

令和元年6月14日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17723

研究課題名(和文)非平衡電子相関による電流揺らぎの解明とその解析手法の開発

研究課題名(英文) Study on current fluctuation due to electron correlations in nonequilibrium systems

研究代表者

阪野 隼 (Sakano, Rui)

東京大学・物性研究所・助教

研究者番号：00625022

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：半導体ナノスケール素子によって組み上げられた人工量子系中で観測される、量子多体効果の性質を電流揺らぎを用いて明らかにした。特に制御された素子の持つ対称性の効果と、多体効果によって形成された量子もつれ状態の特性を明らかにした。具体的にはカーボンナノチューブ量子ドットの近藤効果を磁場やゲート電圧、電極の接合を変化させることにより非線形電流や電流揺らぎに現れる、フェルミ流体特性を超えた補正項の性質を実験、理論により明らかにした。また、2重量子ドットに電流中に近藤効果によって励起された量子もつれの性質を明らかにし、ベルの不等式を用いた量子もつれによる非局所相関の実証方法を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で調べられた近藤効果は、電子による多体効果の最も基本的な現象である。その現象の低エネルギーでの発現機構は50年以上に渡って徹底的に研究されてきて、すでによくわかっている。しかし、動的性質についてはまだ未解決で重要な問題が多く、今日まで研究が続いている。さらに、近藤効果の動的性質の理解を深めることは、物質の機能・性質を明らかにする重要な鍵となる。また、近藤効果は磁気モーメントなど電子の持つ特性に非常に敏感であり、ナノスケール素子で量子多体効果の制御と観測の成功は、電子の性質を利用する新しい微小デバイスの加工、制御技術の向上に大きく貢献すると考えられる。

研究成果の概要(英文)：We have investigated properties of a quantum many-body effect in artificial quantum systems that are made of nanoscale semiconductor-devices, by means of observation of current fluctuations. We elucidate the effects of symmetries of the device structure and properties of quantum entanglement due to the many-body effect. Specially, we theoretically and experimentally elucidate properties of corrections of the local Fermi liquid in nonlinear currents and current fluctuations due to the Kondo effect in a carbon nanotube quantum dot with tuning an applied magnetic field, a gate voltage, and couplings of electric leads. We also reveal properties of quantum entanglement that is excited by the Kondo effect in the electric current, and suggest a way to execute Bell's test of the nonlocal correlation of the entanglement.

研究分野：物性理論

キーワード：近藤効果 量子ドット 非局所相関 量子輸送

## 1. 研究開始当初の背景

ナノスケールの半導体複合系などの人工量子系では、これまで直接観測することが難しかった、量子多体効果の様々な側面の実験検証を可能にした。たとえば、我々は実験グループと協力して量子ドットでSU(2)スピン近藤効果の非線形電流特性を詳しく調べ、電流ノイズから局所フェルミ流体状態で形成された相互作用する準粒子対の、直接的な観測に成功した。非常に対称性の高い系での観測においては、非線形電流とそのゆらぎの特性は局所フェルミ流体で記述できることが知られていたが、例えばドットの準位の変動、2つの電極との結合の変化、磁場の印加などによって対称性が破れた場合、どのように解析するべきかは未解決の問題であった。

更に発展した問題としては、電流ノイズによって観測された近藤量子ドットの非線形電流の準粒子対はどのように相関しているかも明らかにされていなかった。我々のこれまでの研究で2重量子ドットでは交換相互作用が強いとき、局所フェルミ流体効果により各ドットに繋がれたリード電極を流れる非線形電流間には量子もつれが現れることが明らかにしていた。しかし、どのような量子もつれ状態が現れるのか、また、交換相互作用の大きさが有限のときにどのように取り扱うべきか、そしてどのように量子もつれを観測すべきかなど、興味深くかつ重要な問題が未解決であった。

このように、量子ドットの非線形電流に現れる量子多体効果(局所フェルミ流体、近藤効果)は近年大きく発展した高感度の電流観測技術とナノスケール素子の加工技術の向上によって、実験と理論の両面から大きく進展しつつあったが、未解決の問題も多く残っていた。

## 2. 研究の目的

局所フェルミ流体や特異的フェルミ流体特性などを示す近藤効果が起こっている、カーボンナノチューブ量子ドット単体や、超伝導体などを含むナノスケールの量子複合系の特性を明らかにすることが本研究の目的である。特にこれらの系に誘起される電流や電流ゆらぎの線形応答を超えた特性を明らかにすることが目的である。最新の精度の高い実験研究との比較、検証、議論を行うため、定性的のみならず定量的にも高い水準の解析を目指した。さらに、本研究目的のために解析手法の開発を行うことも目的としていた。

具体的には、局所フェルミ流体相互作用によって形成される非平衡電流中の準粒子対のエンタングルメント特性の解明、粒子正孔非対称アンダーソン模型の非平衡電流のノイズ特性を解明、特異フェルミ流体状態の性質の解明を目的とした。

## 3. 研究の方法

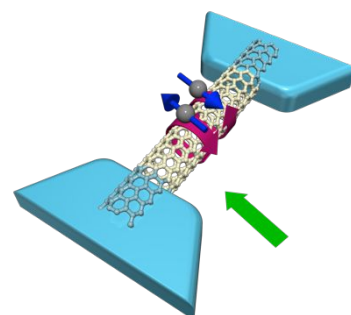
場の理論的手法を解析的手法を用いて、理論解析を行った。特にナノスケールの半導体で加工された人工量子系は実験と理論の結果がよく対応、一致する。そのため、定性的のみならず定量的にも信頼性が高い手法を利用して、理論解析を進める必要がある。本研究では、おもに以下の3つの手法を利用して解析を行った。

- (1) **局所フェルミ流体論** 低バイアス電圧による非平衡での近藤効果を正確に取り扱うため、繰り込まれた摂動論に基づいた局所フェルミ流体論を用いた。この手法は、現象論的フェルミ流体論と微視的フェルミ流体論を繋ぎ、1つの手法で強相関領域から弱相関領域カバーする強力な手法である。対称性が高い場合、バイアス電圧で非平衡下にあるときの物理量は電圧依存性の3次までについて、残留相互作用の2次摂動で正確に記述することができる。
- (2) **ケルディッシュ-グリーン関数** 非平衡下や有限温度での、量子多体効果が強く現れる系の物理量を解析するために、ケルディッシュのグリーン関数を導入する。
- (3) **完全係数統計** 電流の解析には完全係数統計、もしくは電流に対応した外源を導入した経路積分を利用した。係数場(外源)を有限に保ったまま生成母関数を計算すると、生成母関数には散乱過程に対応した係数場(外源)が現れ、注目している物理を引き起こす散乱現象の直感的な分類や理解を助ける。

## 4. 研究成果

### (1) カーボンナノチューブ量子ドットで起こる近藤効果の電流ゆらぎ観測実験と理論

大阪大学小林グループと共同研究を行い、カーボンナノチューブ量子ドット(右図)での、軌道自由度に起因した近藤効果の非線形電流と電流ノイズの超高感度の観測実験についての共同研究を行い、実験データの解析を行った。また、解析のための理論を構築した。



### 近藤多体状態の制御とショットノイズによる同定実験

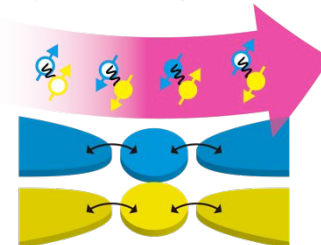
まず、カーボンナノチューブ量子ドット中の電子は巻方向の運動の自由度に起因した軌道の自由度を持つ。更にスピンの自由度を持つため、4つの縮退した状態によるSU(4)近藤効果が起こる。特にこれまで観測に成功していなかった、2つの電子が量子ドットに閉じ込められている場合のSU(4)近藤効果の観測に成功した。これはこれまでに観測されてきた電子が1つ閉じ込められている場合の近藤効果とは異なる配置の磁気モーメントの1重項を形成する。実際の量子ドットではスピン間のクーロン斥力に比べて、軌道間のクーロン斥力は小さいと予想され、2電子の場合は軌道間の電荷ゆらぎが抑えられ、各軌道それぞれでSU(2)近藤効果が起っている可能性があった。そこで非線形電流のショットノイズを調べ、ノイズのファノ因子は2電子SU(4)近藤効果に特有の値を示した。これにより、スピン間と軌道間のクーロン斥力の差は十分に小さく、電子数が2のSU(4)近藤効果を起こっていることの確認に成功した。さらに、磁場を印加し軌道とスピン自由度をそれぞれ分裂される。特に磁場の印加方向を調整することで、軌道分裂とゼーマン分裂の大きさが同じになるように制御した。これにより、2電子のSU(4)近藤効果から1電子のSU(2)近藤効果へのクロスオーバーの観測を行った。実際に有限磁場でのショットノイズのファノ因子を調べることで、これらの2つの近藤効果が同定され、クロスオーバー現象が現れることが確認された。

### 近藤領域周辺の量子ドットを流れる非線形電流の粒子正孔非対称と磁場による効果

最近、Moraらと小栗らによって、有限磁場が印加された場合やドットの準位を変動させて粒子-正孔対称性を破った場合の近藤効果の低エネルギー特性が明らかにされた。それによると、局所フェルミ流体論で知られている準粒子の残留相互作用の有限次数までの摂動展開だけでは説明することができず、3体相関に起因したフェルミ流体補正項の導入が必要であることが明らかにされた。この理論を実験結果に適用し、実際の電流のバイアス電圧に対する非線形応答から、3体相関効果の見積もりを行った。理論と比較し、初めてフェルミ流体補正項の検出に成功した。この研究を発展させて、左右のリード電極の結合非対称性やバイアス電圧印加の非対称性によって誘起される、フェルミ流体補正効果についても詳しく明らかにした。

## (2) 2重量子ドットの近藤効果による非線形電流のゆらぎ、交差相関と量子纏れ状態の理論

図のような各量子ドットにリード電極を2つずつ繋がれた2重量子ドット系を流れる電流と電流ゆらぎ特性を調べ、量子多体効果によって形成される量子もつれの性質を明らかにした。



### 2 軌道アンダーソン不純物模型の完全係数統計を用いた量子もつれ状態の解析

完全係数統計を利用して、左右のリード電極、各スピン・軌道チャンネルを流れる電流と電流ゆらぎを引き起こす個々の散乱過程を詳しく調べた。その結果、2重量子ドット間に働く交換相互作用により、スピン1重項と3重項の量子もつれ対が励起されることがわかった。さらにこの量子もつれは粒子対、正孔対、粒子-正孔対によって運ばれる。これらの解析により、電流中ではスピン相関の一部が打ち消し合っていることがわかった。また、交換相互作用は異なる3つのスピン軌道チャンネルの電流間での相関を引き起こすことがわかった。さらに、反強磁性的交換相互作用に対するショットノイズを調べ、特有の値を持つファノ因子が得られた。

### 電流相関に対するベルの不等式を用いた量子もつれの検出理論

右側の2つの端子間のスピン電流相関をとり、ベルの不等式から非線形電流中に励起された量子もつれの特性を調べた。前述のとおり、この系では複数の量子もつれが発生し、スピン相関の一部が打ち消し合って消えてしまっている。そこで、従来型のベルの不等式を適用するため、散乱状態を分析し有効的にスピン相関を運んだ電流を導出した。その結果、局所フェルミ流体の残留交換相互作用は、ベルの不等式を破る量子論らしいもつれ状態であることがわかった。しかし、実験では有効電流を分離してを検出することは難しい。そこで有効電流と全電流の比をとり、ベルの不等式の量子-古典境界に相互作用依存性を導入することで、実験検証可能なベルの不等式を導出した。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 6件)

“Bell-state correlations of quasiparticle pairs in the nonlinear current of a local Fermi liquid”

Rui Sakano, Akira Oguri, Yunori Nishikawa, and Eisuke Abe

Phys. Rev. B 99, 155106 (2019), 査読あり  
DOI:10.1103/PhysRevB.99.155106  
“非平衡状態にある近藤効果 (その1) 非平衡グリーン関数入門”  
阪野壘、小栗章  
固体物理, 628, 279-303 (2018), 電子版なし, 査読なし  
“Current cross-correlation in the Anderson impurity model with exchange interaction”  
Rui Sakano, Akira Oguri, Yunori Nishikawa, and Eisuke Abe  
Phys. Rev. B 97, 045127(2018), 査読あり  
DOI: 10.1103/PhysRevB.97.045127  
“Spin-dependent transport in multi-terminal Aharonov-Casher ring with quantum dot”  
Taku Matsunaga, Rui Sakano and Mikio Eto  
Journal of Physics: Conference Series, 864, 012059 (2017), 査読あり  
DOI: 10.1088/1742-6596/864/1/012059  
“非平衡電流ゆらぎでみる量子ドットの電子多体効果”  
阪野壘  
物性研究電子版 6, 064208/1-23 (2017), 査読なし  
DOI: 10.14989/229030  
“Quantum Fluctuations along Symmetry Crossover in a Kondo-Correlated Quantum Dot”  
Meydi Ferrier, Tomonori Arakawa, Tokuro Hata, Ryo Fujiwara, Raphaëlle Delagrangé, Richard Deblock, Yoshimichi Teratani, Rui Sakano, Akira Oguri, and Kensuke Kobayashi  
Phys. Rev. Lett. 118, 196803 (2017), 査読あり  
DOI:10.1103/PhysRevLett.118.196803

[学会発表](計 17件)

Rui Sakano, Akira Oguri, Yunori Nishikawa, Eisuke Abe  
“A measurable form of Bell's correlation of spin currents across a double dot in the Kondo regime”  
American Physical Society March Meeting 2019, 2019年  
Rui Sakano  
“Spin current correlation in a three terminal quantum dot”  
Topological Phases and Functionality of Correlated Electron Systems, 2019年  
阪野壘  
“多端子量子ドットのスピンの交差相関”  
強相関電子系理論の最前線, 2019年  
阪野壘  
“フェルミ流体のベル相関”  
研究会&科研費報告会「メゾスコピック系における非平衡スピン輸送の微視的理解とその制御」, 2018年  
Rui Sakano  
“Spin current correlation in a three terminal quantum dot”  
International Symposium on Frontiers of Quantum Transport in Nano Science, 2018年  
Rui Sakano, Akira Oguri, Yunori Nishikawa  
“Bell pair creation in current of Kondo-correlated dot”  
APS March Meeting 2017, 2017年

日本物理学会での講演 (査読あり)

阪野壘, 小栗章  
“3端子量子ドットに生成されたベル状態”  
日本物理学会第74回年次大会, 2019年  
堤和彦, 寺谷義道, 小栗章, 阪野壘  
“Anderson 不純物の非線形応答に対するトンネル結合の非対称性の効果”  
日本物理学会第74回年次大会, 2019年  
小栗章, 寺谷義道, 阪野壘  
“多軌道・電子 - 正孔非対称 Anderson 不純物に対する高次 Fermi 液体補正 II”  
日本物理学会 2017年秋季大会, 2018年  
秦徳郎, 荒川智紀, Lee Sanghyun, 小林研介, Meydi Ferrier, Raphaëlle Delagrangé, Richard Deblock, 寺谷義道, 小栗章, 阪野壘

“近藤効果における3体相関の実験的検出”  
 日本物理学会 2017 年秋季大会、2018 年  
 阪野壘、小栗章、秦徳郎、寺谷義道、Meydi Ferrier、荒川智紀、小林研介  
 “結合非対称な近藤ドットの電流ノイズ”  
 日本物理学会 2017 年秋季大会、2017 年  
 阪野壘、小栗章  
 “発表標題：軌道縮退不純物アンダーソン模型の繰り込まれた摂動論”  
 日本物理学会 2017 年秋季大会、2017 年  
 寺谷義道、小栗章、阪野壘、Meydi Ferrier、荒川智紀、秦徳郎、小林研介  
 “磁場による SU(4) から SU(2) 近藤状態へのクロスオーバー：NRG による有限温度の解析”  
 日本物理学会第 72 回年次大会、2017 年  
 秦徳郎、Meydi Ferrier、荒川智紀、小林研介、Raphaelle Delagrangé、Richard Deblock、  
 Helene Bouchiat、阪野壘、寺谷義道、小栗章  
 “近藤効果が発現する量子ドットにおける励起スペクトル”  
 日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年  
 寺谷義道、小栗章、阪野壘、Meydi Ferrier、荒川智紀、秦徳郎、小林研介  
 “カーボンナノチューブ量子ドットにおける近藤効果：スピン軌道相互作用と Hund 結合  
 の影響”  
 日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年  
 小栗章、寺谷義道、阪野壘、Meydi Ferrier、荒川智紀、秦徳郎、小林研介  
 “SU(N)-M 電子近藤 singlet 状態の局所電子分布”  
 日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年  
 阪野壘、小栗章、西川裕規、阿部英介  
 “局所フェルミ流体のベル相関と完全計数統計”  
 日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年

[その他]

- ・プレスリリース  
 “近藤効果の内部構造と量子ゆらぎの解明に成功”  
<http://www.iissp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/news2.html?pid=608>
- ・第 61 回物性若手夏の学校 集中ゼミ講師  
 “非平衡電流ゆらぎでみる量子ドットの電子多体効果”  
 (長野県ホテルシャレードイン志賀、2016 年 8 月 1 日)
- ・Activity report 2017 / The Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo  
 ISSN 2189-6070  
 “Crossover between Kondo States in Carbon Nanotube Quantum Dot Observed by an  
 Ultrasensitive Noise Measurement”  
<http://www.iissp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/docs/ar2017.pdf>

## 6. 研究組織

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：小栗 章  
 ローマ字氏名：OGURI, Akira  
 研究協力者氏名：小林 研介  
 ローマ字氏名：KOBAYASHI, Kensuke

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、研究者個人に帰属されます。