

平成 21 年 4 月 30 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19540338

研究課題名（和文） 量子ドット複合系における多体効果と干渉効果

研究課題名（英文） MANY BODY EFFECTS AND INTERFERENCE IN QUANTUM-DOT SYSTEMS

研究代表者

川上 則雄 (KAWAKAMI NORIO)

京都大学大学院理学研究科・教授

研究者番号：10169683

研究成果の概要：本課題では量子ドットをベースとしたナノ量子複合系の電子相関と干渉効果の理論的研究を行った。特に、スピンおよび軌道自由度に起因する量子特性をアンダーソンモデルの厳密解、NCA近似などを用いて明らかにした。その結果、多軌道効果、近藤効果、干渉効果が織りなす新奇な輸送特性を見出した。さらに超伝導リードと結合した量子ドット系を考察し、近藤効果と超伝導相関の競合により生み出される多体効果を明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	800,000	240,000	1040,000
2008 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	1300,000	390,000	1690,000

研究分野：数理系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 I

キーワード：メゾスコピック系・局在、量子ドット、理論

1. 研究開始当初の背景

近年、量子ドットや量子リングなどのナノスケール電子系において、電子の電荷、スピン、軌道を制御する試みが精力的に行われている。これらナノスケール量子系には電子の多体効果が顕著に現れ、輸送特性や磁気特性に重要な役割を果たす。この典型例としてスピン軌道相互作用を用いたスピン制御に関する研究が脚光を浴びている。1990年 Datta と Das によって提案されたスピントランジスタを始めとし、NTT 物性科学基礎研究所の新田氏らによって提案されたスピン干渉デ

バイスなど、近年の半導体における新たな分野「スピントロニクス」として盛んに研究が進められている。また東京大学の永長氏らによって提案された半導体における電場誘起スピン流の理論は、スピン軌道相互作用を利用した外部電場によるスピン制御という点で画期的であり、実験の報告も最近行われている。

ナノ量子系の中でも、量子ドットはサイズが小さいことによる電子の量子性の顕在化と、パラメタの調整が容易であるという点を特徴としている。例えば、カーボンナノチュ

一重量子ドットや縦型量子ドットでは、対称性の高い形状を利用しこれに磁場をかけることで電子の軌道自由度を制御することが可能になっている。また、複数の量子ドットを接近させて並べることにより、それぞれのドット自体を軌道自由度として働かせることもできる。これらの軌道自由度による電子相関として近藤効果が注目され、実験的にも観測されている。この軌道近藤効果には、通常のスピンによる近藤効果とは逆に磁場によってコンダクタンスやスピン緩和率が増幅されるという特徴があり、これはスピンや電荷の制御の観点からも注目すべき現象である。

2. 研究の目的

以上述べたように、量子ドットや量子リングなどのナノスケール電子系において、電流の制御のみならずスピンや軌道自由度を利用した量子特性の制御に関する研究が急速に進展している。特に、ナノスケール系において、低温で重要となる電子間相互作用を取り入れた理論研究は現在進行中であり、解明されていない点も多い。このような背景のもと、本課題では量子ドットをベースとしたナノ量子複合系の電子相関と干渉効果の理論的研究を行うことを目的としている。特に、スピンおよび軌道自由度を利用した量子特性に重点をおく。このような電子の多体効果を取り入れた系統的な研究は、スピントロニクスや量子情報に関わる基盤研究としても重要であり、その研究が急務であると考えられる。

このような量子ドット複合系では、電子の多体効果・干渉効果が絡み合い、本研究の目的としている電荷、スピン、軌道の制御に適した系である。これらのテーマに共通する問題点は、常伝導、超伝導や強磁性などのリードに「多体の電子相関を含んだ量子ドット」を接合した場合どのような量子効果が現れるか、ということである。ここでは特に、「軌道自由度」が存在する量子ドット系や複数の伝播経路の存在する量子ドット複合系で、電子相関と干渉効果がどのように量子特性に影響を与えるかという点に焦点をあてる。これらの理論解析を基にして、電荷、スピン、軌道自由度の操作によって実現するナノ量子現象の特性を明らかにすることを目的とする。

ナノスケール電子系における電荷、スピン、軌道自由度の制御および応用に関する研究の中でも、電子の多体効果・干渉効果については解明すべき点が多い。本研究は、量子ドットや量子リングなどのナノスケール電子

系を組み合わせた量子ドット複合系に注目して、多体効果・干渉効果を用いた電子輸送やスピンの制御などについて研究することを特色としている。このような量子ドット複合系は、電荷・スピン・軌道自由度が織り成す量子効果や新奇な現象を解析するのに適している。

最近、ナノ量子系での電流制御、スピンの制御に関して多くの興味が集まっている。中でも、「軌道自由度」がこの進展に一つの鍵と与えると思われる。その典型的応用例が、スピン軌道相互作用を利用したスピン流の制御であり、また多軌道量子ドット（あるいは複合量子ドット）でのスピンや軌道の制御である。これらの研究は実験の急速な進歩を伴って発展しており、ナノサイエンス研究分野の一翼を担うものである。本研究のテーマはナノ量子系のスピンおよび電荷制御と深く関連した研究となっている。このようなスピンや電荷の制御は次世代のスピントロニクスや量子情報デバイスの基礎としても重要であり、将来的にも実験、理論を両輪として着実に研究が進展していくものと思われる。本研究を含め、ナノスケール量子系におけるスピン制御の系統的な研究によって、次世代のスピントロニクスや量子情報処理技術に新たな知見・進展が与えられることが期待される。

3. 研究の方法

本研究では、主に「軌道効果」が中心的な役割を担う量子現象に重点を置いた。このような軌道効果に関する実験は、量子ドット系を中心として急速に進展している。例えば、カーボンナノチューブや縦型量子ドットなどにおける高い形状対称性による軌道状態を始めとして、多重に結合した量子ドット間に強いクーロン斥力と小さなトンネルを導入することで「擬軌道」をつくることも可能となっている。量子ドット複合系での「軌道効果」に関する研究はその重要性が再認識されており、実験の急速な進展さらには応用性の高さなどからもこれに関する理論研究が急務となっている。さらに、このテーマに密接に関連した問題として、スピン軌道相互作用を用いたスピンの電場・磁場制御についても考察を行った。

3. 1 理論手法

量子ドット系の多体効果を扱うためには、電子相関を正確に扱うことのできる理論手法を用いることが重要である。ここでの理論の大きな特徴は、ドット系に対する標準的なモデルとなっている「アンダーソンモデル」の厳密解を応用すること、さらにこの結果を

基にして汎用性のより高い数値繰り込み群、グリーン関数摂動論、補助粒子平均場近似などの方法を組み合わせることである。

アンダーソン模型の厳密解は約20年前に求められていたが、量子ドット系の輸送係数などにはすぐには適用できないという致命的な欠点があった。この問題を克服するため、「ワード・高橋の恒等式」と呼ばれる場の理論的手法を援用することで、軌道縮退のある量子ドットや直列ダブルドット系のコンダクタンスに対して厳密解を用いた計算を可能とした。これは本研究のオリジナルな理論手法である。この計算は簡単な形状のドットに対して適用できるものなので、より複雑な量子ドット複合系を扱うために、NCA自己無撞着摂動論、スレーブボゾン平均場理論を援用した。これら近似法のチェックの意味でも厳密解の方法は大きな役割を果たした。このように多体問題の手法をシステムに応じて自在に使い分けることで、方法論にこだわることなく物理現象の本質により深く迫ることができた。

3. 2 研究体制

主に大学院博士前期・後期課程の学生と協力して研究を遂行した。最初の1年は大阪大学教授を併任していたので、大阪大学の2人の博士後期課程学生、1人の前期課程の学生と研究を進めた。2年目は大阪大学から京都大学に編入してきた博士課程と研究を続けた。また、大阪市立大学の小栗教授とも超伝導近接効果に関連するテーマで共同研究を行った。東京大学の樽茶グループとは、軌道による近藤効果の実験に関して緊密な連絡を取りあって、最新の実験の情報を取り入れながら研究を推進した。

4. 研究成果

先ず1年目は、多体効果・干渉効果に軌道自由度を取り入れ、これらの効果が織り成す現象について解析を進めた。2年目は、超伝導リードと結合した量子ドット系における多体効果と干渉効果に重点をおいて研究を行った。特に有限バイアス下の非平衡系に関しては新たな電圧電流特性を理論的に予言した。以下に研究成果を項目ごとにまとめる。

4. 1 多軌道量子ドット系における多体効果と干渉効果

カーボンナノチューブ量子ドットでは2軌道の近藤効果が観測され、縦型量子ドットでもドットの形状制御と磁場効果で、2軌道のみならず3軌道近藤効果が観測されている。軌道による近藤効果では、通常のスピン近藤効果とはかなり異なった多体効果が低温で現れる。アンダーソンモデル厳密解を用

いて輸送係数に対する軌道効果を明らかにした。また、複数個のドットを弱くつなぎ、ドット間のクーロン反発が有効になるようなセットアップを考えると、ドット間の電荷ゆらぎが「軌道自由度」として働き、軌道近藤効果が観測される。この系に関しても、厳密解、NCA法を用いて多軌道近藤効果の解析を行った。さらに、輸送係数の中で熱起電力を取り上げ、低温での計算を厳密解とワード恒等式を用いて行った。軌道効果により大きな熱起電力が生じることを明らかにした。

4. 2 超伝導リード接合系における超伝導相関と近藤効果の競合

超伝導と量子ドットを接合した系での電子相関効果に関する系統的な研究をおこなった。特に数値繰り込み群を用いて、T字型ドット系におけるアンドレーフ反射と近藤効果の競合を調べた。その結果、超伝導相関と近藤相関の競合により、低温のコンダクタンスに異常な上昇が生じることを明らかにした。また、ダブルドットに超伝導リードを接合した系についても研究をおこなった。特に改良された2次摂動論と数値繰り込み群を用いてコンダクタンスと局所状態密度の計算を行った。この場合も、アンドレーフ反射と近藤効果の競合によって低温でのコンダクタンスに異常が生じることがわかった。この特徴的な現象は、近接効果によって近藤効果の遮蔽距離が変化することに起因していることを明らかにした。

4. 3 非平衡下での量子輸送現象

量子ドットと超伝導を接合した系の研究は近年盛んに行われており、特に有限バイアスの非平衡下での実験研究が急速に進展している。一方でこのような状況に対する理論研究はあまり進んでいない。ここでは、このような有限バイアス下での実験を念頭におき、非平衡グリーン関数法に基づき、超伝導接合ドット系の量子輸送現象を調べた。量子ドットにおける局所状態密度とコンダクタンスのバイアス依存性に新たな多体効果が現れることが分かった。すなわち、バイアス電圧を増加していくと、超伝導相関と近藤相関がちょうどつりあう条件が満たされた時、微分コンダクタンスにピーク構造が現れる。この性質は非平衡下における超伝導・量子ドット複合系に特有のものであり、今後、実験的にも検証されるものと期待している。

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 8件)

①Y. Tanaka, N. Kawakami and A. Oguri,

“Andreev Reflection and the Kondo Effect in Side-Coupled Double Quantum Dots” J. Physics: Conference Series 150 (2009) in press (査読あり)

②Y. Yamada, Y. Tanaka and N. Kawakami “Nonequilibrium Transport through a Quantum Dot Coupled to Normal and Superconducting Leads” J. Physics: Conference Series 150 (2009) 022101 (4pp) (査読あり)

③Y. Tanaka, N. Kawakami and A. Oguri, “Andreev Transport through Side-Coupled Double Quantum Dots” Phys. Rev. B78 (2008) 035444/1-6 (査読あり)

④Y. Tanaka, N. Kawakami and A. Oguri, “Numerical Renormalization Group Approach to a Quantum Dot Coupled to Normal and Superconducting Leads” J. Phys. Soc. Jpn. Vol. 76 (2007) 074701/ 1-9 (査読あり)

⑤R. Sakano, T. Kita and N. Kawakami, “Thermopower of Multiorbital Kondo Effect via Single Quantum Dot System at Finite Temperatures” J. Phys. Soc. Jpn. Vol. 76 (2007) 074709/ 1-7 (査読あり)

⑥R. Sakano, T. Kita, T. Ohashi, S. Suga and N. Kawakami, “Transport Properties of the Orbital Kondo Effect via Quantum Dot Systems with Plural Electrons” Phys. Stat. Sol. Vol. 204 (2007) 492-495

⑦Y. Tanaka, N. Kawakami and A. Oguri, “Andreev transport through double quantum dots; Numerical renormalization group approach” Physica E40 (2008) 1618-1620 (査読あり)

⑧Y. Yamada, Y. Tanaka and N. Kawakami, “Magnetic Field Effects on the Andreev Transport Through a Quantum Dot” Physica E40 (2007) 265-268 (査読あり)

[学会発表] (計 13 件)

①山田康博, 田中洋一, 川上則雄
有限バイアス電圧下における量子ドット系でのアンドレーエフ反射と近藤効果
日本物理学会「第 64 回年次大会」、立教大(東京) 2009 年 3 月 30 日

②山田康博, 田中洋一, 川上則雄
超伝導/常伝導リードに繋がれた量子ドット系における非平衡定常状態での近藤効果
日本物理学会「秋季大会」岩手大学(盛岡)、2008 年 9 月 21 日

③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「秋季大会」岩手大学(盛岡)、2008 年 9 月 21 日

④Y. Tanaka, N. Kawakami and A. Oguri, “Andreev Reflection and the Kondo Effect

in Side-Coupled Double Quantum Dots” 25th International Conference on Low Temperature Physics (LT25),

August 6-13, 2008, Amsterdam, Netherland
⑤Y. Yamada, Y. Tanaka and N. Kawakami “Nonequilibrium Transport through a Quantum Dot Coupled to Normal and Superconducting Leads”

25th International Conference on Low Temperature Physics (LT25),

August 6-13, 2008, Amsterdam, Netherland
⑥山田康博, 田中洋一, 川上則雄
量子ドット系におけるアンドレーエフ反射と非平衡輸送特性 II
日本物理学会「第 63 回年次大会」近畿大学(大阪)、2008 年 3 月 24 日

⑦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アンドレーエフ反射と近藤効果
日本物理学会「第 63 回年次大会」近畿大学(大阪)、2008 年 3 月 24 日

⑧阪野晃, 川上則雄
軌道自由度を有した量子ドット系における非平衡近藤効果と輸送
日本物理学会「第 62 回年次大会」北海道大学(札幌)、2007 年 9 月 22 日

⑨山田康博, 田中洋一, 川上則雄
量子ドット系におけるアンドレーエフ反射と非平衡輸送特性
日本物理学会「第 62 回年次大会」北海道大学(札幌)、2007 年 9 月 24 日

⑩田中洋一, 川上則雄, 小栗章
超伝導/常伝導リードに繋がれた T 字型ダブルドット系の輸送特性
日本物理学会「第 62 回年次大会」北海道大学(札幌)、2007 年 9 月 24 日

⑪Y. Tanaka, N. Kawakami and A. Oguri, “Andreev transport through double quantum dots; Numerical renormalization group approach” Physica E40 (2008) 1618-1620

International Conference on Electronic Properties of Two-dimensional Systems and Modulated Semiconductor Structures,

July 15-17, 2007, Genova, Italy
⑫R. Sakano and N. Kawakami,

“Enhanced thermopower of Kondo effect in side-coupled quantum dot systems” International Conference on Electronic Properties of Two-dimensional Systems and Modulated Semiconductor Structures,

July 15-17, 2007, Genova, Italy
⑬Norio Kawakami, “Orbital Kondo Effects in Quantum Dot Systems” (invited) International Workshop on Physics and Mathematics of Interacting Quantum Systems in Low Dimensions, May 26, 2007, Tokyo, Japan

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ

[http:// cond. sphys. kyoto-u. ac. jp/](http://cond.sphys.kyoto-u.ac.jp/)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川上 則雄 (KAWAKAMI NORIO)

京都大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：10169683