

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20540319

研究課題名(和文)量子ドット・ナノ物質系における近藤効果の理論的研究

研究課題名(英文)Theoretical study of the Kondo effects in quantum dots and nanomaterials

研究代表者

小栗 章 (OGURI AKIRA)

大阪市立大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：10204166

研究成果の概要(和文)：半導体ヘテロ接合やカーボンナノチューブ等で実現される量子ドット系の輸送現象に対する電子間相互作用の効果を調べた。特に3重量子ドット系における長岡強磁性と近藤効果の競合、超伝導接合系においてジョセフソン効果・アンドレーエフ共鳴・電子相関の協演により多彩な量子状態が出現すること等を数値くりこみ群を用い示した。また、ショットノイズなど非平衡特性の低エネルギー領域のユニバーサルな振る舞いを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We have studied many body effects on transport through quantum dots, realized in heterostructures, carbon nanotube, and so on. Specifically, we have investigated competition between Nagaoka ferromagnetism and Kondo effect taking place in triple dots. Furthermore, we have shown, using the numerical renormalization group approach, that interplays between the Josephson effect, Andreev resonance, and strong correlation provide interesting variations in the ground states. We have also studied the Kondo behavior of nonequilibrium transport, such as the shot noise and steady current.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度	0	0	0
年度	0	0	0
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性I

キーワード：量子ドット, 近藤効果, 強相関電子, 非平衡電流, 超伝導, 数値くりこみ群, メゾスコピック系, アンドレーエフ散乱

## 1. 研究開始当初の背景

量子ドットにおける近藤効果は、Glazman と Raikh, Ng と Lee 等がその可能性を指摘した1988年頃から、理論および実験の両側面から盛んに研究され、世界の物性研究の中で大きな潮流のひとつを形成している。特に1998年、Goldhaber-Gordan, および Kouwenhoven 達のグループが半導体量子ドットにおいて近藤効果の観測を成功したことにより、確か

な実現性が加わり、その後の研究に拍車がかけられた。量子ドット系の特徴のひとつは、従来の希薄磁性合金における近藤系に比べると、舞台となる離散量子準位と母体の伝導電子系を特徴づけるパラメータを実験的に広い範囲で制御することができる点にある。例えば、電極やゲート電圧の調整により、量子ドットとリード間の結合の強さ、量子準位のエネルギーなどの制御がされる。また、1個の量子準位を介した電流電圧特性の測定が

可能であることも、磁性不純物系との大きな相違点であり、磁性と輸送的性質が密接に関連した多彩な現象もこのことに依っている。さらに、複数の軌道自由度の効果、2重量子ドット、AB効果、Fano効果、超伝導体との接合によるAndreev散乱、Josephson効果、およびショットノイズなどの非平衡状態、といった多様な状況下において近藤効果がどのような変更を受け、それが輸送現象どのような影響を与えるか、さらなる実験、および理論の活発な研究を必要とする興味深い可能性が広がっている。これらの現象は、将来デバイスとして発展する応用上の可能性も秘めている。

## 2. 研究の目的

半導体ヘテロ接合やカーボンナノチューブなどで実現されている量子ドット系の輸送現象における多体電子相関の効果を理論的に調べ、新しい現象が現れる可能性を探索し、その背後にある普遍的な物理像を明らかにすることが研究の目的である。

(1) 第1研究対象は3角形3重量子ドットである。この系ではドット内の共鳴準位間を電子が周回するパスがあるため量子干渉効果と電子相関の協演により長岡強磁性やSU(4)軌道縮退を持つ多彩な近藤効果が起こり得る。これらが、ゲート電圧や3角形の対称性を破る摂動の効果の全貌を広いパラメータ空間の全領域で明らかにする。

(2) 第2研究対象は、Josephson効果と近藤効果、および超伝導/量子ドット/常伝導接合系におけるAndreev散乱と近藤効果の競合の問題である。特に、 $0\cdot\pi$ 接合状態間の量子相転移、および3端子の接合系における交差Andreev散乱とJosephson位相によるAndreev-近藤共鳴の制御について詳細に調べる。

(3) 第3の研究対象は、非平衡近藤系における非平衡定常電流、ショットノイズなどの低エネルギーFermi流体領域、および中間エネルギー領域における物性の解明と、くりこまれた摂動論の応用等の有効理論・計算法の構築。

## 3. 研究の方法

我々は研究手法のひとつとして、計算機を用いた理論計算を行う。具体的には、拡張されたAnderson模型に基づき数値くりこみ群を用い、電気伝導度、磁気感受率、近藤温度、量子ドットのエントロピーなどの物理量を計算する。これには研究室所有の計算機サー

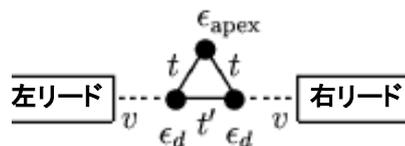
バーと京都大学基礎物理学研究所の共同利用のスーパーコンピュータを用いる。

もうひとつのアプローチとして、場の理論の手法による解析的な計算、および問題の一般的な定式化を用いる。特に、Wardの恒等式、Green関数を用いた微視的な局所Fermi流体論、くりこまれたパラメータによる摂動展開等を数値計算と併用し、総合的に問題に取り組む。

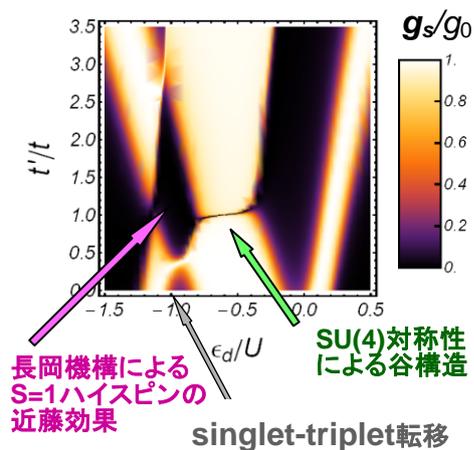
小栗は研究代表として研究課題全体の総括を行った。特に研究目的(1)の理論計算の主たる部分を担当し、(2)、(3)の理論定式化および計算も分担した。研究分担者の西川は(1)の問題、および関連する軌道縮退のあるAnderson模型の低エネルギーの性質を数値くりこみ群を用い調べた。研究協力者のHewsonはくりこまれたパラメータによる摂動論の非平衡近藤効果、および軌道縮退系への拡張を議論した。田中洋一は、(2)の超伝導接合系に関する近藤効果の主たる計算とまとめを行った。阪野聖は、(3)のショットのノイズの理論の主たる計算とまとめを行った。島本将志は(1)の計算の一部を担当した。

## 4. 研究成果

(1) 3角形3重量子ドットの研究では、下図のように左右のリードに接続されたAnderson模型を用いた：

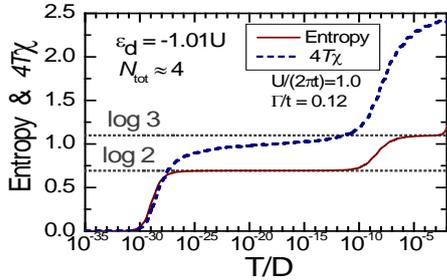


基底状態の2端子コンダクタンス ( $U=2\pi t$ )



上図は、絶対零度におけるである。量子準位の位置 $\epsilon_d$ およびドット間の混成要素の非対称性 $t'/t$ のパラメータ空間で、通常の $S=1/2$ 近藤効果による $g_0=2e^2/h$ となる領域に加え、長岡機構による $S=1$ 近藤効果、SU(4)近藤効

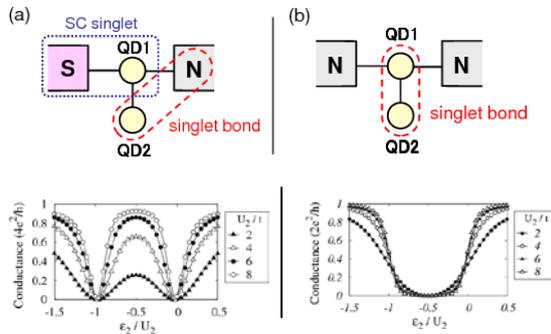
果, singlet-triplet 転移を反映した多彩な振る舞いが見いだされた. この  $S=1$  の局在モーメントは低温で伝導電子により遮蔽される. 偶奇の対称性を持つ2つの伝導チャンネルの寄与は異なるエネルギーで特徴づけられ, 下図のように高温から温度をさげると2段階の近藤遮蔽が起こることが分かった.



量子ドット部のエントロピーと帯磁率の温度依存性 ( $S=1$  モーメントを持つ領域)

このような多彩さは, 3 角形 3 重量子ドット系でドット内準位の軌道縮退が歪の効果を通して変化したためである. 広いパラメータ空間内における近藤状態の複雑な変化を明らかにした点は重要な成果のひとつである.

(2) 量子ドットと超伝導体の接合系の研究の一つとして, 下左図のような2個のドットが超伝導 (S) と常伝導 (N) のリードに接続され干渉効果, 近藤効果, Andreev 散乱の共存・競合する場合の基底状態の性質を調べた:

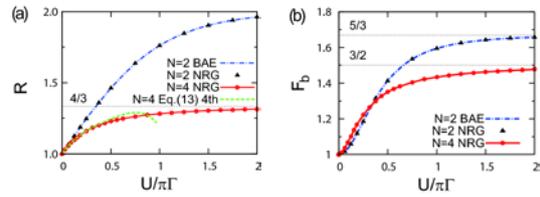


下側の図はコンダクタンスをサイドドット (QD2) の量子準位の関数として計算した結果であり, クーロン斥力  $U_2$  の値を変えたいくつかの例である. 右側の図は左右の電極がともに常伝導体の場合の結果であり, 横軸中央の領域ではサイドドットの平均電子数が1個になり局所モーメントが近藤遮蔽を受けるがコンダクタンスは干渉効果により抑制される. 我々は超伝導接合の場合は, この抑制が解放されコンダクタンスが増大することを見出した. これは, 電極から波動関数の超伝導成分がドット1にの侵入し遮蔽を起こすスピン相関の近藤雲の位相がずれることで説明されることを示した. この研究は田中洋一が勢力的に進め, 独創性が評価されている.

(3) 非平衡近藤効果におけるショットノイズに対する軌道縮退  $N$  の効果を低エネルギーの Fermi 流体領域で調べた. 阪野聖を中心に, 藤井達也 (東大物性研) との共同研究で, くりこまれた摂動論によりこの系の電流ノイズに関する Fano 因子  $F_b$  の表式を導出した

$$F_b = \frac{S_h}{2eI_b} = \frac{1+9(N-1)(R-1)^2}{1+5(N-1)(R-1)^2}$$

ここで  $R$  は Wilson 比であり, 平衡系の基底状態の相関関数として定義される.  $N=2$  と  $N=4$  では  $R$  は下左図のように厳密に計算され, その結果と上の表式から右下図のように Fano 因子の斥力  $U$  の弱相関から強相関へのクロスオーバーの詳細を明らかにした.



これまで強相関の極限に関する先行研究はあったが, 強相関系での公式の導出と全領域での振る舞いを示したことの意義は大きい.

## 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 16 件)

- ① A. Oguri, S. Amaha, Y. Nishikawa, T. Numata, M. Shimamoto, A.C. Hewson and S. Tarucha, Kondo effects in a triangular triple quantum dot with lower symmetries, Physical Review B **83** (2011) 205304-1~205304-17, 査読有.
- ② R. Sakano, T. Fujii, and A. Oguri, The Kondo crossover in shot noise of a single quantum dot with orbital degeneracy, Physical Review B **83** (2011) 075440-1~075440-9, 査読有.
- ③ Y. Nishikawa, D.J.G. Crow, and A.C. Hewson, Renormalized parameters and perturbation theory for an n-channel Anderson model with Hund's rule coupling: Asymmetric case, Physical Review B **82** (2010) 245109-1~245109-9, 査読有.
- ④ Y. Nishikawa, D.J.G. Crow, and A.C. Hewson, Renormalized parameters and perturbation theory for an n-channel Anderson model with Hund's rule

- coupling: Symmetric case, Physical Review B **82** (2010) 115123-1~115123-9, 査読有.
- ⑤ Yoichi Tanaka, N. Kawakami, and A. Oguri, Correlated electron transport through double quantum dots coupled to normal and superconducting leads, Phys. Rev. B **81** (2010) 075404-1~075404-11, 査読有.
- ⑥ Y. Nisikawa, M. Ibuki, and M. Usuda, Momentum-dependent resonant inelastic X-ray scattering at the Si K edge of 3C-SiC: A theoretical study on a relation between spectra and valence band dispersion, Physica B **405** (2010) 1415~1422, 査読有.
- ⑦ Y. Nisikawa, Electronic structure and momentum-dependent resonant inelastic X-ray scattering in broad band materials, Material Science Forum 645-648 (2010) 235~238, 査読有.
- ⑧ T. Numata, Y. Nisikawa, A. Oguri, and A. C. Hewson, Kondo effects in a triangular triple quantum dot: numerical renormalization group study in the whole region of the electron filling, Phys. Rev. B **80** (2009) 155330-1~155330-16, 査読有.
- ⑨ T. Numata, Y. Nisikawa, A. Oguri, and A. C. Hewson, Gate-voltage dependence of Kondo effect in a triangular quantum dot, J. Phys.: Conference Series **150**, (2009) 022067-1~022067-4 (2009), 査読有.
- ⑩ Yoichi Tanaka, N. Kawakami, and A. Oguri, Andreev Reflection and the Kondo Effect in Side-Coupled Double Quantum Dots, J. Phys.: Conference Series **150**, (2009) 022086-1~022086-4 (2009), 査読有.
- ⑪ Y. Nisikawa, and A. Oguri, Transport through a double quantum dot with interdot repulsion, J. Phys.: Conference Series **150**, (2009) 022066-1~022066-4 (2009), 査読有.
- ⑫ C. Karrasch, A. Oguri, and V. Meden, Josephson Current Through a Single Anderson Impurity Coupled to BCS Leads, Phys. Rev. B **77** (2008) 024517-1~024517-14, 査読有.
- ⑬ Yoichi Tanaka, N. Kawakami, and A. Oguri, Andreev Transport through Side-Coupled Double Quantum Dots, Phys. Rev. B **78** (2008), 035444-1~035444-6, 査読有.
- ⑭ Yoichi Tanaka, N. Kawakami, and A. Oguri, Andreev transport through double quantum dots: Numerical renormalization group approach, Physica E **40** (2008) 1618~1620 (2008), 査読有.
- ⑮ W. Koshibae, A. Oguri and S. Maekawa, Theoretical study of thermoelectric and Hall effects in the layered cobalt oxides  $\text{Na}_x\text{CoO}_2$ , J. Phys. Chem. Solids **69** (2008) 3214~3216, 査読有.
- [学会発表] (計 34 件)
- ① 阪野 塁, 小栗 章, 加藤岳生, 樽茶清悟, 軌道縮退アンダーソン模型の電荷揺動の完全係数統計への影響, 日本物理学会 (2011. 3. 28, 新潟大学).
- ② 島本将志, 小栗 章, 3 角形 3 重量子ドット系における長岡強磁性と Josephson 効果の競合, 日本物理学会 (2011. 3. 28, 新潟大学).
- ③ 小栗 章, 阪野 塁, 藤井達也, 電子正孔対称・軌道縮退 Anderson 模型の U に関する 3 ループ摂動理論, 日本物理学会 (2011. 3. 27, 新潟大学).
- ④ A. Oguri and Yoichi Tanaka, Josephson effect and Andreev scattering in a three-terminal quantum dot in the Kondo regime, American Physical Society March Meeting (March 24, 2011, Dallas).
- ⑤ A. Oguri, Kondo Effects in Triangular Triple Quantum Dot: Ground-State Properties, International workshop on Novel Research Aspects in Nano-Carbon Device (March 2, 2011, Osaka).
- ⑥ R. Sakano, A. Oguri, T. Kato, and S. Tarucha, Full Counting Statistics for

- Multi-Orbital Impurity Anderson Model of Quantum dot, International Symposium "Nanoscience and Quantum Physics 2011", (January 26, 2011, Tokyo).
- ⑦ A. Oguri and Yoichi Tanaka, Josephson current and Andreev reflection through a Kondo Y-junction, International Symposium on Nanoscale Transport and Technology (January 11, 2011, NTT Atsugi R&D Center).
- ⑧ R. Sakano, T. Fujii, and A. Oguri, Shot Noise of the Kondo effect in a quantum dot system, International workshop on Quantum Spintronics (October 18, 2010, Italy).
- ⑨ 小栗 章, 田中 洋一, 3 端子に接続された量子ドット系の Josephson 電流と Andreev-Kondo 共鳴, 日本物理学会 (2010. 9. 24, 大阪府立大学).
- ⑩ 島本 将志, 小栗 章, 準位構造が異なる 3 角形 3 重量子ドットの近藤効果, 日本物理学会 (2010. 9. 24, 大阪府立大学).
- ⑪ 阪野 壘, 藤井達也, 小栗 章, 量子ドット系での非対称アンダーソン模型のショットノイズ, 日本物理学会 (2010. 9. 24, 大阪府立大学).
- ⑫ 山田康博, 田中洋一, 川上則雄, 小栗 章, 超伝導相関のある量子ドットを介した常伝導リード間の非局所輸送特性: 数値くりこみ群による解析, 日本物理学会 (2010. 9. 24, 大阪府立大学).
- ⑬ 小栗 章, 天羽真一, 西川裕規, A C Hewson, 樽茶清悟, 沼田貴英, 3 重量子ドット系の近藤効果: 3 角形配列の歪の影響 II, 日本物理学会 (2010. 3. 20, 岡山大学).
- ⑭ A. Oguri, S. Amaha, Y. Nisikawa, A. C. Hewson, S. Tarucha, and T. Numata, Kondo effects in a triangular triple quantum dot II: Ground-state properties for deformed configurations, American Physical Society March Meeting (March 15, 2010, Portland).
- ⑮ Yoichi Tanaka, N. Kawakami, and A. Oguri, Correlated electron transport through double quantum dots coupled to normal and superconducting leads, American Physical Society March Meeting (March 15, 2010, Portland).
- ⑯ Yoichi Tanaka, N. Kawakami, and A. Oguri, Long-range Kondo singlet state in side-coupled double quantum dots, RIKEN Workshop on Emergent Phenomena of Correlated Materials (December 3, 2009, Wako).
- ⑰ Y. Nisikawa and M. Ibuki, Electronic structure and momentum-dependent resonant inelastic X-ray scattering in broad band materials, International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (2009. 10. 14, Nürnberg, Germany).
- ⑱ 小栗 章, 西川裕規, 田中洋一, 透過係数のゼロ点, および Andreev-Kondo 系における Fermi 流体状態, 日本物理学会 (2009. 9. 25, 熊本大学).
- ⑲ A. Oguri and Yoichi Tanaka, Josephson current through a Kondo Y-junction, International Symposium "New directions of superconducting nanostructures 2009" (September 5, 2009, Nagoya). ⑳
- ㉑ A. Oguri, Y. Nisikawa and Yoichi Tanaka, Ground-state properties of a single Anderson impurity coupled to superconductors, The 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (July 21, 2009, Kobe).
- ㉒ 小栗 章, 西川裕規, A. C. Hewson, 3 重量子ドット系の近藤効果: 3 角形配列の歪の影響, 日本物理学会 (2009. 3. 28, 立教大学).
- ㉓ 西川裕規, 小栗 章, 多端子対称ナノ構造体の基底状態の理論, 日本物理学会 (2009. 3. 27, 立教大学).
- ㉔ A. Oguri, T. Numata, Y. Nisikawa, A. C. Hewson, Kondo effects in triangular triple quantum dots, American

- Physical Society March Meeting (March 19, 2009, Pittsburgh).
- ②4 Yoichi Tanaka, N. Kawakami, A. Oguri, Andreev transport through side-coupled double quantum dots, American Physical Society March Meeting (March 19, 2009, Pittsburgh).
- ②5 A. Oguri, T. Numata, Y. Nisikawa, and A. C. Hewson, Kondo effects in triangular triple quantum dots, International Symposium on Nanoscale Transport and Technology (January 20, 2009, NTT Atsugi R&D Center, Honatsugi, Kanagawa).
- ②6 T. Numata, Y. Nisikawa, A. Oguri, and A. C. Hewson, Gate-voltage dependence of Kondo effect in a triangular quantum dot, The 25th International Conference on Low Temperature Physics (August 8, 2008, Amsterdam).
- ②7 Y. Nisikawa and A. Oguri, Transport through a double quantum-dot with interdot repulsion, The 25th International Conference on Low Temperature Physics (August 12, 2008, Amsterdam).
- ②8 Yoichi Tanaka, N. Kawakami, and A. Oguri, Andreev Reflection and the Kondo Effect in Side-Coupled Double Quantum Dots, The 25th International Conference on Low Temperature Physics (August 8, 2008, Amsterdam).
- ②9 小栗 章, 超伝導体に接続された量子ドット系の近藤効果, 基研研究会「不均一超伝導超流動状態と量子物理」(2008.7.31, 京都大学)
- ③0 A. Oguri, Fermi liquid and reduced density matrix approaches to a non-equilibrium current through an Anderson impurity, Workshop on Nonlinear Electron Transport in Nano-Junctions (July 7, 2008, The Niels Bohr Institute, Copenhagen).
- ③1 田中和典, 池田浩章, 西川裕規, 山田耕作, Periodic Anderson model を用いた CeMIn<sub>5</sub> の超伝導 pairing symmetry の計算日本物理学会 (2008.9.22, 岩手大学).
- ③2 小栗 章, 西川裕規, 量子ドット-ジョセフソン接合系における電流保存と Ward 恒等式, 日本物理学会 (2008.9.21, 岩手大学)
- ③3 田中洋一, 川上則雄, 小栗 章, T字型ダブルドット系における長距離的な近藤効果, 日本物理学会 (2008.9.21, 岩手大学).
- ③4 西川裕規, 小栗 章, 3つのリード線に接続された3重量子ドットの基底状態と輸送現象: NRG とフェルミ液体による解析, 日本物理学会 (2008.9.20, 岩手大学)
- [図書] (計1件)
- ① A. C. Hewson, A. Oguri, and J. Bauer, Renormalized Perturbation Approach to Electron Transport through Quantum Dots, *Physical Properties of Nanosystems*, edited by J. Bonča and S. Kruchinin (Springer, Dordrecht, 2011).
6. 研究組織
- (1) 研究代表者  
小栗 章 (OGURI AKIRA)  
 大阪市立大学・大学院理学研究科・教授  
 研究者番号: 10204166
- (2) 研究分担者  
西川 裕規 (NISHIKAWA YUNORI)  
 大阪市立大学・大学院理学研究科・講師  
 研究者番号: 60373239
- (3) 連携研究者  
 なし
- (4) 研究協力者  
 A. C. Hewson, Department of Mathematics, Imperial College, Senior Research Investigator.
- 田中 洋一 (TANAKA YOICHI)  
 理化学研究所・基礎科学特別研究員
- 阪野 塁 (SAKANO RUI)  
 東京大学・大学院工学系研究科・日本学術振興会特別研究員 (PD)
- 島本 将志 (SHIMAMOTO MASASHI)  
 大阪市立大学・大学院理学研究科・大学院生