

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：14101

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(A））

研究期間：2019～2022

課題番号：18KK0385

研究課題名（和文）ナノスケール量子導体における熱流ゆらぎ測定の理論

研究課題名（英文）The measurement theory of heat current fluctuations through nanoscopic quantum conductors

研究代表者

内海 裕洋（Utsumi, Yasuhiro）

三重大学・工学研究科・准教授

研究者番号：10415094

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,700,000円

渡航期間： 7ヶ月

研究成果の概要（和文）：基課題の情報エントロピー・熱量・電荷量の揺らぎに関する理論的研究成果を実験研究と繋げる形で発展させることを目的とし、期間中以下の成果を得た。熱流揺らぎ分布測定の理論：ボーズ粒子系の熱流・情報流分布の一般表式を得て、超伝導量子伝送線の最大通信容量を得た。さらに波としての振る舞いが顕著に現れる領域において、分割数と注水定理の関係を得た。開放量子系の時間変化の原理的限界：オンチップ量子素子を念頭に、環境と弱く結合した量子系の時間変化に伴う熱力学的コストの原理的限界を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果は、統計・情報理論と量子輸送理論を融合し、超伝導量子回路素子の電気伝導、熱伝導現象を理論的に解析することで、その情報処理素子としての性能や測定素子としての感度の物理法則による原理的限界を明らかにしたという学術的意義をもつ。本成果は、近年見出された非平衡熱統計力学における普遍的関係式を適用したという側面もある。成果は、将来の効率的な量子デバイスの設計または性能評価の指針として利用できると期待される。

研究成果の概要（英文）：This research aimed to bridge the gap between the theoretical findings of the previous project, "Fluctuations of information, heat, and charge currents" (17K05575), and experimental studies. The following achievements were made during the research period: Firstly, a general expression describing heat flow and information flow in Bosonic quantum transport was derived. This expression can provide the maximum communication capacity of superconducting quantum transmission lines. Additionally, the relationship between the partition function and the water-filling theorem was established in the wave-like regime. Secondly, fundamental limits of time evolution in open quantum systems were explored. The study identified the principle limitations of the thermodynamic cost associated with transformations of quantum state weakly coupled to an environment. The results have potential applications in superconducting on-chip thermometers, bolometers, and single-electron turnstile devices.

研究分野：固体量子素子における非平衡輸送

キーワード：物性理論 メゾスコピック系 非平衡量子輸送 熱量揺らぎ測定 情報通信

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

本国際共同研究では、基課題(基盤研究(C)「メゾスコピック量子導体における情報流・熱流・電流のゆらぎ」研究課題 17K05575)において構築した、情報エントロピー(エンタングルメント・エントロピー)・熱量(熱力学的エントロピー)・電荷量の揺らぎに関する理論研究を、実験研究とつなげることを目的としている。基課題では、メゾスコピック2端子量子導体を対象に、通信路容量と非平衡定常状態におけるエンタングルメント・エントロピーとの関係を明らかにする等の成果を得ている。これは、統計・情報理論と量子輸送理論を組み合わせて、電気伝導、熱伝導現象を解析することで、固体量子素子を情報処理素子としての観点から研究する指針となりえるという学術的意義をもつと考えている。

情報量・熱量・電荷量の揺らぎの関連の理論の構築は進んだ一方、熱流揺らぎの測定は、電流揺らぎの測定に比べて困難であり、基課題の成果を実験で検証するためには、次の段階として熱量の揺らぎで測定できる量との関係を確立する必要がある。例えば、オンチップ超伝導トンネル接合熱量計や温度計の性能を特徴づける性能指数は、雑音等価電力や雑音等価温度である。さらには、単一電子ターンスタイル電流源の性能指数として周波数に関する応答性または感度を考えることができる。これらは情報理論的な量であり、熱流揺らぎの測定理論を構築し、基課題の研究を実験とつなげる形で発展させることを目的とする。

本国際共同研究では、基課題を実験と繋げる方向に発展させることを目的としていた。海外共同研究者が所属する Aalto 大学(フィンランド)のグループは、超伝導量子素子回路を用いたオンチップ温度計や、超伝導単一電子トランジスタ電荷計・電流標準などの計測手法の研究および超伝導量子ビットを用いた回路の量子熱力学の研究を専門とする低温物理実験のグループである。これまでに得られた成果について、以下に説明する。

2. 研究の目的

・「ボーズ粒子の量子輸送における情報量の揺らぎと最大通信路容量」

“Fluctuation of information content and the optimum capacity for bosonic transport”, The European Physical Journal Special Topics, Volume 230, Issue 4, p.1059-1066 (2021) [18pages] DOI: 10.1140/epjs/s11734-021-00074-4 における研究の目的:

情報理論の枠組みを用いて固体量子素子における量子輸送現象を解析することが目的である。基課題では Fermi 粒子である電子系に着目したが、本研究では Bose 粒子系に拡張する。これにより、超伝導量子回路における超伝導量子伝送線を伝搬する量子化されたマイクロ波信号を扱うことができるようになり、基課題と国際共同研究と繋がる。情報は、マイクロ波フォンの数にエンコードされ、通信路容量とは単位時間あたりに量子伝送線を流れる情報量の大きさとして定義される。Shannon によるガウス型通信路の理論では、信号の電力分布が正規分布に従う場合を扱うが、量子系においてはフォトンが Bose-Einstein 分布に従う場合に対応する。信号源または送信機から放出されるマイクロ波フォトンが運ぶ情報量の流れは、熱流すなわちエネルギー流(信号電力)と関係する。そのため、通信路容量は、熱流の Landauer 公式(量子輸送理論)に基づく方法で計算できることが、1960年代に指摘されている[Lebedev, Levitin, Sov. Phys. Dokl. 8, 377 (1963)]. 通信路容量が信号電力 P つまり熱流の関数として、通信路のバンド幅 B が狭く、信号量子の数が、利用できる信号のモードの数より十分小さい場合は、

$$C(\text{狭帯域}) = B \ln \left(1 + \frac{P}{hBf} \right)$$

となり量子ノイズ hBf (h は Planck 定数, f は信号の周波数)が Shannon による通信路容量を制約する。一方で、通信路のバンド幅 B が広い場合は、

$$C(\text{広帯域}) = \sqrt{\frac{2\pi^2 P}{3h}}$$

となることが示されている。これらの結果を、量子情報理論に基づいて導出することも可能である[Caves, Drummond, Rev. Mod. Phys. 66, 481 (1994)]. 与えられた信号電力を持つボーズ粒

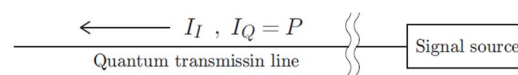


図1) 信号源(送信器)と量子通信路の模式図。ボーズ分布に従うフォトンが信号源から放出される。フォンは熱流 I_Q と情報流 I_I を運ぶ。

子の多体状態の数が、情報をエンコードできる最大の組み合わせに相当し、信号のエネルギーとエネルギーの不確定性の比の分割数としてあらわされる。

基課題ではエンタングルメント・エントロピーの分布の概念を用いることで、これらの一見全く異なる2つのアプローチの繋がりがあることを明らかにしたが、さらにフェルミ粒子系を用いた基課題では示すことができなかつた、ガウス型通信路理論とのつながりを明らかにすることを目的とした。

・「開放量子系における量子状態間変化の速さの物理限界」“Speed limits of the trace distance for open quantum system”, The New Journal of Physics, Volume 24, September 2022, p. 095004-1066 (2021) [15 pages] DOI 10.1088/1367-2630/ac8eca における研究の目的：

情報処理の性能は物理法則によって制約されることは、古くから知られている。例えば、量子状態間の変化の速度は、量子力学的エネルギーの揺らぎにより制限される [Mandelstam, Tamm, J. Phys. 9, 249 (1945)]。「ボーズ粒子の量子輸送における情報量の揺らぎと最大通信路容量」で述べた結果も、大まかには時間とエネルギーの不確定性が背後にあると捉えることができる。このような量子力学による限界の研究は、近年、古典系や開放量子系に拡張され、熱力学的不確定性や速度限界をはじめとする非平衡状態で成立する普遍的関係式の存在が明らかにされている。これらの関係式は確率熱力学の枠組みにおいて、Cramer-Rao 不等式といった統計・情報理論と密接な繋がりがあることも分かっており、現在も活発に研究されている。オンチップ温度計・熱量計や単一電子ターンスタイル電流標準も量子開放系であり、それらの性能は普遍的関係式により制限されることが期待される。本研究計画において、本研究はその橋渡しをする位置づけであり、量子系における速度限界の知見を得ることが目的である。

3. 研究の方法

・「ボーズ粒子の量子輸送における情報量の揺らぎと最大通信路容量」における研究の手法

非平衡量子導体の電流をはじめとした物理量の分布を求める理論である、経路積分形式の Keldysh 非平衡場の理論に基づいた完全計数統計理論の手法を用いた。基課題においても採用した閉時間経路のレプリカ法を用いて、整数時の Rényi エンタングルメント・エントロピーを計算することで、受信者側の自己情報量の分布の特性関数を求めた。

・「開放量子系における量子状態間変化の速さの物理限界」における研究の手法

外部環境の影響を受けた量子系の状態は、縮約密度行列によって記述される。環境の影響が弱い場合に着目し、非平衡量子開放系の状態の時間変化を扱う標準的な理論である、Lindblad 型の量子マスター方程式 (Gorini-Kossakowski-Sudarshan-Lindblad 方程式)を用いる。特に、相互作用表示を用いることで、コヒーレントな量子ダイナミクスを完全に取り入れた縮約密度行列に着目する。時間変化前と変化後の量子系の状態の違いを縮約密度行列のトレース距離で定量化し、外部環境がトレース距離に引き起こす制約を、量子情報理論等における不等式を用いて調べる。

4. 研究成果

・「ボーズ粒子の量子輸送における情報量の揺らぎと最大通信路容量」における研究成果

1) 熱流の計数場 χ を含んだ M 次の Rényi エンタングルメント・エントロピー $S_M(\chi)$ の解析的表式：受信側に熱雑音がなく、量子伝送線を完全に透過するとき、 $n_B(E)$ をエネルギー E のフォトンの Bose 分布、 τ を観測時間として、Rényi エンタングルメント・エントロピーは、

$$\ln S_M(\chi) = -\frac{\tau}{h} \int_{\Omega} dE \left[(1 + n_B(E))^M + n_B(E)^M e^{i\chi E/h} \right]$$

と与えられることを示した。この表式は熱流と情報流の同時確率分布の特性関数になっており、計数場で微分することで、情報流や熱流を計算することができる。積分領域 Ω を適切に選ぶことで「2. 研究目的」に提示した、広帯域や低帯域の通信路容量が導出することができ、Shannon によるガウス型通信路の理論を再現することも示した。さらに、信号電力 P での0次の Rényi エンタングルメント・エントロピー $S_0(P)$ が分割数となり、量子情報理論による導出とも整合性が取れていることを確認した。

2) 量子通信路における注水定理：1)の表式からは任意の積分領域 Ω における通信路容量も求めることができる。信号電力 P での0次の Rényi エンタングルメント・エントロピーは幾何分布のエントロピーを H_g とすると、 $\ln S_0(P) \approx \sum_{E \in \Omega} H_g(n(E))$ かつ $P \tau = \sum_{E \in \Omega} E n(E)$ とあらわされる。この結果は Lagrange の未定乗数 β が小さいとき、すなわち物理的には高温領域において、 $\ln S_0(P) \approx \sum_{E \in \Omega} \ln(\beta E)$ かつ $P \tau = \sum_{E \in \Omega} (1/\beta - E/2)$ と近似でき、係数 $1/2$ を除いて

ガウス型通信路における注水定理を再現する。注水定理と分割数の関係は、本研究で新たに得られた知見である。

・「開放量子系における量子状態間変化の速さの物理限界」における研究成果

初期時刻における量子系の密度行列を $\rho(t=0)$ とし、終時刻におけるそれを $\rho(\tau)$ とする（密度行列は相互作用表示で与えるものとする）。その間に増加した全系のエントロピー生成 σ 下界は、初状態と終状態の密度行列のトレース距離 $\|\rho(\tau) - \rho(0)\|_1$ および、量子系においてのアクティビティ（初期時刻から終時刻の間におこる量子跳躍の回数に関わる量） A を用いて、

$$\sigma \geq \|\rho(\tau) - \rho(0)\|_1^2 / A$$

となることを、先行研究[Vu, Hasegawa, Phys. Rev. Lett. 126 010601 (2021); Vu, Siato, Phys. Rev. Lett. 128 010602 (2022)]を拡張して導出した。この不等式は、環境との結合が弱い極限でも適用可能であり、先行研究を改善する具体例も2準位系の場合で示した。先行研究の改善の理由の一つは、本研究で用いたトレース距離が、先行研究で用いられていた距離よりも短くならないためである。以上の成果は、開放量子系に普遍的に成り立つものであり、オンチップ超伝導トンネル接合温度計・熱量計、また量子計算機等の計算速度と熱力学的コストの評価にも適用できると考えている。

また、海外共同研究者と共同研究の成果を共著で、国内学会および国際会議で報告している。成果を簡単に記述する。

・「数値くりこみ群によるボゾンの粒子浴に接続された超伝導量子ビットの解析」日本物理学会第76回年次大会2021：この研究では、超伝導量子伝送線に結合した超伝導量子ビットを透過する熱輸送現象の解析を念頭に、bosonの粒子浴に接続された超伝導量子 qubit の低エネルギー励起状態の性質を、boson系に対して拡張された数値くりこみ群を用いて調べた。系は非対称な相互作用を持つ近藤模型で記述できること、3電荷状態の場合のエントロピーは、温度の低下に伴い、2段階でゼロに近づく等の結果を得た。

・ "Computation time and thermodynamic uncertainty relation of Brownian circuits" Frontiers of Quantum and Mesoscopic Thermodynamics 2022 (FQMT'22)：「開放量子系における量子状態間変化の速さの物理限界」において用いた速度限界と同様な普遍的関係式である、熱力学的不確定性関係式を用い、ブラウニアン計算機の計算速度の限界を導出した。ブラウニアン計算機は、非同期に論理計算を行う装置であり、熱力学的な計算コストつまり発熱のない可逆計算のモデルとして、50年程前に提案されたもので、量子計算とも歴史的なつながりがある。この研究で得られた成果は、海外共同研究者と共著論文を執筆している[Computation time and thermodynamic uncertainty relation of Brownian circuits, arXiv:2205.10735; Thermodynamic cost of Brownian computers in the stochastic thermodynamics of resetting, arXiv:2304.11760]

当初予期していない事象により得られた新たな知見と今後の展望：

海外共同研究者は量子輸送理論の専門家であり、議論を通じて新しい展開、分子接合におけるカイラル誘起スピン選択の理論研究の方向を見出し、派生した成果を得ている。

海外渡航計画において、当初予期せぬ変更があった。当初は、前半の渡航を2019年9月26日～2020年2月12日に行った後、後半の渡航を2020年10月～2021年2月に行い、計8カ月程度渡航を行う計画であった。しかし前半の渡航の後、新型コロナウイルス感染症の流行が始まったため、渡航計画を変更し、補助事業期間延長を申請したうえで、2021年度および2022年度は延期し、後半の渡航を2022年7月17日～2022年10月10日に行った。渡航先との実験と連帯に支障をきたし、研究計画に遅れが出たため、今後もZoomを用いて共同研究を継続する予定である。後半の滞在中に得られた超伝導単一電子ターンスタイル素子の完全計数統計と運動論的不確定性関係に関する成果は、日本物理学会第78回年次大会（2023年）で発表し、論文としてまとめる予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

| | |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名 Nakajima Satoshi、Utsumi Yasuhiro | 4. 巻 24 |
| 2. 論文標題 Speed limits of the trace distance for open quantum system | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 New Journal of Physics | 6. 最初と最後の頁 095004 ~ 095004 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1367-2630/ac8eca | 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 Utsumi Yasuhiro、Kato Takemitsu、Entin Wohlman Ora、Aharony Amnon | 4. 巻 62 |
| 2. 論文標題 Spin Filtering in a p Orbital Helical Atomic Chain | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Israel Journal of Chemistry | 6. 最初と最後の頁 e202200107-1-8 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/ijch.202200107 | 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 Utsumi Yasuhiro | 4. 巻 1 |
| 2. 論文標題 Fluctuation of information content and the optimum capacity for bosonic transport | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 The European Physical Journal Special Topics | 6. 最初と最後の頁 1-8 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1140/epjs/s11734-021-00074-4 | 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 Utsumi Yasuhiro、Entin-Wohlman Ora、Aharony Amnon | 4. 巻 102 |
| 2. 論文標題 Spin selectivity through time-reversal symmetric helical junctions | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review B | 6. 最初と最後の頁 035445-1-17 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.102.035445 | 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 該当する |

| | |
|--|--------------------------|
| 1. 著者名 Entin-Wohlman Ora, Aharony Amnon, Utsumi Yasuhiro | 4. 巻 103 |
| 2. 論文標題 Comment on “ Spin-orbit interaction and spin selectivity for tunneling electron transfer in DNA ” | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review B | 6. 最初と最後の頁 077401-1-3 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.077401 | 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 該当する |

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 4件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 Y Utsumi, Y Ito, D Golubev, F Peper |
| 2. 発表標題 Computation time and thermodynamic uncertainty relation of Brownian circuits |
| 3. 学会等名 Frontiers of Quantum and Mesoscopic Thermodynamics 2022 (FQMT'22) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 中嶋慧, 内海裕洋 |
| 2. 発表標題 量子開放系におけるスピード限界：エントロピー生成と相互作用描像でのトレース距離 |
| 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 Nakajima, Y. Utsumi |
| 2. 発表標題 An asymptotic Expansion of Solution of Master Equation and its Application to Speed Limits |
| 3. 学会等名 International Symposium on Novel maTerials and quantum Technologies ISNTT 2021 (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Y. Utsumi, O. Entin-Wohlman, A. Aharony |
| 2. 発表標題 Spin Selectivity through Time-reversal Symmetric Helical Junctions |
| 3. 学会等名 International Symposium on Novel matTerials and quantum Technologies ISNTT 2021 (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 寺谷義道,内海裕洋,DmitryS.Golube |
| 2. 発表標題 数値くりこみ群によるボゾンの粒子浴に接続された超伝導量子ビットの解析 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会2021 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yasuhiro Utsumi, Ora Entin-Wohlman, Amnon Aharony |
| 2. 発表標題 Chirality induced spin selectivity through time-reversal symmetric helical molecular junctions |
| 3. 学会等名 American physical society (APS) March Meeting 2021 (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 内海裕洋, O. Entin-Wohlman, A. Aharony |
| 2. 発表標題 時間反転対称ならせん分子接合におけるスピフィルター |
| 3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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 |
|-----------|--------------------------------|-----------------------|----|
| その他の研究協力者 | 寺谷 義道 (Teratani Yoshimichi) | | |
| その他の研究協力者 | 中嶋 慧 (Nakajima Satoshi) | | |

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 | | | |
|---------|---------|--|--|--|
| フィンランド | アールト大学 | | | |