

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22340110

研究課題名(和文) 量子的非平衡電気伝導を多体散乱問題として解く

研究課題名(英文) Solving quantum nonequilibrium electric conduction as a many-body scattering problem

研究代表者

羽田野 直道 (Hatano, Naomichi)

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号：70251402

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,500,000円、(間接経費) 3,150,000円

研究成果の概要(和文)：量子ドットの電流電圧特性を測定する実験は広く行われています。しかし、それに対応する理論には決定的なものはありません。本研究では従来の手法と独立で相補的な手法を開発しました。我々の方法は、電子間相互作用のない場合に決定的な手法であるランダウアー公式を、相互作用がある場合に自然に拡張した理論になっています。

その手法を用いて、簡単な模型において厳密に電流電圧特性を求めたところ、電位差を増やすほど電流が流れにくくなる領域があることを見だし、その原因を明らかにしました。電子間相互作用のために2つの電子が互いに束縛し合う状態ができますが、その状態が量子ドットを通過できないために起こります。

研究成果の概要(英文)：Experiments that measure the current-voltage characteristics across a quantum dot have been widely done, but there have not been a decisive theory that explains the experimental results. We here proposed a new theory that is independent of and complementary to a preceding theory. Our theory is a natural extension of the Landauer formula, which is a decisive theory for non-interacting electron systems.

Our theory, when applied to a simple model of a quantum dot, yielded a phenomenon where we have a less current for a greater voltage drop. We explained the phenomenon in terms of a two-body bound state that appears because of the interaction. The current decreases because the two-body bound state cannot pass through the quantum dot.

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：量子ドット 電子間相互作用 電流電圧特性 ランダウアー公式 負の微分コンダクタンス 2体束縛状態

1. 研究開始当初の背景

相互作用のある量子ドットの電気伝導を厳密に、あるいは数値的厳密に計算する手法はほとんどありませんでした。特に、相互作用がない場合のランダウアー公式を拡張する形の計算手法はありませんでした。

2. 研究の目的

相互作用のある量子ドットの電流電圧特性をできるだけ正確に計算する新しい手法を開発します。

3. 研究の方法

ランダウアー公式の考え方を相互作用系に拡張します。まず、相互作用のある場合の多体散乱問題を解き、入射波が独立な平面波であるという境界条件のもとでの波動関数を求めます。次に、その波動関数に関して電流演算子の量子力学的期待値を求めます。最後に、入射波にフェルミ分布を与えて、それに関する統計力学的平均値を求めます。これによって、電位差がある場合の電流値を得ます。

4. 研究成果

共鳴準位模型やアンダーソン模型において上の手順を厳密に行い、電流電圧特性を得ました。また、一般の相互作用格子系に対する数値的厳密な計算手法を開発しました。

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 10 件)

N. Hatano, G. Ordonez, Time-reversal symmetric resolution of unity without background integrals in open quantum systems, arXiv:1405.6683 (2014). (査読なし、これ以外は全て査読有り)

N. Hatano, Equivalence of the effective Hamiltonian approach and the Siegert boundary condition for resonant states, Fortschritte der Physik 61 (2013) 238—249.

A. Nishino, T. Imamura, N. Hatano, Exact many-electron scattering states in a parallel-coupled double quantum-dot system, Journal of Physics Conference Series 343 (2012) 012087 (7 pages)

S. Garmon, I. Rotter, N. Hatano, D. Segal, Analysis technique for exceptional points in open quantum systems and QPT

analogy for the appearance of irreversibility, International Journal of Theoretical Physics 51 (2012) 3536—3550.

R. Nakano, N. Hatano, T. Petrosky, Nontrivial eigenvalues of the Liouvillian of an open quantum system, International Journal of Theoretical Physics, 50 (2011) 1134—1142.

N. Hatano, G. Ordonez, Resonant-state expansion of the Green's function of open quantum systems, International Journal of Theoretical Physics 50 (2011) 1105—1115.

A. Nishino, T. Imamura, N. Hatano, I-V characteristics of an open quantum dot with a Coulomb interaction: Extension of the Landauer formula with exact scattering eigenstates, Physical Review B 83 (2011) 035306 (17 pages)

S. Klaiman, N. Hatano, Resonance theory for discrete models: Methodology and isolated resonances, Journal of Chemical Physics 134 (2011) 154111 (9 pages)

K. Sasada, N. Hatano, G. Ordonez, Resonant spectrum analysis of the conductance of an open quantum system and three types of Fano parameter, Journal of the Physical Society of Japan 80 (2011) 104707 (27 pages)

T. Petrosky, N. Hatano, K. Kanki, S. Tanaka, Hofstadter's butterfly type of singular spectrum of a collision operator for a model of molecular chains, Progress of Theoretical Physics Supplement 184 (2010) 457—465.

N. Hatano, Resonant states of open quantum systems, Progress of Theoretical Physics Supplement 184 (2010) 497—515.

{ 学会発表 } (計 29 件)

N. Hatano, Time-reversal symmetric expansion of the time evolution operator of open quantum systems, APS March Meeting 2014, Denver, 2014.3.3

羽田野直道, 開放量子系における時間反転対称性の破れ、物性理論研究会、徳島、2013.9.28

羽田野直道, 2次固有値問題による共鳴状態の双直交基底の構成、日本物理学会、徳島大学、2013.9.25

N. Hatano, Complete and bi-orthogonal

basis for resonant states, invited talk, 12th International Workshop on Pseudo-Hermitian Hamiltonians in Quantum Physics, invited talk, Istanbul, 2013.7.5

西野晃徳、羽田野直道、G.Ordenez, 開放型二重量子ドットにおける多体束縛状態と多体共鳴、日本物理学会、広島大学、2013.3.27

N. Hatano, Complex eigenvalue problem of the Liouvillian of an open quantum dot system, invited talk, Resonances and Non-Hermitian Systems in Quantum Mechanics, Kyoto, 2012.12.13

N. Hatano, Complex eigenvalue problem of the Liouvillian of an open quantum system, invited talk, Many-Body Open Quantum Systems: From Atomic Nuclei to Quantum Optics, Italy, 2012.9.28

西野晃徳、羽田野直道、二重量子ドットにおける多体散乱状態の厳密解、日本物理学会、横浜国立大学、2012.9.21

羽田野直道、リウビリアン複素固有値問題を無近似で解く、日本物理学会、横浜国立大学、2012.9.20

N. Hatano, Complex eigenvalue problem of the Hamiltonian and the Liouvillian of an open quantum dot system, invited talk, Non-Hermitian Operators in Quantum Physics, Paris, 2012.8.28

N. Hatano, Exact solutions of complex eigenvalue problems of an open quantum-dot system, Complex Spectral Representation of the Hamiltonian and the Liouvillian in Nanoscience, Texas, 2012.5.18

西野晃徳、今村卓史、羽田野直道、並列二重量子ドットの同時占有率：多電子散乱状態による解析、日本物理学会、関西学院大学、2012.3.27

中野留里、森貴司、羽田野直道、T. Petrosky, 量子ドットのリウビリアン複素固有値問題と時間反転対称性の破れ、日本物理学会、関西学院大学、2012.3.24

N. Hatano, Resonant states of a quantum dot system and breaking of time-reversal symmetry, invited talk, Tamura Memorial Symposium – Frontiers in Nanoscience -, Osaka, 2011.12.4

N. Hatano, Complex eigenvalue problem of

the Liouvillian of a quantum dot system, invited talk, Simulation and Manipulation of Quantum Systems for Information Processing, Germany, 2011.10.19

N. Hatano, Resonance of open quantum systems and spontaneous breaking of time-reversal symmetry, invited talk, Quantum Physics with Non-Hermitian Operators, Germany, 2011.6.16

中野留里、森貴司、羽田野直道、T. Petrosky, 開放量子系のリウビリアン複素固有値問題と異種2粒子問題、日本物理学会、新潟大学、2011.3.26

西野晃徳、今村卓史、羽田野直道、並列2重量子ドットにおける多粒子散乱状態の厳密解、日本物理学会、新潟大学、2011.3.26

N. Hatano, Resonances of open quantum systems, invited talk, DMQS2010, Tokyo, 2011.2.16

A. Nishino, T. Imamura, N. Hatano, Exact many-electron scattering eigenstates in open quantum dot systems and their applications, invited talk, DMQS2010, Tokyo, 2011.2.16

中野留里、羽田野直道、T. Petrosky, 開放T型量子ドットにおけるリウビリアン非自明な固有値、日本物理学会、大阪府立大学、2010.9.26

羽田野直道、G.Ordenez, 量子ドットのコンダクタンスの共鳴状態展開、日本物理学会、大阪府立大学、2010.9.24

西野晃徳、今村卓史、羽田野直道、開放型量子ドットの普遍電流：多電子散乱状態による解析、日本物理学会、大阪府立大学、2010.9.24

R. Nakano, N. Hatano, T. Petrosky, Nontrivial eigenvalues of the Liouvillian, Statistical Physics of Quantum Systems, Tokyo, 2010.8.3

A. Nishino, T. Imamura, N. Hatano, Exact many-electron scattering states of an open quantum dot and an extension of the Landauer formula, invited talk, Statistical Physics of Quantum Systems, Tokyo, 2010.8.2

N. Hatano, Resonant spectrum analysis of the conductance of an open quantum system, invited talk, Statistical Physics of Quantum Systems, Tokyo, 2010.8.2

R. Nakano, N. Hatano, T. Petrosky,
Nontrivial eigenvalues of the Liouvillian of
an open quantum system, International
Conference on Statistical Physics
STATPHYS24, Australia, 2010.7.21

N. Hatano, G. Ordonez, Resonant-state
expansion of the Green's function of open
quantum systems, invited talk, Workshop
on non-Hermitian quantum mechanics,
China, 2010.6.23

R. Nakano, N. Hatano, T. Petrosky,
Nontrivial eigenvalues of the Liouvillian of
an open quantum system, invited talk,
Workshop on non-Hermitian quantum
mechanics, China, 2010.6.23

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等
<http://hatano-lab.iis.u-tokyo.ac.jp/hatano/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

羽田野直道(HATANO, Naomichi)・東京大
学・生産技術研究所・准教授

研究者番号：70251402

(2) 研究分担者

中村統太(NAKAMURA, Tota)芝浦工業大学・
工学部・教授

研究者番号：50280871

(3) 連携研究者

西野晃徳(NISHINO, Akinori) 神奈川大
学・工学部・准教授

研究者番号：00466848

(4) 研究協力者

Tomio Petrosky, Center for Complex
Quantum Systems, Department of Physics,
University of Texas, Senior Researcher

Gonzalo Ordonez, Department of Physics
and Astronomy, Butler University,
Associate Professor