

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：13501

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2023

課題番号：19K14611

研究課題名(和文) 開放量子系の非エルミート縮退点を活用した新奇なトポロジカル量子ポンプの理論構築

研究課題名(英文) Theoretical studies on quantum pumping effect encircling the Liouvillian exceptional point

研究代表者

橋本 一成 (Hashimoto, Kazunari)

山梨大学・大学院総合研究部・准教授

研究者番号：10754591

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：2つの電極と結合した量子ドットからなるメソスコピック系の電子ダイナミクスを記述する量子マスター方程式の時間発展生成子であるリウビリアン例外点の、電極間の電子輸送に対して与える物理的影響を研究した。パラメータの周期変調に対する電子ポンピング効果に対する影響の検討では、例外点がある有限の実部(緩和率)をもつ緩和モードに現れることを考慮して、緩和モードの効果を含む非断熱電子ポンピングに対する影響を分析し、過渡的電子流に例外点に起因するLandau-Zener振動の存在を明らかにした。また、定常電流ノイズに対する影響の検討では、例外点ノイズスペクトルに非ローレンツ型の線形を与えることを発見した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、メソスコピック系の電子輸送という基礎的にも応用上も重要な物理現象に対するリウビリアン例外点の影響を明らかにした点にあると考える。特に、定常電流ノイズスペクトル線形と例外点の次数との対応関係の発見は、メソスコピック系におけるリウビリアン例外点の実験的検出および分析において定常電流ノイズが有用なツールであることを初めて指摘したものであり、今後のリウビリアン例外点の実験的研究への波及効果が期待できる。

研究成果の概要(英文)：I have studied the physical effects of Liouvillian exceptional points on the electron transport in a mesoscopic system consisting of two electrodes and a coupled quantum dot. In the study of the effect on electron pumping effects, I analyzed the effect on non-adiabatic electron pumping including the effect of relaxation modes, considering that the exception point appears in relaxation modes with finite real part (relaxation rate), and clarified the existence of Landau-Zener oscillations in the transient electron flow caused by the exception point. In addition, in the study of the effect on the steady-state current noise, it was found that the exceptional point gives a non-Lorentzian lineshape to the noise spectrum.

研究分野：非平衡統計力学

キーワード：非エルミート 例外点 メソスコピック系

1. 研究開始当初の背景

エネルギーが保存する孤立量子系の時間発展がエルミートなハミルトニアンによって記述されるのに対し、外部環境と絶えずエネルギーや粒子を交換する開放量子系の時間発展は非エルミートな有効ハミルトニアンによって記述される。非エルミート演算子は、エルミート演算子には見られない特異なスペクトル構造を持ち、その代表的なものが例外点 (Exceptional point) である。例外点は通常の縮退点とは異なり、固有値のみでなく対応する固有ベクトルが一致し、その結果演算子是对角化できず、ジョルダン細胞構造をもつ。また、パラメータ空間では例外点から伸びる切断を境に2つの固有状態のリーマン面が交差しており、それを取り囲む閉じた経路に沿って制御変数を1周させることで2つの固有状態が入れ替わり、2周回すと状態が元に戻ると同時に位相因子がつく。この位相因子は経路の形状の詳細によらないトポロジカル不変量である。このような例外点の性質は、外界とエネルギーの流入・流出があるマイクロ波共振器など、非エルミート演算子で記述される古典電磁気学系などにおけるエネルギー輸送に対する効果が精力的に研究されてきたが、一方で開放量子系における量子輸送に対する効果は理論・実験ともにほとんど研究されていなかった。

2. 研究の目的

開放量子系のダイナミクスを記述する量子マスター方程式の時間発展生成子であるリウビリアン例外点の性質が量子輸送に及ぼす影響を明らかにする。特に、例外点を取り囲む閉じた経路に沿って系の制御パラメータを周期変化させた場合に生じる量子ポンピング効果に対する、例外点の効果を明らかにする。

3. 研究の方法

2つの電極に結合した量子ドットからなるメゾスコピック系における電子ダイナミクスを記述する量子マスター方程式に対して、その時間発展生成子であるリウビリアン固有値問題を解き、例外点の出現条件を調べる。次に、例外点およびその近傍における電子輸送を、ドット-電極間を輸送される電子の統計を計算する理論的手法である完全計数統計を用いて定式化し、電子輸送に対して例外点の効果が及ぼす影響を分析する。

4. 研究成果

(1) メゾスコピック系におけるリウビリアン例外点の検討

羽田野[Mol. Phys. 117, 2121(2019)]による先行研究によって、外部環境への散逸を伴い、周期外場で駆動された2準位系においては、周期外場による周期振動と散逸による指数減衰が競合する点においてリウビリアンが例外点を持つことが明らかにされていた。これを受けて、本研究では2重量子ドットが2つの電極と結合したメゾスコピック系に注目した。この系では、2重量子ドット間の電子のトンネリングによる周期的なラビ振動と、両端の電極への電子の散逸による指数減衰が共存しており、これらの競合によりリウビリアンが例外点を持つことが期待されたからである。そこで、図1(A)に示すような2重量子ドットのうち1つが2つの電極に結合し、もう一つの量子ドットがそれに側面から結合するモデルを考え、この系の電子ダイナミクスを記述する量子マスター方程式のリウビリアン固有値問題を考えた。この固有値問題は解析的に解くことができ、その結果、図1(B)に示す例外点を伴う複素固有値が得られた。

図1(B)から明らかなように、リウビリアン例外点は非ゼロの実部(固有モードの緩和率を表す)を有する緩和モードに出現することがわかった。このことから、量子輸送に対する例外点の効果を論じるには、例外点を含む緩和モードが関与する輸送現象に注目する必要があることが明らかにすることができた。

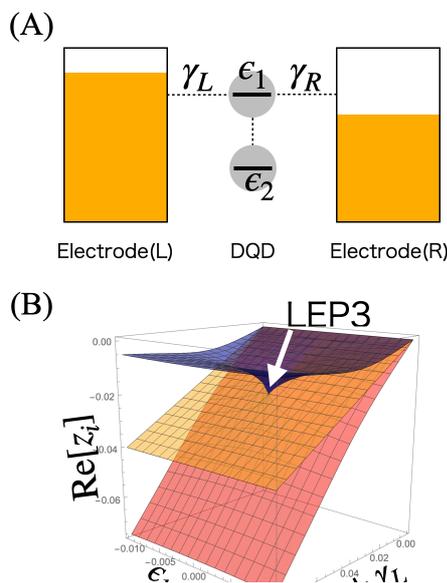


図 1(A) 2つの電極と結合した2重量子ドット系。(B) 2重量子ドット系のリウビリアン固有値(実部)がもつ3次例外点。

(2) 非断熱コントロール下での量子輸送の定式化

成果(1)により、例外点の効果を捕捉するためには有限の実部をもつ緩和モードが関与する量子輸送に注目する必要があることがわかった。Thouless ポンプに代表される断熱量子ポンピング効果は、リウビリアン固有状態に対応する定常状態がパラメータ変化に滑らかに追

随すると見做せる断熱近似が成り立つ時間領域で生じる現象であることから、例外点は断熱量子ポンピングには影響を与えないことが結論される。そこで、本研究では例外点に関与する量子ポンピングを議論するための予備的研究として、断熱近似を用いず緩和モードの寄与を含む非断熱量子ポンピングを定式化し、有限時間で駆動される熱ポンプ、スピンプンポンプおよび量子オートメカニクスに対して適用した。

### (3) 非断熱量子ポンピングに対する例外点の効果の検討

成果(1)および(2)で得られた知見を統合し、非断熱量子ポンピングの定式化をリウビリアンの緩和モードに例外点を有する2重量子ドット系に対して適用した。具体的にはドット間のエネルギー差とドット電極間の結合強度を有限時間で時間周期的に変化させ、1周期あたりに一方の電極から他方の電極に輸送された電子流およびその積算値を計算し、図1(B)の例外点を内部に含む経路と内部に含まない経路に対する電子流と積算値を比較することで、非断熱電子ポンピングに対する例外点の影響を検討した。その結果、例外点を内部に含む経路に対しては、例外点から伸びる切断を通過する際に、切断で交差するリウビリアンの固有モード間の非断熱遷移に起因するLandau-Zener振動が電子流の時間変化に現れるのに対して、例外点を内部に含まない経路に対してはLandau-Zener振動が現れないことがわかった。一方、電子流を1周期にわたって積分した輸送電子数の積算値に関しては、Landau-Zener振動の影響が平均化され、例外点を内部に含む経路と含まない経路の間に質的な違いが見られないことを明らかにした(図2)。

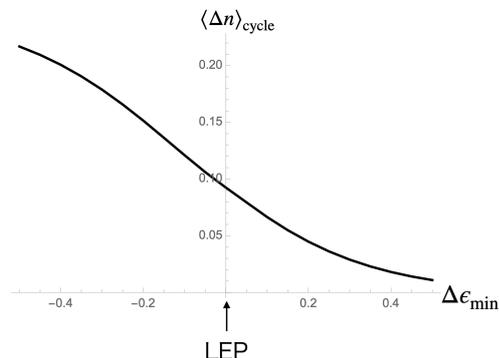


図2 量子ドット間のエネルギー差およびドット-電極間結合強度の有限時間周期変化に対する非断熱電子ポンピングの積算値。エネルギー差  $\Delta \epsilon_{\text{min}}$  がゼロの点で経路が例外点を跨ぎ、 $\Delta \epsilon_{\text{min}} > 0$  の領域では経路は例外点を含まず、 $\Delta \epsilon_{\text{min}} < 0$  の領域では経路が例外点を内部に含む。

### (4) 定常電流ノイズスペクトルに対する例外点の効果の検討

2重量子ドット系の電子輸送に対するその他の例外点の効果として、定常電流ノイズスペクトルに対する影響を検討した。定常電流ノイズスペクトルは、電極間を流れる電子流の定常状態に対する自己相関関数のパワースペクトルから得られ、定常電流の揺らぎとその緩和過程に関する情報を反映したスペクトル形状をもつ。例外点ではない点ではリウビリアンは対角化可能であり、各緩和モードはそれぞれの固有値の実部に対応する緩和率で指数減衰するため、それをフーリエ変換することで得られるノイズスペクトル線形は各緩和モードに対応するローレンツ関数の重ね合わせによって与えられる。それに対して、例外点においてはリウビリアンは対角化できずジョルダン細胞構造をもつため、緩和モードは指数減衰因子に時間冪がかかった臨界減衰を示し、それをフーリエ変換したノイズスペクトルの線形はローレンツ関数の導関数で与えられることを示した。また、臨界減衰の時間冪の次数は例外点の次数と一致するので、それをフーリエ変換したローレンツ関数の導関数の階数もまた例外点の次数と一致する。このことから、定常電流ノイズのスペクトル線形のローレンツ関数からのズレを観測することで、メゾスコピック系におけるリウビリアン例外点の存在を検出できるのみならず、そのスペクトル線形からリウビリアン例外点の次数も同定できることを明らかにした。これは、メゾスコピック系において、定常電流ノイズがリウビリアン例外点の検出および分析に有用なツールであることを指摘するものであり、今後のリウビリアン例外点の実験的研究に対して有用な知見を与えるものだと考える。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Hashimoto Kazunari、Uchiyama Chikako	4. 巻 24
2. 論文標題 Effect of Quantum Coherence on Landauer 's Principle	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Entropy	6. 最初と最後の頁 548 ~ 548
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/e24040548	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shirai Yuji、Hashimoto Kazunari、Tezuka Ryuta、Uchiyama Chikako、Hatano Naomichi	4. 巻 3
2. 論文標題 Non-Markovian effect on quantum Otto engine: Role of system-reservoir interaction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 23078
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.3.023078	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hashimoto Kazunari、Vacchini Bassano、Uchiyama Chikako	4. 巻 101
2. 論文標題 Lower bounds for the mean dissipated heat in an open quantum system	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 52114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.101.052114	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hashimoto Kazunari、Uchiyama Chikako	4. 巻 21
2. 論文標題 Nonadiabaticity in Quantum Pumping Phenomena under Relaxation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Entropy	6. 最初と最後の頁 842 ~ 842
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/e21090842	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hashimoto Kazunari, Tatara Gen, Uchiyama Chikako	4. 巻 99
2. 論文標題 Spin backflow: A non-Markovian effect on spin pumping	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 205304
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.205304	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計17件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 橋本一成
2. 発表標題 回転磁場による非断熱スピンプンピング
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazunari Hashimoto
2. 発表標題 Non-adiabatic spin pumping driven by a rotating magnetic field
3. 学会等名 International Workshop on Physics and Chemistry of Electronic Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 橋本一成
2. 発表標題 スピンプンピングに対する電子間相互作用の影響
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 橋本一成
2. 発表標題 メゾスコピック系の電流ノイズに対する例外点の影響
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazunari Hashimoto
2. 発表標題 Non-adiabatic spin pumping induced by periodic magnetic field: a master equation approach
3. 学会等名 REIMEI Workshop on “Open quantum mechanics in nuclear, hadron and condensed-matter systems” (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 橋本一成
2. 発表標題 2準位系を介した電子輸送における輸送経路干渉と例外点
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 橋本一成
2. 発表標題 非断熱電子ポンピングに対する例外点の影響
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加藤光生, 橋本一成, 内山智香子
2. 発表標題 共通熱浴を介した複数スピン群間の同期現象
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 加藤光生, 橋本一成, 内山智香子
2. 発表標題 共通熱浴を介したスピン間の同期現象 複素スペクトル解析
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田之口美秋, 橋本一成, 内山智香子
2. 発表標題 環境ノイズを活用した量子エネルギー輸送制御
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazunari Hashimoto, Gen Tatara, Chikako Uchiyama
2. 発表標題 Spin backflow: a non-Markovian effect on spin pumping
3. 学会等名 6th International Workshop on Statistical Physics and Mathematics for Complex Systems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazunari Hashimoto, Chikako Uchiyama
2. 発表標題 Non-Markovian effect on spin and charge pumping
3. 学会等名 Quantum Information Processing in Non-Markovian Quantum Complex Systems (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本陽之, 橋本一成, 内山智香子
2. 発表標題 非断熱スピンポンピングに対するクーロン相互作用の影響
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazunari Hashimoto, Chikako Uchiyama
2. 発表標題 Non-adiabatic electron pumping by bias voltage modulation
3. 学会等名 International Symposium on Hybrid Quantum Systems 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Haruyuki Yamamoto, Kazunari Hashimoto, Chikako Uchiyama
2. 発表標題 Interaction effect on spin pumping under magnetic precession
3. 学会等名 International Symposium on Hybrid Quantum Systems 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 橋本一成, 内山智香子
2. 発表標題 電位の連続周期変調による非断熱電子ポンピング
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazunari Hashimoto, Gen Tatara, Chikako Uchiyama
2. 発表標題 Spin backflow: a non-Markovian effect on spin pumping
3. 学会等名 Frontiers of Quantum and Mesoscopic Thermodynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

量子開放系動力学研究室ホームページ <a href="https://openqsys.yamanashi.ac.jp/">https://openqsys.yamanashi.ac.jp/</a>
--

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------