度	700,000	210,000	910,000
2011 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 I

キーワード：物性理論、メゾスコピック系、量子ドット、量子コンピュータ、量子細線

1. 研究開始当初の背景

メゾスコピック素子における量子情報処理の視点から、デバイスの高速動作に関わる研究が最近になって注目を集めている。端緒

となったのは、2006 年にフランスの実験グループが行った、量子ドットと一次元電子系（量子ホール状態のエッジ状態）の結合系のギガヘルツ領域交流応答での実験である。この実験で、交流抵抗の値が直流抵抗の値と全く

異なる振る舞いをするのが観測された。これは、ギガヘルツ領域では温度揺らぎが無視でき、伝導電子の量子コヒーレンスが重要となるためである。現在のところ、実験結果はブティックらの散乱理論に基づく理論によりよく説明されているが、それは実験系で用いられている素子の形状が大きく、電子間相互作用が無視できるからである。素子が小さくなって電子間相互作用が強くなった状況で交流応答がどのようになるか、研究開始当初はまったく知られていなかった。さらに2007年には同じ実験グループによって、量子ドットから単一の電子を制御されたタイミングで一次元電子系へ注入する実験が行われた。この実験は、電子数個を用いた二粒子量子干渉実験への道を拓くものであり、電子を用いた量子情報制御への重要な第一歩である。一方で、この実験では電子の確率分布のみが観測されているが、二粒子量子干渉実験で重要となる量子可干渉性の議論は行われていない。特に電子は電荷を有するがゆえに環境との結合が強く、量子コヒーレンスがどの程度保たれるかについて注意深い議論が必要であるが、その点について研究開始当初はまったく議論がされておらず、現在に至っても不十分なままである。

2. 研究の目的

本研究プロジェクトは、量子ドットと一次元電子系が結合した系における動的応答および単一電子注入に関して、理論的な解析を主な目的とする。

(1) 緩和抵抗の理論的評価

交流応答の実験では、結合部分における動的な抵抗(緩和抵抗と呼ばれる)がユニバーサルな値 e^2/h をとる。電子間相互作用効果により、このユニバーサルな値がどのように変更を受けるかを明らかにする。量子ドット内のクーロン相互作用によるクーロンブロックエードの効果、一次元電子系が朝永ラッティンジャー液体で記述される場合の電子相関効果、環境ノイズの効果などを考え、それぞれ緩和抵抗に及ぼす影響を明らかにする。

(2) 単一電子注入の理論的評価

単一電子注入実験において、注入された電子の量子コヒーレンスを理論的に評価する。量子コヒーレンスを測定する手法として二電子干渉を利用した Hunbury Brown-Twiss 型実験を想定し、そこでの同時検出確率を利用する。量子コヒーレンスを壊す効果として、量子ドットと一次元電子系の間電子間相互作用、および量子ドット電極のノイズを考え、同時検出確率の理論的評価を行う。

(3) 関連する系への拡張

関連する系や現象として近藤量子ドット系における電流相関について考察する。特に電子の量子コヒーレンスについて考察を行い、電子相関効果が電子による量子情報処理にどのような影響を与えるかを総合的に評価する。また非平衡統計力学の視点から電子のダイナミクスを理解する目的で、量子版揺らぎの定理を量子ドットの非平衡熱電効果に応用する。

3. 研究の方法

本研究プロジェクトでは、研究対象に応じて量子モンテカルロ法による数値計算手法と、摂動論に基づく解析的手法を使い分けた。本研究で用いた主な計算手法は以下の通りである。

(1) 経路積分モンテカルロ法

一次元電子系と量子ドットが結合した系は、ボゾン化の手法を用いて有効作用の形で定式化することができる。線形応答理論により、系の線形交流応答係数は熱平衡状態の相関関数から求めることができる。相関関数は解析的手法で求めるのは難しいため、経路積分量子モンテカルロ法を用いた。この手法は当研究室で長年アルゴリズムの改良を行ってきた手法であり、本研究開始当初より有効な手法であることが強く期待されていた。実際に精度良く相関関数を計算することが可能であることが示され、期待通りの成果を挙げることができた。一方、単一電子注入の問題については量子ダイナミクスを取り扱う必要があり、量子モンテカルロ手法は負符号問題に直面する。当初はこの困難を最新の動的モンテカルロアルゴリズムの利用で乗り越える予定であったが、本研究プロジェクト開始後に(2)に記述する摂動論を用いた手法が効果的であることがわかった。

(2) 場の理論による摂動計算手法

単一電子注入に関する計算では、任意のパラメータで計算を行うことが難しいが、はじめの一步として量子ドットと一次元電子系の結合が弱い極限の性質を明らかにすることが重要であると考えられた。このような極限的な場合においても、計算は自明ではなくフェルミ端異常効果と呼ばれるフェルミ面効果が現れるため、これを処理するためにケルディッシュ形式の場の理論の手法を独自に発展させ、見通しよく計算が行えるよう工夫を行った。

(3) 完全係数統計の手法

電流相関や非平衡熱電係数を求める際には、完全係数統計と呼ばれる手法を用いた。

これは高次の電流相関をすべて求める手法であり、関与している電子の動的プロセスを明らかにするのに有効であった。

4. 研究成果

(1) 緩和抵抗

量子ドットと一次元電子系との結合系に対して、量子ドット内の電子間相互作用および一次元電子系内の電子間相互作用を取り入れた模型に対して、経路積分モンテカルロ法により緩和抵抗を求めた。一次元電子系内の電子間相互作用の強さはパラメータ K によって表され、 K が 1 のときは相互作用のない電子系を、 $K < 1$ のとき斥力相互作用を持つ電子系をそれぞれ表す。本研究により、量子ドット内の電子間相互作用は動的抵抗に何ら影響を及ぼさないことを示した。一方、 K の値を 1 から小さくしていくと、 K が $1/2$ より小さくなったときに、量子ドット-一次元電子系の結合強度に臨界値が存在し、量子相転移が生じることを初めて示した (図 1: 図の横軸は量子ドットと一次元電子系を隔てているポテンシャル障壁の大きさを表す)。量子相転移後の新しい相では、量子ドット内の電子の量子コヒーレンスが完全に失われており、それに対応して動的抵抗が発散する。これらの現象は電子相関効果によって初めて生じるものであり、従来の電子間相互作用を平均場で取り扱った理論では決して記述できない。この新奇量子相は特異な動的応答を有しており、フィリング ν が $1/3$ や $1/5$ といった値を持つ分数量子ホール効果のエッジ状態での検証が期待される。本結果は電子間相互作用が動的応答に劇的な影響を与えることを示した最初の例を与えており、今後の理論・実験研究に貢献すると期待される。

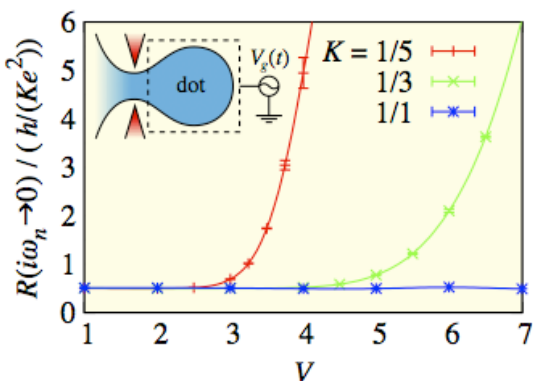


図 1 緩和抵抗の計算結果 (横軸: ドットと一次元電子系を隔てるポテンシャル障壁の高さ、縦軸: 緩和抵抗)

また、環境との結合の影響を調べるために、量子ドットのゲート電圧に揺らぎがあるモデルを考察した。その結果、ゲート電圧の揺らぎは有効的に K の値を減少させることを明らかにした。これは作成が困難な分数量子ホール効果を示す試料を用いずに、上記の量子相転移が議論できることを意味する。

(2) 単一電子注入

単一電子注入実験を理解するためには、量子光学実験とのアナロジーが重要と考え、手始めに量子ドットにおける単一「光子」生成についての理論研究を行った。最近になって、量子ドットに光学キャビティを設けて、局在準位と真空場の間強い真空ラビ結合を作ることが可能となり、単一光子生成へ応用されているため、これ自体新しいトピックスであるといえる。この研究では、環境との結合による量子ドットの準位揺動効果を取り扱い、生成される光子の二粒子干渉性を議論した。また効率のよく干渉性の高い光子を生成するための実験条件を議論した。(この成果は現在論文を準備中である。)

以上の準備を行った後、単一電子注入の理論を構築した。場の理論を用いた摂動論により、生成される電子のエネルギースペクトルおよび純粋度を評価した。エネルギースペクトルは、量子ドットのエネルギー準位にピークを持つが、フェルミ端異常効果によりピークの裾はローレンツ型共鳴ピークよりもゆっくりと減衰する。さらにフェルミ面近くに微小エネルギー電子励起による第二のピークが現れることを示した。一方、純粋度の大きさは、現実的なクーロン相互作用のもとで影響をうけるものの、純粋度を数割程度下げる効果にとどまることを示した (図 2)。この成果は、量子ドットでのダイナミクスを考察する礎となると考えている。(この成果は現在論文を準備中である。)

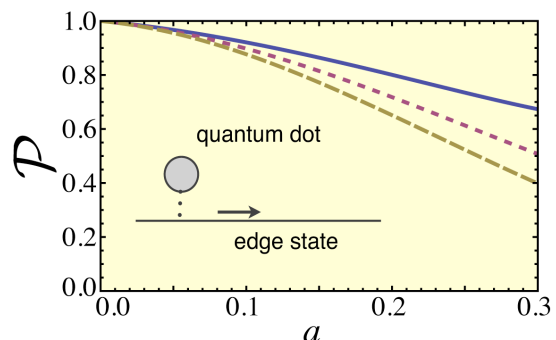


図 2 純粋度の計算結果 (横軸: 電子間相互作用の強さ、縦軸: 純粋度)

(3) 近藤量子ドットの電流相関

近藤状態にある量子ドットを通過する電流は強い相関を持つことが期待される。そこで縮退量子ドット系における電流相関を、完全係数統計および繰り込まれた摂動論を用いて、任意の電子間相互作用の大きさに対して電流相関を計算した。また、この電流相関を実際に測定する実験手法についても提案を行った。本計算では電子の量子コヒーレンスと電子間相関の関係はまだ明瞭ではないが、この計算を多端子へ拡張することで、ベルの不等式の検証などを行うことができる。と期待される。

(4) 非平衡オンサーガー関係式

熱平衡状態ではオンサーガー関係式など、種々の熱力学的関係式が存在するが、これら一般式の非平衡応答係数への拡張を行った。完全係数統計の理論の枠組みを使って、量子版揺らぎの定理を援用し、非平衡熱電係数に対しても一般的な関係式が存在することを初めて示した。この計算の導出過程では、電子の運動が磁場と時間の同時反転に対して対称性を有することが本質である。強い電子間相互作用がある系でも成り立つ極めて一般的な関係式であり、非線形応答係数に対する理解を深める上で重要である。また見方を変え、本結果は非線形熱電係数の実験を行うことで量子版揺らぎの定理が示せることも意味しており、非平衡統計力学の基礎理論の実験検証の提案ともなっている。

(5) 超伝導素子の量子ダイナミクス

超伝導素子の量子ダイナミクス・動的応答に関連して、①カイラル p 波超伝導の weak-link の電流電圧特性、②高温超伝導体の巨視的量子トンネル確率の温度依存性、③高温超伝導体における半整数量子磁束を担う渦糸の巨視的量子トンネル効果、を調べた。

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 8 件)

(1) R. Sakano, R. Oguri, T. Kato, and S. Tarucha, "Full counting statistics for SU(N) impurity Anderson model", Phys. Rev. B 83, 241301(1-4) (R) (2011) 査読有.
DOI: 10.1103/PhysRevB.83.241301

(2) Y. Hamamoto, T. Jonckheere, T. Kato, and T. Martin, "Quantum phase transition of dynamical resistance in a mesoscopic capacitor", J. Phys.: Conf. Ser. 334, 012033(1-5) (2011) 査読有.

DOI: 10.1088/1742-6596/334/1/012033

(3) E. Iyoda, Y. Utsumi and T. Kato, "Nonequilibrium Extension of Onsager Relations for Thermoelectric Effects in Mesoscopic Conductors", J. Phys. Soc. Jpn. 79, 045003(1-2) (2010) 査読有.
DOI: 10.1143/JPSJ.79.045003

(4) Y. Hamamoto, T. Jonckheere, T. Kato and T. Martin, "Dynamic response of a mesoscopic capacitor in the presence of strong electron interactions", Phys. Rev. B 81, 153305(1-4) (2010) 査読有.
DOI: 10.1103/PhysRevB.81.153305

(5) S. Kawabata, T. Kato, T. Lombardi and T. Bauch, "Two-dimensional macroscopic quantum dynamics in YBCO Josephson junctions", Int. J. Mod. Phys. B 23, 4329-4337 (2009) 査読有.
DOI: 10.1142/S0217979209063481

(6) K. Vogel, W. Schleich, T. Kato, D. Koelle, R. Kleiner and E. Goldobin, "Theory of fractional vortex escape in a long Josephson junction", Phys. Rev. B 80, 134515(1-11) (2009) 査読有.
DOI: 10.1103/PhysRevB.80.134515

(7) Y. Hamamoto and T. Kato, "Numerical study of the Coulomb blockade in an open quantum dot", J. Phys.: Conf. Ser. 150, 022021(1-4) (2009) 査読有.
DOI: 10.1088/1742-6596/150/2/022021

(8) S. Kawabata, T. Kato and T. Bauch, "Theory of two-dimensional macroscopic quantum tunneling in a Josephson junction coupled with an LC circuit", J. Phys.: Conf. Ser. 150, 052105(1-4) (2009) 査読有.
DOI: 10.1088/1742-6596/150/5/052105

[学会発表] (計 14 件)

(1) 阿部弘幸, 加藤岳生, "カイラル p 波超伝導リングにおける臨界電流", 日本物理学会 秋季大会, 2011年9月21日 富山大学

(2) 伊與田英輝, 加藤岳生, 越野和樹, "固体発光素子からの単一光子の諸性質: 位相緩和の効果", 日本物理学会 秋季大会, 2011年9月21日 富山大学

(3) 阪野壘, 小栗章, 加藤岳生, 樽茶清悟, "多端子 Anderson 量子ドット系の完全係数統計と Hurbury Brown-Twiss 効果", 日本物理

学会 秋季大会, 2011年9月24日 富山大学

(4) Yuji Hamamoto, Thibaut Jonckheere, Takeo Kato, and Thierry Martin, "Breakdown of Universal Dynamical Resistance of a Mesoscopic Capacitor", 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26), 2011年8月16日 The Beijing International Convention Center, China

(5) 伊與田英輝, 越野和樹, 加藤岳生, "単一光子源に対する純位相緩和の影響", 日本物理学会 年次大会, 2011年3月25日 新潟大学 (震災のため講演は中止され、スライドのネット公開のみ行われた)

(6) Eiki Iyoda, Tatsuya Fujii, and Takeo Kato, "Fractional Statistics in the Hierarchical Fractional Quantum Hall States and Shot Noise at Finite Temperature", International Symposium on Nanoscale Transport and Technology (ISNTT2011), 2011年1月11日 NTT 物性科学基礎研究所 (厚木)

(7) Eiki Iyoda, Tatsuya Fujii, and Takeo Kato, "Abelian statistics in FQH states and shot noise at finite temperatures", Opening Symposium of Quantum Science of Strongly Correlated Systems (Q2SC), 2010年9月28日 理化学研究所

(8) 伊與田英輝, 藤井達也, 加藤岳生, "分数量子ホール系のエッジ状態間トンネルにおける有効電荷の温度依存性(2)", 日本物理学会 秋季大会, 2010年9月25日 大阪府立大学

(9) Yuji Hamamoto and Takeo Kato, "Quantum phase transition of dynamical resistance in a mesoscopic capacitor", The 19th International Conference on the Application of High Magnetic Fields in Semiconductor Physics and Nanotechnology (HMF-19), 2010年8月3日 福岡国際会議場

(10) 伊與田英輝, 加藤岳生, "保存近似の逐次的改良によるアンダーソン模型の数値手法開発", 日本物理学会 年次大会, 2010年3月21日 岡山大学

(11) 濱本雄治, Thibaut Jonckheere, 加藤岳生, Thierry Martin, "分数量子ホール領域における量子ドット系の緩和抵抗", 日本物理学会 年次大会, 2010年3月20日 岡山大学

(12) 濱本雄治, 加藤岳生, "朝永-Luttinger液体におけるKosterlitz-Thouless転移の解析", 日本物理学会 秋季大会, 2009年9月25日 熊本大学

(13) 伊與田英輝, 藤井達也, 加藤岳生, "分数量子ホール系のエッジ状態間トンネルにおける有効電荷の温度依存性: 非平衡久保公式による解析", 日本物理学会 秋季大会, 2009年9月27日 熊本大学

(14) Yuji Hamamoto and Takeo Kato, "Monte Carlo study of resonant tunneling in a Tomonaga-Luttinger liquid", The 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-18), 2009年7月23日 神戸国際展示場

[その他]

ホームページ

<http://kato.issp.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤 岳生 (KATO TAKEO)

東京大学・物性研究所・准教授

研究者番号: 80332956

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし