

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：14101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23740294

研究課題名(和文)半導体ナノ構造の電気伝導における揺らぎの定理への測定回路の影響

研究課題名(英文)Effect of the measurement circuit on the fluctuation theorem for the electric current through a semiconducting nanostructure

研究代表者

内海 裕洋 (UTSUMI, Yasuhiro)

三重大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10415094

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：揺らぎの定理は非平衡状態においても普遍的に成り立つ、熱力学第2法則を微小系に拡張する定理であり、近年、量子輸送にも適用されている。本研究では量子導体において、測定回路の揺らぎの定理への影響を理論的に研究した。1) 電子波干渉計とLC回路(測定回路)結合系で揺らぎの定理を検討し、測定回路の反作用はむしろ揺らぎの定理を満たすために必要であることを示した。2) 2重量子ドットと量子ポイントコンタクト(測定回路)結合系において、4端子系の非線形輸送係数間の普遍的な関係式を揺らぎの定理から導き検証した。3) ナノ磁性体を対象に、非保存力であるスピントルクと熱揺らぎが、ナノ磁性体の反転に与える影響を研究した。

研究成果の概要(英文)：The fluctuation theorem (FT) which is valid far from equilibrium and extends the second law of thermodynamics to small systems, has been recently applied to the mesoscopic quantum transport. We have theoretically studied the impact of the measurement circuit on the FT of quantum conductors. 1) We have considered the FT for a coupled system, an electron wave interferometer and an LC circuit (measurement circuit), and found that the back-action of the measurement circuit is necessary to be consistent with the FT for this setup. 2) We theoretically derived and experimentally checked universal relations among nonlinear 4-terminal transport coefficients of a coupled system, a double-quantum dot and a quantum point contact (measurement circuit). 3) We have also found a novel switching exponent for the magnetization reversal driven by the non-conservative spin torque and thermal fluctuations.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・数理物理・物性基礎

キーワード：非平衡・非線形物理学 メゾスコピック量子輸送 半導体ナノ構造

1. 研究開始当初の背景

量子系の非平衡統計物理学は、GaAs/AlGaAs 半導体 2 次元電子系につくられた量子導体の電気伝導を対象にも研究がなされてきた。近年、非平衡状態で厳密に成り立つ「揺らぎの定理」が発見され、それにもとづく新たな研究が行われている。揺らぎの定理により、エントロピー（量子導体の場合はジュール熱）の揺らぎの確率分布と微視的可逆性から、熱力学第 2 法則をはじめとする熱力学が出現することが分かっている。またこの定理を用いることで、Onsager 関係式を非線形応答領域へ拡張できるようになっている。

この背景のもと我々は、電流の確率分布を求める完全計数統計理論 (full-counting statistics) を用いて、電気伝導における量子揺らぎの定理を提案した [K. Saito, Y. Utsumi, Phys. Rev. B 78 (2008) 115429]。そして実験のグループと共同で 2 次元電子系に作成された電子波干渉計 (アハロノフ・ボームリング) と、2 次元電子系に作られた電子を数個閉じ込めた電子液滴構造 (量子ドット) を用いて揺らぎの定理を検証した。ただし、どちらの実験結果でも見かけ上の温度が 3~10 倍上昇しており、理論との定量的な不一致が見られた。研究開始当初、この不一致の原因を説明することが課題として残されていた。

2. 研究の目的

我々は量子系では、被測定系 (量子導体) と測定回路が分離できず、測定の反作用が、見かけ上の温度上昇の原因であると着想した。研究の目的は、電子波干渉計と量子ドットを対象に、量子導体と古典測定回路の結合系全体で量子揺らぎの定理を調べ、定量的な予言能力のある理論を構築することである。具体的には以下の 3 項目を中心に研究を行った。

(1) 電子波干渉計を用いた実験において、測定回路 (LC 共振回路) の揺らぎの定理に及ぼす影響を明らかにする。

電子波の干渉は量子力学の本質であり、電子波干渉計を用いることで、量子系の揺らぎの定理の明確な検証ができる。ただし、電子が波として振る舞う場合は、電流の確率分布を実験的に測定することが難しくなる。そのため、揺らぎの定理の検証実験では、電流の期待値と、電流確率分布の分散 (電流ノイズ) を測定している。そして揺らぎの定理から導き出される、電流の 2 次の非線形コンダクタンスと電流ノイズの 1 線形応答の間に成り立つ、非線形応答領域に拡張した Onsager 関係式を検証している [Nakamura, Kobayashi, Utsumi, *et. al.*, Phys. Rev. Lett. 104 (2010) 080602]。また電子波干渉計は外部環

境に敏感であるため、電流ノイズを測定する場合、測定回路には特別な工夫がなされている (信号は GaAs 基板中のランダムな電荷トラップによる $1/f$ ノイズに埋もれるため、測定回路に LC 共振回路を用い 3MHz の信号を抽出する)。測定回路の反作用がみかけの温度上昇の原因と着想し、その影響を取り入れた理論を構築する。

(2) 2 重量子ドットと測定回路 (量子ポイントコンタクト) の結合系での揺らぎの定理を構築する。

実験では高感度の量子ポイントコンタクト電位差計を測定回路として用いている。この電位差計は、量子ドットへの電子一つのトンネルに伴う微弱な電位の時間変動を測定できる [Fujisawa, Tomita, Hayashi, Hirayama, Science 312, 1634 (2006)]。この時間変動からトンネル電子数の確率分布を得ることができるが、量子ポイントコンタクトには $100 \mu\text{V}$ 程度の電圧が印加されているため、信号電流には非平衡ショットノイズが伴う。我々は、このノイズが 2 重量子ドットの電流揺らぎに測定の反作用として影響を及ぼし、温度を実効的に上昇させることを明らかにしてきた [Utsumi, Golubev, Marthaler, Saito, Fujisawa, Schön, Phys. Rev. B 81, 125331 (2010)]。本研究ではさらに進んで、量子ドットと量子ポイントコンタクトの結合系である 4 端子素子で成り立つ揺らぎの定理 [Golubev, Marthaler, Utsumi, Schön, Phys. Rev. B 84, 075323 (2011)] を発展させる。具体的には、4 端子輸送係数間に成り立つ、非線形応答領域に拡張された Onsager 関係式を導出する。そして実験グループと共同研究を行い検証することを目指す。

(3) 定常状態のメソスコピック構造における非平衡統計力学の研究

研究開始当初は、「(2) 2 重量子ドットと測定回路 (量子ポイントコンタクト) の結合系での揺らぎの定理を構築する」のテーマの発展として、2 重量子ドットと量子ポイントコンタクト結合系を対象に、非平衡定常状態の厳密な関係式、例えば Hatano-Sasa 関係式 [Hatano, Sasa, 86, 3463, Phys. Rev. Lett. (2001)]などを、量子系に適用することを目的としていた。現在はその前段階として、電気伝導における非平衡定常状態の厳密な関係式について知見を得るため、過去の研究の蓄積が多い、ナノ磁性体を対象に研究を行った。まず非保存力であるスピントルクにより駆動される磁化反転において、温度揺らぎの影響を理解することを目指す。

3. 研究の方法

(1) 電子波干渉計を用いた実験において、測定回路(LC共振回路)の揺らぎの定理に及ぼす影響を明らかにする

量子導体を流れる電流確率分布を求める完全計数統計理論(full-counting statistics)を用いる。この結合系では、測定回路(古典LC共振回路)の電圧の揺らぎの時間スケールは、被測定系(電子波干渉計)を電子が透過し電極で緩和する時間に比べて十分遅いため、両者の時間スケールはよく分離している。このときは完全計数統計理論のうち、分配関数を閉時間経路に拡張した経路積分形式のKeldysh汎関数を用いると都合がよい。まず電子波干渉計の経路積分の有効作用を散乱行列を用いて表す。このアプローチは量子導体の大きさが位相緩和長より小さく、電子波の位相コヒーレンスが保たれる場合に適切である。古典LC共振回路の経路積分の有効作用を、相互作用がvon-Neumann測定の形で書けることに着目して、経路積分形式のKeldysh汎関数を用いて導出する。そして、電流の確率分布を、鞍点近似を用いて求める。

(2) 2重量子ドットと測定回路(量子ポイントコンタクト)の結合系での揺らぎの定理を構築する。

この結合系では、測定回路(量子ポイントコンタクト)を流れる電流が、被測定系(2重量子ドット)を流れる電流に比べて大きい場合、両者の時間スケールの分離が起きている。この場合、Keldysh経路積分法を用いて、量子ポイントコンタクトの電子の自由度を先に積分し、2重量子ドットの縮約密度行列をもとめ、それをKeldysh実時間ダイアグラム法によって摂動展開する方法がよいことが、我々の過去の研究から分かっている。この方法によって、量子ドットを流れる電流と量子ポイントコンタクトを流れる電流の同時確率分布を求め、それに基づき4端子素子に対する揺らぎの定理を導出する。さらに4端子非線形輸送係数に関して厳密に成り立つ関係式を導出し、それを実験グループと共同で検証する。

(3) 定常状態のメゾスコピック構造における非平衡統計力学の研究

温度により揺らぐ磁場と非保存力であるスピントルクのもとでは、ナノ磁性体のダイナミクスはLangevin方程式の一種である、確率的Landau-Lifshitz-Gilbert(LLG)方程式で記述される。実際の実験と対応させ、双安定ポテンシャルを作る結晶磁気異方性磁場と、ナノ磁性体の運動を2次元面に閉じ込める形状磁気異方性磁場を考慮する。そして、ナノ磁性体の反転確率を、数値計算および解析計算により求める。

本研究ではLangevin方程式はStratonovich型と解釈する。その場合、数値

計算には2次のRunge-Kutta法(Heun法)を用いなくてはならないことが知られている。しかし形状磁気異方性磁場による2次元閉じ込めの効果を精度よく取り入れるためには、時間の刻み幅を小さくする必要があり、Heun法では計算に時間がかかる。そこで、本研究では4次のRunge-Kutta法を用いる。

解析計算は、まず確率的LLG方程式からFokker-Planck方程式を導出して、ナノ磁性体の反転確率を計算する。ただし、結晶磁気異方性磁場と形状磁気異方性磁場が共存する場合、軸対称性がなくなるため、非保存力が加わると、解析的に解くことが困難になる。そこでナノ磁性体の緩和が小さいことを利用して、早い歳差運動は消去し、遅いエネルギーについて近似的な1次元Fokker-Planck方程式を導出する。そしてWKB法などを用いてナノ磁性体の反転確率を計算する。

4. 研究成果

(1) 電子波干渉計を用いた実験において、測定回路(LC共振回路)の揺らぎの定理に及ぼす影響を明らかにする。

量子導体では観測の確率分布は、定義が測定方法により一意でないという問題もある。原理的に観測可能な場合でも、測定器の反作用のために測定した情報が失われてしまう可能性もある。本研究では、実験を念頭に置いて、LC回路と結合した電子波干渉計を考えた(図1挿入図。これは光学トラップに閉じ込められたコロイド粒子の揺らぎの測定実験[Wang, Sevick, Mittag, Searles, Evans, Phys. Rev. Lett. 89, 050601 (2002)]とのアナロジーでもある)。このセットアップでは、LC回路は古典系であるため、LC回路に行う仕事の揺らぎ分布は、原理的にあいまいさなく測定できる。

本研究では、古典LC回路と量子導体の相互作用がvon-Neumann測定の形で書けることに着目し、経路積分形式のKeldysh汎関数を用いて、LC回路に行った仕事の揺らぎ分布を導出した。そしてその仕事の揺らぎ分布は、量子導体で発生するジュール熱の確率分布、つまり電流の確率分布と等しくなることを示した。これはLC回路に行った仕事は、量子導体にしか散逸できないためである。そして、このとき測定される電流の確率分布は、電流確率分布を求める完全計数統計理論(full-counting statistics)で定義される確率分布と一致することを確認した。

LC回路のダイナミクスを微視的ハミルトニアンから検討した結果、それが非ガウス白色雑音のはたらくLangevin方程式で記述されることが分かった。非ガウス性は量子導体のショット雑音に起因する。そして揺らぎの定理を分析した結果、LC回路の量子導体への

反作用(LC回路による断熱的な散逸電流のポンピング)は、むしろ揺らぎの定理が成立するために必要であることが分かった。さらに実際に仕事の確率分布を鞍点近似で計算し、仕事揺らぎの定理を確認した(図1) [Y. Utsumi, D. S. Golubev, M. Marthaler, Gerd Schön, Kensuke Kobayashi, Phys. Rev. B 86, 075420 (2012)]。

本研究の結果により、電子波干渉計を用いた量子揺らぎ定理の実験 [Nakamura, Kobayashi, Utsumi, *et. al.*, Phys. Rev. Lett. 104 (2010) 080602] でみられた理論予測からのずれの原因を、測定装置の反作用に求めることは難しいことが分かってきた。そのため、さらに非平衡電流による電子系の加熱と、熱電効果を検討し始めた。現在のところ、電極電子の緩和が不完全であるという仮定を加えると、実験の傾向の一部を定性的には説明できる可能性があることを示している(内海裕洋, D. S. Golubev, 小林研介, 「量子ドットアハロノフ・ボーム干渉計における揺らぎの定理と熱電効果」、日本物理学会第69回年次大会)。

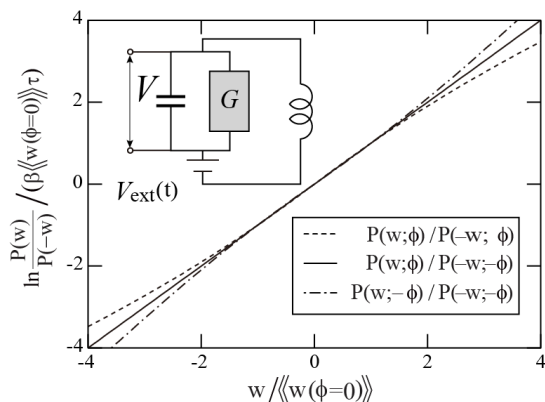


図1. 揺らぎの定理の確認. 横軸はLC回路に行う仕事 w , 縦軸は仕事为正の値を取る確率 $P(w)$ と負の値を取る確率 $P(-w)$ の比の対数. これが直線であれば揺らぎの定理は成り立っている. ϕ は量子導体に印加される磁場(アハロノフ・ボーム位相). $w \rightarrow -w$ と共に $\phi \rightarrow -\phi$ とすると揺らぎの定理が成り立つ. 挿入図: 測定回路(古典LC回路)と結合した量子導体(G: 電子波干渉計)の模式図.

(2) 2重量子ドットと測定回路(量子ポイントコンタクト)の結合系での揺らぎの定理を構築する.

実験グループによって、スプリットゲート法と走査プローブ法を用いて、測定の反作用を制御したサンプルが実現し、揺らぎの定理の理論と実験結果の間に定量的によい一致を得ることができた [Küng, Rossler, Beck, Marthaler, Golubev, Utsumi, Ihn, Ensslin,

Phys. Rev. X 2, 011001 (2012)]。

本研究では、さらに揺らぎの定理から予言される、2次の非線形コンダクタンスとノイズの線形応答に関する、非線形応答領域に拡張したジョンソン・ナイキストノイズの関係式を予言し、実験グループとの共同研究で実証した [Küng, Rossler, Beck, Marthaler, Golubev, Utsumi, Ihn, Ensslin, Appl. Phys. 113, 136507 (2013)]。この関係式の他にも、量子ポイントコンタクトを流れる電流の量子ポイントコンタクト電圧と2重量子ドット電圧の2次のコンダクタンス ($\partial^2 I_{\text{OPC}} / \partial V_S \partial V_{\text{OPC}}$), そして量子ポイントコンタクト電流と2重量子ドット電流の相関の線形応答係数 ($\partial S_{nl} / \partial V_{\text{OPC}}$) を関係付ける普遍的な関係式などを導出しており、それらの検証は今後の課題として残されている。

(3) 定常状態のメゾスコピック構造における非平衡統計力学の研究

先行研究ではナノ磁性体の反転確率の指数は、非保存力であるスピントルクの1次に比例するという理論 [Apalkov, Visscher, Phys. Rev. B 72, 180405 (2005)] と、スピントルクの2次に比例するという理論 [Taniguchi, Imamura, Phys. Rev. B 83, 054432 (2011)] があった。そこで、まず結晶磁気異方性のみを考慮して、確率的LLG方程式を数値的に解いた結果、ナノ磁性体の反転確率の指数はスピントルクの2次に比例することが示された(図2)。一方で形状磁気異方性を加えると、1次に比例する結果となり、形状磁気異方性磁場の大きさに依存して、指数が変わることが数値計算から明らかになった。

次に解析的に反転確率の指数を計算した。その結果、形状磁気異方性磁場が大きい場合は、スピントルクを強くしていくと、まずナノ磁性体は歳差を始め、さらにスピントルクを強くしてはじめて反転するようになった。これに対応して、ナノ磁性体が歳差を始める臨界電流と、ナノ磁性体が反転する臨界電流の2種類の臨界電流が現れることが分かった。そして2つの次数は、この2種類の臨界電流に対応することが分かった。

これらの結果は、Gilbert減衰が小さい場合に限られており、非保存力がある場合は一般に解析解を得ることが困難である。ここで得られた結果は、非平衡定常状態で成り立つ厳密な関係式を用いた研究の足掛かりとなると考えている。

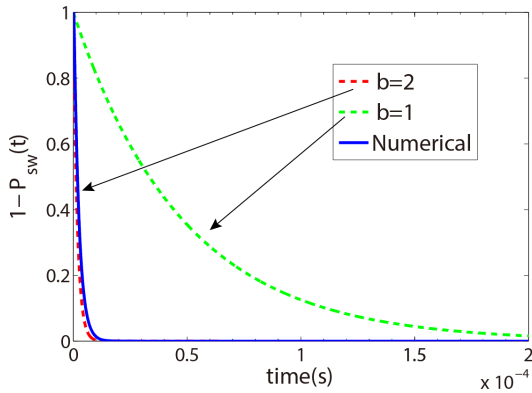


図2 .ナノ磁性体の反転確率の時間依存性(形状磁気異方性磁場がない時) 数値計算の結果は、反転確率の指数がスピントルクの2次に比例することを示している。

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 7 件)

Tomohiro Taniguchi, Yasuhiro Utsumi, Hiroshi Imamura: "Thermally activated switching rate of a nanomagnet in the presence of spin torque", Phys. Rev. B 88, 214414 (2013) (査読有)

B. Küng, C. Rossler, M. Beck, M. Marthaler, D. S. Golubev, Y. Utsumi, T. Ihn, and K. Ensslin: "Test of the fluctuation theorem for single-electron transport", Appl. Phys. 113, 136507 (2013) (査読有)

Y. Utsumi, D. S. Golubev, M. Marthaler, Gerd Schön, Kensuke Kobayashi: "Work fluctuation theorem for a classical circuit coupled to a quantum conductor", Phys. Rev. B 86, 075420 (2012) (査読有)

Tomohiro Taniguchi, Mitsutoshi Shibata, Michael Marthaler, Yasuhiro Utsumi, Hiroshi Imamura: "Numerical Study on Spin Torque Switching in Thermally Activated Region", Appl. Phys. Express 5 (2012) 063009 (査読有)

B. Küng, C. Rossler, M. Beck, M. Marthaler, D.S. Golubev, Y. Utsumi, T. Ihn, K. Ensslin; "Irreversibility on the Level of Single-Electron Tunneling", Phys. Rev. X 2, 011001 (2012) (査読有)

M. Marthaler, Y. Utsumi, D. S. Golubev, A. Shnirman, Gerd Schön: "Lasing without Inversion in Circuit Quantum Electrodynamics", Phys. Rev. Lett. 107,

093901 (2011) (査読有)

[学会発表] (計 21 件)

Y. Utsumi, "Fluctuation theorem in quantum conductors", Solvay Workshop on "Thermodynamics of Small Systems", (The Universite libre de Bruxelles, Brussels, Belgium, 2 - 4 December 2013) (Invited)

Y. Utsumi, "Fluctuation theorem in the single-electron transport", East Asia Joint Seminars on Statistical Physics in cooperation with the JSPS Core-to-Core program, Non-equilibrium dynamics of soft mater and information, (Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto Japan, 21-24 October 2013) (Invited)

Gerd Schön, Yasuhiro Utsumi, Dmitry Golubev, Michael Marthaler, "Fluctuation Theorem and Single-Electron Tunneling", (Invited oral presentation), Quantum Noise and Measurement in Engineered Electronic Systems (Max-Planck Institute for the Physics of Complex systems, Dresden, Germany, 8-12 October 2012) (Invited)

内海裕洋: "量子導体におけるゆらぎの定理/非平衡仕事定理" 日本物理学会 2012 年秋季大会 (招待講演). (2012/9/18-21). 横浜国立大学

内海裕洋: "量子導体の計数統計と揺らぎの定理" 日本物理学会 2011 年秋季大会 (招待講演). (2011/9/21-24). 富山大学

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

内海裕洋 (UTSUMI, YASUHIRO)

三重大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：10415094

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし