

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：32702

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26400409

研究課題名(和文) 開放量子系における量子干渉と相互作用の協力現象:多電子散乱状態による解析

研究課題名(英文) Analysis of the interplay of quantum interference and interactions in open quantum systems by using many-electron scattering eigenstates

研究代表者

西野 晃徳 (Nishino, Akinori)

神奈川大学・工学部・准教授

研究者番号：00466848

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：多電子散乱状態の構成を通じて、開放量子系における量子干渉と相互作用の協力現象を研究しました。まず左右非対称な相互作用共鳴準位模型に対して、ランダウアー公式の拡張を通じて、電圧下での平均電流と平均ドット占有率を相互作用の1次で得ました。結果として、高バイアスでの電流の抑制と、非対称性による抑制電流の回復を示しました。次にドット間相互作用を持つ開放型二重量子ドットに対して、散乱状態の厳密解を構成しました。多体束縛状態の束縛長がドットの配置に依存することを見出しました。さらに電圧下での平均電流を相互作用の1次で得ました。この結果がケルディッシュ形式により再現されることを示しました。

研究成果の概要(英文)：We study the interplay of quantum interference and interactions in open quantum systems by constructing exact many-electron scattering states. First, we investigate the interacting resonant-level models which consist of two leads connected to a quantum dot with asymmetric interactions. We calculate average electric current and average dot-occupancy for the systems under bias voltages in the first order of the interaction. As a result, we observe the suppression of the electric current for large bias voltages and the restoration of the suppressed electric current due to the asymmetry of the systems. Next, we apply this method to open double quantum-dot systems with an interdot interaction. Exact many-electron scattering states tell us that the binding strength of many-body bound states depends on the arrangement of the two quantum dots. We also calculate the average electric current for the systems under bias voltages. We verify that the result is reproduced by the Keldysh formalism.

研究分野：物性基礎論

キーワード：量子ドット 量子輸送 量子干渉 開放量子系 散乱状態 厳密解 多体共鳴 多体束縛状態

## 1. 研究開始当初の背景

量子細線、量子ドットなどのナノスケール系は、ナノテクノロジーへの応用や量子計算機実現の観点などから、現在、活発に研究されています。その著しい特徴の一つは、低温で量子干渉長が試料サイズよりも長くなり、試料全体に広がった量子力学的状態が輸送特性を支配することです。近年、量子ドット系における近藤効果の観測を契機に、輸送現象における相互作用の影響が注目されています。一方、これらは相互作用系の非平衡現象であるため、理論的に正確に扱うのは難しいと考えられています。

ナノスケール系の輸送現象を線形応答領域を超えて扱う手法として、散乱状態のアプローチがあります。これはバイアス電圧下の系で実現される非平衡定常状態が量子力学的散乱状態であることに基づいています。散乱のアプローチにより得られるランダウアー公式は、量子ポイントコンタクトにおける電気伝導度の量子化等を説明します。しかし、その適用範囲は相互作用が無視できる場合に限られてきました。相互作用系への拡張を目指して、多電子散乱状態の構成が試みられましたが、他の手法の結果と一致するものは得られていません。

## 2. 研究の目的

本研究の第1の目的は、相互作用を持つ開放量子系における散乱状態の構成法を確立することにあります。特に2本の導線の分散関係が線形化された多重量子ドット系に対して、多電子散乱状態の厳密解を構成します。第2の目的は、この多電子散乱状態を用いて、多重量子ドット系の輸送特性に現れる量子干渉効果と相互作用の協力現象を線形応答領域を超えて解析することにあります。バイアス電圧下の系の非平衡定常状態の実現方法として、多電子散乱状態を用いたランダウアー公式の相互作用拡張版を提案します。平均電流、平均ドット占有率の計算により、輸送特性に現れる量子干渉と相互作用の協力現象を、多電子散乱状態に出現する多体束縛状態の言葉で理解します。

## 3. 研究の方法

まず、導線の分散関係が線形化された多重量子ドット系の多電子散乱状態の厳密解を構成します。この厳密解をもとに、相互作用による多体束縛状態と多体共鳴極の関係を解明します。スピン自由度のない二重量子ドット系から始め、その後、アハロノフボーム磁束を印加した場合、スピン自由度のある場合、さらに多重量子ドット系へと拡張します。次に、この厳密解をランダウアー公式の拡張に適用し、有限バイアス電圧下の系の平均電流、平均ドット占有率の

計算を行います。得られた統計平均に繰り込み群の手法を適用し、普遍形を得ます。これにより、輸送特性に現れる有限バイアス下での量子干渉と相互作用の協力現象を解明します。

## 4. 研究成果

(1) 左右非対称な相互作用を持つ共鳴準位モデルで記述される開放型量子ドットに対して、多電子散乱状態の厳密解を構成し、これを用いて平均電流・平均ドット占有率のバイアス電圧特性を解析的に得ました。相互作用共鳴準位モデルとしては、2本の導線が左右から量子ドットに接続された系を用い、導線量子ドットの結合と量子ドット付近のクーロン相互作用がともに左右非対称な場合を扱いました。また、導線の分散関係はフェルミエネルギー付近で線形近似しました。この系に対して、まず $N$ 電子散乱状態の厳密解( $N$ は任意)を構成し、これを用いて電流とドット占有率の量子力学的期待値を計算しました。次に左右の導線が化学ポテンシャルの異なる電子溜に各々接続していると仮定して、電子数 $N$ が無限大の極限(電子溜極限)をとることで、バイアス電圧下での平均電流・平均ドット占有率を相互作用パラメータの1次まで計算しました(ランダウアー公式の拡張)。さらに2つの物理量は導線のバンド幅に関する線形発散および対数発散を含み、同一の繰り込み群方程式(Callan-Symanzik 方程式)を満たすことから、2つの物理量が同一の近藤温度と非対称パラメータで特徴付けられる普遍形を持つことを示しました。得られた普遍電流の電圧特性においては、高バイアスにおける電流の抑制と、系の非対称性による抑制電流の回復現象を再現しました。ここで、相互作用パラメータの1次で抑制電流の回復を見るためには「導線と量子ドット間の結合」と「量子ドット付近のクーロン相互作用」の両方の非対称が必要であることを示しました。これは数値繰り込み群を用いた先行研究では解明されていなかった結果です。一方、普遍ドット占有率の電圧特性においては、系が対称な場合に現れるローレンツ型の電圧依存性に加えて、系が非対称な場合には対数型の依存性が現れることを見出しました。

(2) ドット間クーロン相互作用を持つ開放型二重量子ドットに対して、多電子散乱状態の厳密解を構成し、相互作用と量子干渉の効果として多体束縛状態が出現することを示しました。開放型二重量子ドットでは、スピン自由度は無視し、各量子ドット上のエネルギー準位は一つと仮定し、導線量子ドットの結合定数は任意の複素数値としました(図1)。結合定数を特殊値にとることで、直列・並列・T型などの様々な配置の二重量子ドット、またアハロノフボーム

磁場を印加した並列二重量子ドットが再現されます。この系において、任意の入射状態に対する多電子散乱状態の厳密解の構成法を確立しました。特に、自由電子平面波を入射状態とする場合に2電子・3電子散乱状態を具体的に構成しました。この厳密解は、従来のもののような積分や級数等を含む形式解ではなく、ペーテ仮説解でもありません。ドット間クーロン相互作用の効果により、入射平面波の一部は2体・3体束縛状態として散乱されることが分かります。ここで多体束縛状態の束縛長は2つの量子ドットの配置(すなわち量子干渉効果)の影響を受けます(図2)。また、多電子散乱状態における多体束縛状態の出現が散乱の共鳴により理解されることを示しました。量子ドットにおける(1体)散乱は(1体)共鳴状態を伴います。ドット間クーロン相互作用が存在する場合、この共鳴状態は他の電子による共鳴状態と組んで2体束縛状態として現れます。さらに、ドット間クーロン相互作用による2体散乱が2体共鳴状態を与え、これが3体束縛状態として現れます。このように「 $n$ 体共鳴状態が $(n+1)$ 体束縛状態を与える」という予想を厳密解により示すことができました。

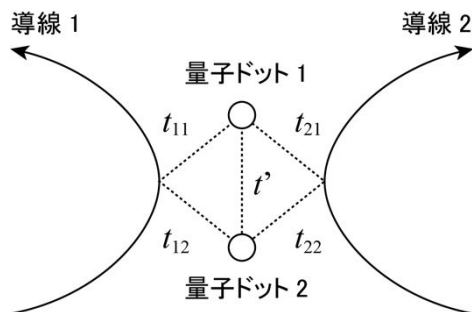


図1 開放型二重量子ドット

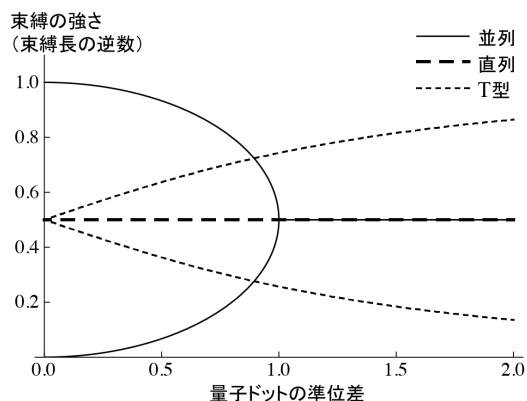


図2 2体束縛状態の束縛の強さ

(3) 開放型二重量子ドットに対して、多電子散乱状態を相互作用の1次で構成し、これをランダウアー公式の拡張に適用してバイアス電圧下の系の平均電流を解析的に計算しました。まず、(2)で扱った系に対して、

自由電子平面波を入射状態とする $N$ 電子散乱状態( $N$ は任意)を相互作用パラメータ $U$ の1次で構成しました。2電子・3電子散乱状態の厳密解と同様に、 $U$ の1次では2体束縛状態が現れます。これを用いて、電流演算子の量子力学的期待値を計算しました。次に電子溜極限から、バイアス電圧下の系に流れる平均電流の積分形を得ました。ここで相互作用の0次の項は従来のランダウアー公式で得られる結果を再現します。得られた積分形を解析的に評価し、相互作用の1次までの平均電流を明示的に得ました。平均電流はバイアス電圧に関する逆正接関数、有理関数、対数関数で書け、導線のバンド幅に関する発散は現れないことが示されました。また、得られた平均電流はケルディッシュ形式の非平衡グリーン関数で独立に計算した結果と解析的に一致しました。このことは、本研究で提案した非平衡定常状態の実現方法の妥当性を強く示唆しています。本研究成果に関しては、現在論文を執筆中です。

#### 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)

- (1) Gonzalo Ordonez and Naomichi Hatano, The arrow of time in open quantum systems and dynamical breaking of the resonance-anti-resonance symmetry, *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 査読有, Vol. 50, 2017, 405304, DOI: 10.1088/1751-8121/aa85ae
- (2) Gonzalo Ordonez and Naomichi Hatano, Irreversibility and the breaking of resonance-antiresonance symmetry, *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 査読有, Vol. 27, 2017, 104608, DOI: 10.1063/1.5001284
- (3) Naomichi Hatano and Joshua Feinberg, Chebyshev-polynomial expansion of the localization length of Hermitian and non-Hermitian random chains, *Physical Review E*, 査読有, Vol. 94, 2016, 063305, DOI: 10.1103/PhysRevE.94.063305
- (4) Ariel Amir, Naomichi Hatano and David R. Nelson, Non-Hermitian localization in biological networks, *Physical Review E*, 査読有, Vol. 93, 2016, 042310, DOI: 10.1103/PhysRevE.93.042310
- (5) Akinori Nishino, Naomichi Hatano and Gonzalo Ordonez, Exact scattering eigenstates in double quantum-dot systems with an interdot

Coulomb interaction, Journal of Physics: Conference Series, 査読有, Vol. 670, 2016, 012038,  
DOI: 10.1088/1742-6596/670/1/012038

(6) Kaoru Yamamoto and Naomichi Hatano, Thermodynamics of the mesoscopic thermoelectric heat engine beyond the linear-response regime, Physical Review E, 査読有, Vol. 92, 2015, 042165,  
DOI: 10.1103/PhysRevE.92.042165

(7) Savannah Garmon, Mariagiovanna Gianfreda and Naomichi Hatano, Bound states, scattering states, and resonant states in PT-symmetric open quantum systems, Physical Review A, 査読有, Vol. 92, 2015, 022125,  
DOI: 10.1103/PhysRevA.92.022125

(8) Naomichi Hatano and Tomio Petrosky, Eigenvalue problem of the Liouvillian of open quantum systems, AIP Conference Proceedings, 査読有, Vol. 1648, 2015, 200005,  
DOI: 10.1063/1.4912483

(9) Akinori Nishino, Naomichi Hatano and Gonzalo Ordonez, Universal electric current of interacting resonant-level models with asymmetric interactions: An extension of the Landauer formula, Phys. Rev. B, 査読有, Vol. 91, 2015, 045140,  
DOI: 10.1103/PhysRevB.91.045140

(10) Naomichi Hatano and Gonzalo Ordonez, Time-reversal symmetric resolution of unity without background integrals in open quantum systems, Journal of Mathematical Physics, 査読有, Vol. 55, 2014, 122106,  
DOI: 10.1063/1.4904200

〔学会発表〕(計 25 件)

(1) 西野 晃徳, 羽田野 直道, Gonzalo Ordonez, 開放型二重量子ドットの非平衡電流:多電子散乱状態による解析, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月 23 日, 東京理科大学

(2) Naomichi Hatano, Resonant-State Expansion in Open Quantum Systems, APTQS2017, 2017 年 12 月 9 日, Sun Yat-sen University, China

(3) Naomichi Hatano, Arrow of Time in Quantum Mechanics of Open Systems, EAJSSP2017, 2017 年 10 月 17 日, National Sun-Yet-Sen University, Taiwan

(4) 羽田野 直道, トミオペトロスキー, 開放量子系のリウビル演算子の複素固有値問題, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年

9 月 22 日, 岩手大学

(5) Naomichi Hatano, Non-Hermitian Quantum Mechanics of Open Systems, 2017, University of Firenze, Italy

(6) Naomichi Hatano, Arrow of Time in Quantum Mechanics, 2017, University of Lecce, Italy

(7) Naomichi Hatano, Resonant-State Expansion in Open Quantum Systems, META2017, 2017 年 7 月 25 日, Korea

(8) 羽田野 直道, 量子力学に現れる非エルミート固有値問題, 第 46 回数値解析シンポジウム, 2017 年 6 月 29 日, 滋賀県グリーンパーク想い出の森

(9) 西野 晃徳, 羽田野 直道, Gonzalo Ordonez, 開放型二重量子ドットの電流期待値:多電子散乱状態による解析, 日本物理学会 第 72 回年次大会, 2017 年 3 月 20 日, 大阪大学

(10) Gonzalo Ordonez, 羽田野 直道, 開放量子系における時間反転対称性の自己生成的な破れ, 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017 年 3 月 18 日, 大阪大学

(11) Ariel Amir, 羽田野 直道, David R. Nelson, 非エルミート・ランダム鎖における非局在転移, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月 14 日, 金沢大学

(12) 羽田野 直道, Non-Hermitian Localization and Delocalization in the generalized Feinberg-Zee Model, PHHQ16, 2016 年 8 月 12 日, 京都大学

(13) 羽田野 直道, Joshua Feinberg, 局在長の多項式展開:エルミート系と非エルミート系, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016 年 3 月 21 日, 東北学院大学

(14) Naomichi Hatano, Two methods of numerically computing the inverse localization length in one dimension, RMT2015: Random Matrix Theory, 2015 年 11 月 5 日, 沖縄科学技術大学院大学

(15) Naomichi Hatano and Gonzalo Ordonez, Arrow of Time in Quantum Mechanics, Kochi Quantum Week, 2015 年 10 月 12 日, 高知工科大学

(16) 羽田野 直道, 束縛状態から共鳴状態への変遷と反束縛状態の物理的描像, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月 16 日, 関西大学

(17) Naomichi Hatano and Gonzalo Ordonez, Arrow of Time in Quantum Mechanics, 2015 Mini-workshop on open quantum systems, 2015 年 8 月 29 日, National Center for Theoretical Sciences, 新竹, 台湾

(18) Naomichi Hatano and Gonzalo Ordonez, Arrow of Time in Quantum Mechanics, International Symposium on Foundation of Quantum Transport in Nano Science, 2015 年 8 月 18 日, 山梨大学

(19) Naomichi Hatano, Two methods of numerically computing the inverse localization length in one dimension, Quantum (and Classical) Physics with Non-Hermitian Operators (PHHQ13), 2015 年 7 月 14 日, Israel Institute for Advanced Studies, Jerusalem, Israel

(20) Akinori Nishino, Exact scattering eigenstates for double quantum-dot systems, The XXIIIth International Conference on Integrable Systems and quantum symmetries, 2015 年 6 月 26 日, Czech Technical University, Prague, Czech Republic

(21) Naomichi Hatano and Rikugen Takagi, Analytic Calculation of Non-Adiabatic Dynamics Around an Exceptional Point, PHHQ 2015, 2015 年 5 月 18 日, University of Palermo, Palermo, Italy

(22) 羽田野 直道, Gonzalo Ordonez, 開放量子系の新しい双直交基底による波束の散乱の解析, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 23 日, 早稲田大学

(23) 山本 薫, 羽田野 直道, メソスコピック系の熱流と粒子流の一般化オンサーガー関係式, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 21 日, 早稲田大学

(24) 西野 晃徳, 羽田野 直道, Gonzalo Ordonez, 開放型量子ドットのドット占有率: 多電子散乱状態による解析, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014 年 9 月 8 日, 中部大学

(25) 羽田野 直道, Gonzalo Ordonez, Time-reversal symmetric expansion of the Green's function of open quantum systems, CEWQO2014 --21th Central European Workshop on Quantum Optics, 2014 年 6 月 23 日, Brussels, Belgium

{ その他 }

ホームページ

<http://www.n.kanagawa-u.ac.jp/~nishino/>

<http://hatano-lab.iis.u-tokyo.ac.jp/research.html>

## 6 . 研究組織

### (1) 研究代表者

西野 晃徳 (NISHINO, Akinori)

神奈川大学・工学部・准教授

研究者番号: 00466848

### (2) 研究分担者

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