

機関番号：32702

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23740301

研究課題名(和文)多電子散乱状態による開放量子系における電気・スピン伝導の解析

研究課題名(英文)An analysis of the spin-dependent electron transport 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) 2,500,000円、(間接経費) 750,000円

研究成果の概要(和文)：多電子散乱状態の厳密解を通じて、開放型量子ドットの輸送特性と共鳴現象を調べました。まず、スピン自由度を持つ並列二重量子ドットの2電子散乱状態を厳密に構成し、クーロン相互作用の効果により、2体束縛状態が現れることを見出しました。また、この束縛状態が「共鳴状態と反共鳴状態の対」として理解できることを示しました。次に、相互作用共鳴準位モデルで記述される開放型量子ドットの電子輸送を調べました。ランダウアー公式の拡張により、有限バイアス下の系の平均電流を相互作用パラメータの1次で計算し、高バイアスでの電流の抑制(負性微分伝導度)と、系の非対称性による抑制電流の回復を見ました。

研究成果の概要(英文)：We investigate the transport properties and the resonant phenomena in open quantum-dot systems by constructing exact many-electron scattering eigenstates. First, we study a parallel-coupled double quantum-dot system and obtain the exact two-electron scattering eigenstates. We find that, as a result of the Coulomb interactions, two-body bound states appear in the scattering states. We also find that the two-body bound states are interpreted as pairs of the resonant states and the anti-resonant states. Next, we study the electron transport in the systems described by the interacting resonant-level models. By using an extension of the Landauer formula, we calculate the average electric current for the system under bias voltages in the first order of the interaction parameters. We observe the suppression of the electric current for large bias voltages, i.e., negative differential conductance, and the restoration of the suppressed electric current due to the asymmetry of the systems.

研究分野：物性基礎論

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 量子輸送 開放量子系 散乱状態 厳密解 共鳴状態 電流電圧特性 負性微分伝導度

### 1. 研究開始当初の背景

メゾスコピック系は、実験的にも理論的にも活発に研究されている分野です。例えば、量子ドットに電極をつないだ開放型量子ドットにおいては、非平衡近藤効果、クーロン閉塞などの電子間相互作用を考慮しなければ説明できない現象が報告されています。しかし、これらの現象は無限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。特に「電子間相互作用」と「電源による電位差」の両方を非摂動的に考慮した輸送現象の解析結果はほとんどありません。

開放量子系で非平衡定常状態を実現する手法として、比較的良好に研究されているのが非平衡グリーン関数の方法です。この方法により非平衡下にある相互作用系の電流公式が形式的には得られますが、実際の計算には摂動展開等の近似手法を必要とします。最もよく研究されている開放型量子ドットの模型、アンダーソン模型に対しては、相互作用の弱結合領域での2次摂動や、低バイアス領域での平均場理論が有効です。しかし、この手法では、摂動論を超えた解析は原理的に不可能です。

この状況を打開するためには何らかの非摂動的な手法が必要となります。平衡量子多体系に対する厳密解の手法としてはベテ仮説法が有名です。開放型量子ドットに対してもベテ仮説法の拡張が提案されていますが、線形応答領域を超えた解析では非平衡グリーン関数の方法と一致する結果が得られていません。これはベテ仮説による非平衡定常状態の実現方法が正しくないことを示唆しています。

### 2. 研究の目的

本研究の第一の目的は、開放型量子ドット系に対して、相互作用の効果を含み多電子散乱状態の厳密解を構成することにあります。非平衡下で実現される定常状態を念頭に置き、左右の導線から自由電子平面波として入射される多電子散乱状態を構成します。これは従来知られている平衡系の厳密解では記述できない状態です。この厳密解の具体形を用いることで、散乱の共鳴現象を非摂動的に調べることができます。第二の目的は、構成された多電子散乱状態を用いて、相互作用を含む開放型量子ドットの輸送現象を理論的に解析することにあります。ランダウアー公式を相互作用系に拡張し、これに多電子散乱状態の厳密解を適用することで、非平衡下の系の物理量を解析的に計算します。この結果により、ランダウアー公式のアプローチと非平衡グリーン関数の手法の等価性を議論します。これらの解析から、より複雑な開放量子系における非平衡定常状態の実現方法を確立します。

### 3. 研究の方法

(1) 相互作用を含む開放型量子ドットの多電子

散乱状態の厳密解を構成します。量子ドットに接続する導線の局所分散関係を線形化することにより、多電子散乱状態を決めるシュレディンガー方程式は1階の結合型偏微分方程式になり、厳密解の構成が可能になります。

(2) 多電子散乱状態の具体形を見ることにより、散乱の共鳴と多体束縛状態の関係を調べます。また、多体共鳴状態を定める Siegert 条件を見出します。

(3) ランダウアー公式の相互作用系への拡張を提案し、これに多電子散乱状態の厳密解を適用することにより、有限バイアス電圧下の系の物理量を計算します。まず、任意  $N$  に対する  $N$  電子散乱状態を用いて、物理量の量子力学的期待値を計算し、次に、この量子力学的期待値において、 $N$  が無限大の極限をとることにより、この物理量の統計力学的期待値を得ます。

### 4. 研究成果

(1) スピン自由度を持つ並列二重量子ドット系に対して(図1において  $t_{11}=t_{12}=t_{21}=t_{22}=t$ ,  $t'=0$  としたもの)、2電子散乱状態の厳密解を得ました。ここでは、導線の局所分散関係はフェルミ面付近で線形近似し、各量子ドットには(スピンに関して縮退した)エネルギー準位が1つだけ存在すると仮定し、これらをゲート電圧により独立に調整できるとしました。ゲート電圧差を有限にすることで、左右の導線をつなぐ2本の径路に、非自明な量子干渉がもたらされます。また、量子ドット上の局在電子に対して、ドット内クーロン相互作用とドット間クーロン相互作用の両方を考慮します。この並列二重量子ドット系に対して、自由電子平面波を入射状態とする2電子散乱状態の厳密解を構成し、散乱状態に現れる相互作用の効果調べました。結果として、ゲート電圧差が有限の場合には、クーロン相互作用により、自由電子平面波が部分的に2体束縛状態として散乱されることを見出しました。この束縛状態は、存在確率が2電子間距離に関して指数関数的に減衰する多体束縛状態です。その束縛長がゲート電圧差によってコントロールされることから、ここに2径路干渉効果が現れていることが分かります。

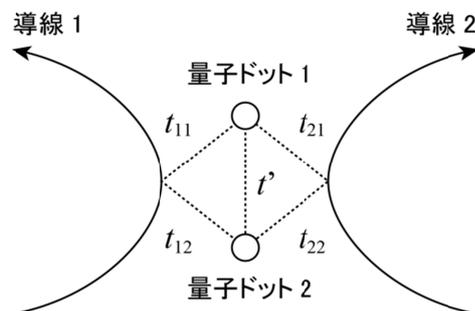


図1 二重量子ドット系

(2) 一般の結合定数を持つ開放型二重量子ドット系に対して(図1)、多電子散乱状態の厳密解

を得ました。この系は(1)の並列二重量子ドットを特殊な場合として含み、直列二重量子ドット(図1において  $t_{12}=t_{21}=0$ )、T型二重量子ドット(図1において  $t_{12}=t_{22}=0$ )、さらにアハロノフ-ボーム磁束が存在する場合を統一的に扱うことができます。様々な二重量子ドット系の結果を比較することで、多体束縛状態に現れる量子干渉効果が、明確になります。例えば、並列、T型の場合のように左右の導線をつなぐ2径路が存在する場合には、異なる束縛長を持つ二種類の二体束縛状態が現れ、直列の場合には一種類の二体束縛状態のみが現れます。

二重量子ドット系における多体束縛状態の出現を、散乱の共鳴現象を用いて説明しました。共鳴状態は散乱の共鳴極を固有エネルギーとする固有状態で、ヒルベルト空間には属しませんが、メソスコピック系の共鳴伝導や崩壊原子核の研究において重要な役割を果たすことが分かっています。本研究により、二体束縛状態は「一体散乱の共鳴状態と反共鳴状態の対」として理解できることが分かりました。同様に、三体束縛状態は二体共鳴状態により理解されます。また、この二体共鳴状態を定める Siegert 条件を見出しました。本研究成果に関しては、現在、論文を執筆中です。

(3) 開放型量子ドットのモデルとして、量子ドットに導線が左右非対称に接続された相互作用共鳴準位モデルを扱いました。2本の導線と量子ドット間のクーロン相互作用の強さ ( $U_1, U_2$  とする) は、一般に左右非対称であるとします。導線の局所分散関係はフェルミ面付近で線形近似します。この開放型量子ドットの多電子散乱状態の厳密解を構成しました。左右非対称な場合には、従来用いられてきた「導線2本の量子ドット系を2つの導線1本の系に写像する変換」が使用できないため、純粹なる導線2本の量子ドット系を扱う手法を開発する必要性がありました。これにより、任意の  $N$  に対する  $N$  電子散乱状態の厳密解を得ました。相互作用の効果は2電子束縛状態の組としてのみ現れることが分かりました。

この多電子散乱状態を「ランダウアー公式の拡張」に適用することにより、有限バイアス電圧下の系の平均電流を得ました。得られた平均電流は導線のバンド幅に対する紫外発散を含むため、これを繰り込み群の手法で処理し、近藤温度  $T_K$  と非対称パラメータ  $\delta$  ( $\delta=0$  が対称な場合  $U_1=U_2$ ,  $\delta=1$  が完全非対称な場合  $U_1=0, U_2=0$  に対応) で特徴付けられる普遍電流を得ました。得られた普遍電流の電流電圧特性(図2)から、クーロン相互作用により、高バイアスで電流が抑制される現象、負性微分伝導度を見ました。これは散乱状態に現れた2体束縛状態が導線での反射確率を増幅させることから説明できます。また、系の非対称性により、抑制された電流が回復することを確認しました。これらは数値繰り込み群による結果とも一致し、このことは本研究で提案したランダウアー公式の拡張が妥当であることを意味します。本研究成果に関しては、現在、論文を投稿中です。

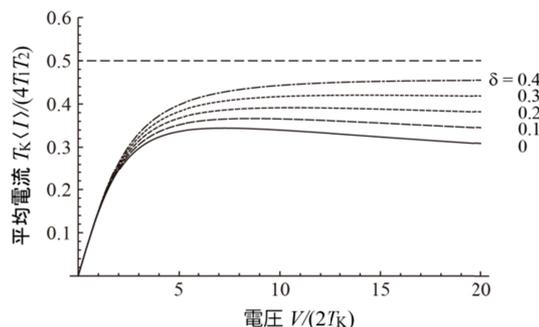


図2 相互作用共鳴準位モデルの電流電圧特性

## 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2件)

西野晃徳, 量子散乱状態とメソスコピック系の電気伝導, 神奈川大学工学研究所所報, 査読なし, Vol. 35, 2012, pp. 20-29

Akinori Nishino, Takashi Imamura and Naomichi Hatano, Exact many-electron scattering states in a parallel-coupled double quantum-dot system, J. Phys.: Conf. Ser., 査読有り, Vol. 343, 2012, 012087

DOI : 10.1088/1742-6596/343/1/012087

[学会発表](計10件)

西野晃徳, 羽田野直道, Gonzalo Ordonez, 非対称相互作用を持つ開放型量子ドットの IV 特性, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島大学 (2013 年 9 月 27 日)

Akinori Nishino, IV characteristics of open quantum-dot systems with asymmetric interactions, Mathematical Statistical Physics, Yukawa Institute of Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto, Japan (Aug. 2, 2013)

Akinori Nishino, Many-body resonances in double quantum-dot systems, STATPHYS25, Seoul National University, Seoul, Korea (July 25, 2013)

西野晃徳, 羽田野直道, Gonzalo Ordonez, 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, 日本物理学会第 68 回年次大会, 広島大学 (2013 年 3 月 27 日)

Akinori Nishino, Many-body resonance in double quantum-dot systems, Resonances and Non-Hermitian Systems in Quantum Mechanics, Yukawa Institute of Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto, Japan (Dec. 12, 2012)

Akinori Nishino, Exact scattering eigenstates of double quantum-dot systems with an interdot Coulomb interaction, Novel Development of Statistical Physics, The

University of Tokyo, Tokyo, Japan (Dec. 4, 2012)

Akinori Nishino, Exact scattering eigenstates of double quantum-dot systems with an interdot Coulomb interaction, International Workshop on Cooperative Quantum Dynamics and Its Control, Juelich Supercomputing Centre, Juelich, Germany (Oct. 29, 2012)

西野晃徳, 羽田野直道, 二重量子ドットの多電子散乱状態の厳密解, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 横浜国立大学 (2012 年 9 月 21 日)

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, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学 (2012 年 3 月 27 日)

Akinori Nishino, Exact many-electron scattering states of an open quantum dot and an extension of the Landauer formula, Quantum Theory and Symmetries 7, Bethlehem Chapel and Czech Technical University, Prague, Czech Republic (Aug. 12, 2011)

〔その他〕

ホームページ

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

## 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