

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 7日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22540324

研究課題名（和文）スピン・電荷制御非平衡ナノ量子素子の有効理論の研究

研究課題名（英文）Effective field theory of spin- and charge-controlling quantum nano devices out of equilibrium

研究代表者

谷口 伸彦（TANIGUCHI, NOBUHIKO）

筑波大学・数理物質系・准教授

研究者番号：70227221

研究成果の概要（和文）：

本研究は、スピン・電荷制御素子として有望な「電子相関を持つ多重準位量子ドット系」「スピン軌道量子ドット干渉計素子」に関して、信頼性が高く簡便な「有効理論」の構築を行った。これまで相反すると考えられていた実験結果に有効場理論の立場から系統的な解釈を行うと同時に、非平衡電子相関現象を利用して電氣的にスピン流を生成・制御する新たなスピン現象を理論的に予測した。

研究成果の概要（英文）：

The research aims to construct a simple yet reliable effective theory that can describe quantum transport phenomena in two promising systems for spin-charge controllability: a quantum dot with degenerate levels and interaction, and a spin-orbit quantum dot interferometer. We resolve seemingly contradicting experimental data from the viewpoint of our effective theory, and predict a new spin phenomenon where spin current is generated electronically due to nonequilibrium electronic correlation effect.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	800,000	240,000	1,040,000
2011 年度	500,000	150,000	650,000
2012 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	1,800,000	540,000	2,340,000

研究分野：物理

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学・ナノ構造物理

キーワード：物性物理、半導体物性、量子ドット、スピントロニクス、ナノ材料、近藤効果、ナノチューブ

1 研究開始当初の背景

現在、スピン・電荷の自由度を qubit として制御可能な「量子論理ゲート」の実現を目指し、様々な量子系が提案されている。中でも特に、GaAs/AlGaAs 系に代表される化合物半導体量子ドット系は、スケーラビリティにも優れた「量子コンピューティング」への応用を視野に最も実現が望まれているものである。ナノスケールで起こるこれらのスピン・電荷制御現象を解析するためには、スピン・電荷制御源として「強い電子相関効果」と生じた qubit の環境によるデコヒーレンスを記述する「非平衡性」を同時に考慮することが求められる。一方、これまで主としてバルク系と線形応答を念頭において進歩を続けてきた電子物性理論は、「電子相関非平衡系」の理論的な取り扱いに苦労しており、ナノ構造系の量子輸送現象に対し十分な開発指針を与えているとは言い難かった。例えば従来、電子物性を調べる際に強力な役割を果たしてきた第一原理計算や、平衡強相関系や線形応答で大きな成功を収めた Bethe 仮説法や数値計算繰り込み群等の理論的手法は、電子相関非平衡現象を解析する上で様々な困難や課題に直面している状態であった。

2 研究の目的

量子ドット系・ナノ構造系は、系のパラメータを比較的自由に变化させることが可能な点が大きな利点である。一方、系に特徴的な電子相関や非平衡性の存在は多体量子論に基づく微視的解析を不可欠とする。本研究は、ナノ構造系の「電子相関非平衡現象」の理解を通し、電子相関非平衡ナノデバイスに対して信頼性が高く簡便な「有効理論」の構築を行い、これによりスピン・電荷制御を可能とする量子素子のための具体的な開発指針を与えることを目的とする。特にスピン・電荷制御素子として有望な「電子相関を持つ多重準位量子ドット系」及び「スピン軌道量子ドット干渉計素子」(図 1) に関して、電圧制御性やスピン流生成の定量的理論予測が可能となるよう、段階的に実験との検証を進めることを目的とした。

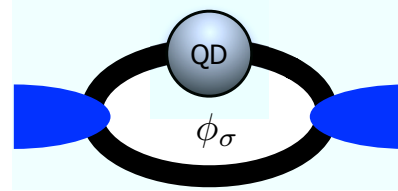


図 1 電気的スピン制御を考察する際に用いた Rashba ドットを埋め込んだ量子干渉計。量子ドット (QD) は電子相互作用 U を持ち、Rashba スピン軌道相互作用によりリングを貫くスピン依存磁束 ϕ_σ が有効的に現れる。

3 研究の方法

(1) 非平衡現象の取り扱い

量子ドットに印加する有限バイアスの効果を左右のリード間の化学ポテンシャルの差として取り込み、Keldysh 形式による非平衡 Green 関数法を適用することで、線形応答を越えた領域の電流、スピン流、非平衡揺らぎを評価した。これに必要に応じ、経路積分法や計数場解析の手法を組み合わせた。

(2) モデル

量子輸送の電荷制御性・スピン制御性を考察するにあたり、量子ドット系の Anderson 模型を基礎とし、① 縮退準位・軌道を持つ量子ドット系では、電子相関として同軌道間の電子相関 U と異軌道間の電子相関 U' が異なるモデル、② スピン制御系として、Rashba ドット (スピン軌道相互作用を持つ量子ドット) を埋め込んだ干渉計のモデル (図 1)、をそれぞれ導入した。

(3) 量子ドットの電子間相関の取り扱い

通常、低温領域における電子相関を考慮する際に使われる相互作用 $U = \infty$ とするスレーブボゾン法では、ゲート電圧は $N_d = 1$ に固定され、実験で観測されるコンダクタンスのゲート電圧依存性を解析することができない。我々は、有限相互作用スレーブボゾン平均場近似 (Kotliar ら、1986) を拡張したアプローチを用いることで、ゲート電圧の全領域 (ドットの平均量子数 $N_d = 0 \sim 2$, 二重縮退準位系では $N_d = 0 \sim 4$ に相当) における電荷・スピン特性の挙動を解析することが可能となった。

4 研究成果

(1) 準位縮退量子ドット系の電子相関と普遍類

準位縮退量子ドット系の軌道間相互作用と普遍的挙動軌道縮退量子ドット系では、スピン自由度と軌道自由度の絡み合いにより近藤効果が増強される ($SU(4)$ 近藤効果)。このとき、 $U = \infty$ 極限での繰り込み群解析では、軌道内と軌道間の相互作用 U , U' にわずかな非対称性があると、コンダクタンス挙動を支配する普遍類は $SU(4)$ から $SU(2) \times SU(2)$ へ乗り移ることが知られている。実際の量子ドットの軌道内/軌道間クーロン相互作用の大きさは、ドットの緩和定数 Γ の 10 ~ 20 倍程度である。実験に対応する有限の相互作用で非線形コンダクタンスの普遍スケーリングを実行し、コンダクタンスの挙動を調べた結果、① 軌道内と軌道間のクーロン相互作用の大きさが異なる場合 ($U'/U \approx 0.6 \sim 1.0$) であっても、普遍類の乗り移りを起こしておらず、線形・非線形コンダクタンスの挙動は常に $SU(4)$ 普遍類により支配されること (図 2), ② 観測されるコンダクタンス挙動には、系を特徴づけるエネルギースケール (= 近藤温度) が U' の値により大きく繰り込まれる効果が大きく反映されること、が明らかになった。

(2) 縮退準位ドット系：実験との対比

$SU(4)$ アンダーソン模型を実験結果に適用する際の証左とされる各 $N_d = 1, 2, 3$ でのコンダクタンス増大は、わずかな軌道内/軌道間クーロン相互作用の違いと有限バイアス電圧の存在により大きく影響され、特に $N_d = 2$ での二粒子近藤効果は、 $N_d = 1, 3$ での一粒子近藤効果に比べ、はるかに抑圧されやすいことがわかった。この知見により、従来、 $SU(4)$ -Anderson 模型では説明困難と考えられていた様々な実験が、電子相関の非対称性と有限バイアス電圧を考慮することで系統的に解釈可能であることが明らかになった。具体的には、① ナノチューブドット系のコンダクタンス測定で観測/非観測と相反する結果であった二粒子近藤効果が、 $SU(4)$ 普遍類の普遍的挙動として、実験のバイアス電圧値に影響として解釈可能、② 並列二重準位

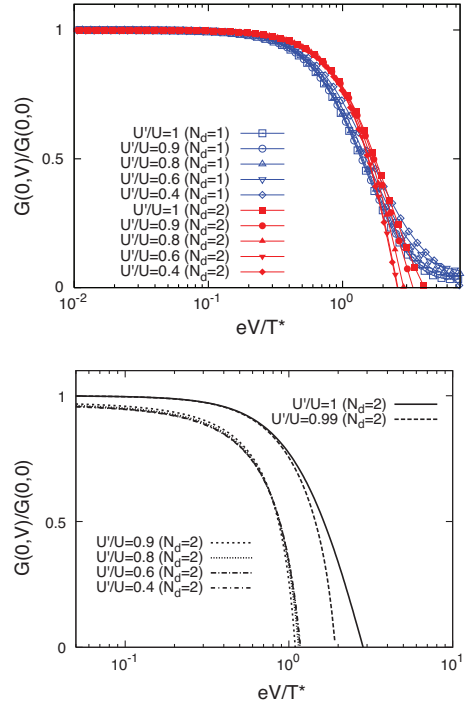


図 2 非線形コンダクタンスのバイアス依存性の普遍的挙動。(上図) $U/\Gamma = 20$, $N_d = 1, 2$. 普遍類は $SU(4)$ 。(下図) $U/\Gamma = 50$, $N_d = 2$. 普遍類が $SU(4)$ から $SU(2)SU(2)$ 乗り移る。

縮退量子ドット系の実験で、二粒子近藤効果が観測されていないのは、相互作用の非対称性と有限バイアス電圧効果によるものであり、現在実験に使われている $80\mu\text{eV}$ というバイアス電圧を一桁下げれば、 $N_d = 2$ 領域にも近藤効果によるコンダクタンス増大が現れると予測されること (図 3), が明らかになった。

(3) 縮退準位量子ドット系の非平衡揺らぎ

縮退準位ドット系において、スレーブボゾン法により非平衡揺らぎ (ショットノイズ) の計算を行った。 $N_d \approx 1$ での Fano 因子は $1/2$ であり、実験結果とはよく合致するが、 $N = 4$ フェルミ流体理論から予想される値 $1/3$ とは異なる結果が得られた。

(4) 非平衡揺らぎの平均場理論による解析

スレーブボゾン近似法による非平衡揺らぎ (ショットノイズ) の解析には、相互作用が自己エネルギーとしてのみ考慮され、相互作用結節補正が考慮

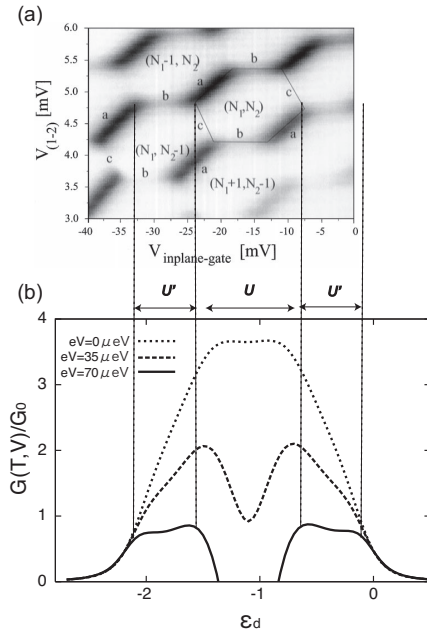


図3 Wilhelm らによるコンダクタンス測定結果 (上図) と本研究によるコンダクタンスの計算結果 (下図) の比較。

されていない。そのため、相互作用結節点補正をスレーブボゾン平均場理論の枠組みで取り込む手法として、完全計数統計に用いられる計数場を導入し、計数場に依存した平均場解を使う方法を開発した。具体的には、① 単一準位量子ドット系について、このスキームに従い非平衡揺らぎの解析を行い、その結果、Fano 因子は 1 以上 (Fermi 流体理論で 5/3) となり相互作用結節部の寄与が数値的に部分的には取り込み可能であること、② 自己エネルギーの計数場依存性は Ward 恒等式と呼ばれる一般的関係により支配され、自己エネルギーの計数場依存性は相互作用結節点補正を考慮することと等価であることが明らかになった。

(5) スピン制御: 電気的スピン流生成

量子ドット干渉計 (図 1) を使うことで、どのような条件で電気的にスピン流を発生可能か、そのスピン流生成機構、及びその電気的な検証方法に関して、有効場理論を用いて解析を行った。

① 有効場理論による計算により、電子間相互作用、Rashba 型スピン軌道相互作用、有限バイアス電圧

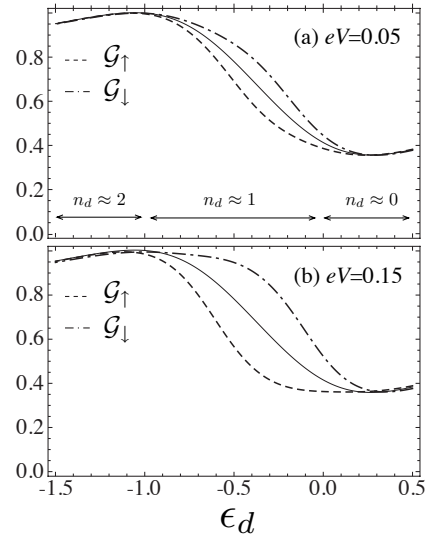


図4 有限バイアス電圧によるスピン依存輸送の誘起 (破線: G_{\uparrow} , 一点鎖線: G_{\downarrow})。 (a) $eV = 0.05$, (b) $eV = 0.15U$ 。細線はスピン依存性の無い線形コンダクタンスに対応する。

(非平衡条件) の 3 条件が満たされることで、スピン流を電気的 (=非磁性的) に生成可能であることが明らかになった (図 4)。この現象は、3 条件のうちいずれかが欠けても消失する、真の意味の「非平衡電子相関現象」である。

② スピン流発生の機構を調べ、この現象は系の近藤効果と密接に関係し、「非平衡近藤効果」として理解できることを明らかにした。

③ 新たに制御パラメータとして横磁場を導入し、スピン流生成の制御性を調べた。この現象の解析にはスピン回転対称性を保持する新たな形式のスレーブボゾン法を必要とする。この新しい近似手法を初めて非平衡系に適用し解析を行うことで、横磁場による制御性を明らかにした。

④ スピン流の電気的探索法として、量子干渉計に対して第三電極を導入することで、スピン流生成の検知と制御が可能となることが明らかになった。

⑤ 有効場理論と独立な手法として非平衡摂動計算 (相互作用に関して 2 次迄) を行い、有効場理論の結果との比較検討を行った。摂動論は、これまでの有効場理論と比べると限定的な適用範囲ではあるが、

両者の結果は整合的であり、結果の妥当性を追認できた。なお、量子ドット干渉計について非平衡系の2次摂動計算を解析的に評価したのはこれが初めてである。低バイアス領域においてはスピン流を解析的に評価を行い、その依存性を解析的に明らかにした。摂動論を N 重縮退を持つ Rashba ドット系に拡張すると、 $N_d = 1$ に対応するゲート電圧付近では、単一準位ドット系と同様にスピン流が非平衡生成され、その大きさは縮退度に比例し増大することがわかった。従って多重縮退準位をもつ量子ドット系はスピン流生成により有利であることが明らかになった。

(6) ドット系の磁気コンダクタンスの符号反転

微小量子ドットに対する Gorkov-Eliashberg 理論によれば、動的コンダクタンスは状態密度相関に比例する。その結果、動的コンダクタンスは直交/ユニタリ類の Wigner-Dyson 相関に比例し、負の磁気コンダクタンスを持つ。一方、不純物による弱局在効果は時間反転対称性の破れ(磁場)により抑制されることで、正の磁気コンダクタンスを与える。実際の半導体量子ドット系でいずれの効果が支配的となるかは系のサイズと観測する周波数による。ドットの平均準位間隔を跨ぐような周波数で磁気コンダクタンス測定を行えば、磁気コンダクタンスの符号反転が生ずることを明らかにした。

(7) 成果の国内外における位置づけとインパクト

① 準位縮退量子ドット系に関する本研究の成果は、これまで $SU(4)$ -Anderson 模型では解釈困難と考えられていた種々の既存の実験結果に、系統的な解釈を可能とする点で重要である。

② 従来、スピン流をスピン軌道相互作用を利用し電氣的に「操作可能」であることは知られていたが、本研究で示したようにスピン流そのものを電氣的に「生成も可能」である、との認識は乏しかった。本研究は強磁性リードや磁磁場を全く使わなくとも、Rashba 電場を量子ドット干渉計にかけることで自発的にスピン流が生成する、ということを実験的に示したものであり画期的であり、理論応用の両面で大きなインパクトを持つと考える。

(8) 今後の展望

① 縦型量子ドット系のコンダクタンス測定において、計測に使用するバイアス電圧を現在よりも上げることで、 $N_d = 2$ 領域において近藤効果によるコンダクタンス増大が実験的に確認されることで、我々の理論的提言の検証が待たれる。

② 非平衡揺らぎを記述するための計数場依存平均場理論に関してはまだ発展途上であり、今後、手法の改善も含めて大きな発展が期待される。

③ 本研究で見出した非平衡 Rashba 量子ドット干渉計によるスピン流生成は、スピン流が電氣的生成可能であることを示したものであり、今後の大きな進展が期待される。スピン制御素子を「オール・エレクトロニクス」(=全て電氣的)で実現するという大目標に対して、少なくとも従来問題であった「スピン流生成」の部分に実現可能性を与えた。今後、生成されたスピン流状態を如何に同定し、効率的に読み出すかと言うことが重要になって来ると考える。

謝辞 本研究課題を共同研究者である小口悠氏、磯崎健太氏、須能梓氏に深く感謝する。

5 主な発表論文等

[雑誌論文] (計4件)

- ① N. Taniguchi and K. Isozaki, *Spin Current Generation as a Nonequilibrium Kondo Effect in a Spin-Orbit Mesoscopic Interferometer*, J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 124708 (2012), 査読有. DOI:10.1143/JPSJ.81.124708
- ② N. Taniguchi, *Spin current manipulation through a Rashba dot by tunable nonequilibrium Fano-Kondo effect*, J. Phys. Conf. Series **400**, 042060 (2012), 査読有. DOI:10.1088/1742-6596/400/4/042060
- ③ H. Oguchi and N. Taniguchi, *Universal Conductance Enhancement and Reduction of the Two-Orbital Kondo Effect*, J. Phys. Soc. Jpn. **79**, 054706 (2010), 査読有. DOI:10.1143/JPSJ.79.054706

- ④ N. Taniguchi, *Universal and Nonuniversal Dynamical Conductivity in Small Metallic Grains: An Ambivalent Role of T-Invariance at Finite Frequency*, *Journal of Probability and Statistics*, **2010**, 751395 (2010), 査読有. DOI:10.1155/2010/751395

[学会発表] (計 11 件)

- ① 谷口伸彦, 「ラッシュバ量子ドット干渉計における非平衡スピン分極の三端子電氣的探査」日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 28 日, 広島大学.
- ② 須能梓・谷口伸彦, 「量子ドット干渉計におけるスピン流の非平衡生成: 摂動論による解析」日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 28 日, 広島大学.
- ③ N. Taniguchi, *Nonmagnetic spin current generation as nonequilibrium Kondo effect in a spin-orbit nano interferometer*, March meeting, American Physical Society, 2013 年 3 月 22 日, Baltimore Convention Center (USA).
- ④ 谷口伸彦, 「非平衡量子ドット系における計数場ワード恒等式」日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 9 月 20 日, 横浜国立大学.
- ⑤ 根元太郎・谷口伸彦 「量子ドット系における計数統計と slave-boson 法の拡張」日本物理学会第 67 回年次大会, 2012 年 3 月 26 日, 関西学院大学.
- ⑥ 谷口伸彦 「非平衡量子ドット系の計数場依存性: 汎関数繰り込み群による考察」日本物理学会第 67 回年次大会, 2012 年 3 月 26 日, 関西学院大学.
- ⑦ N. Taniguchi, *Spin current manipulation through a Rashba dot by tunable nonequilibrium Fano-Kondo effect*, 26th International Conference on Low Temperature, 2011 年 8 月 13 日, 北京国際会議中心 (中国).
- ⑧ 根元太郎・谷口伸彦 「斜行磁場中における AB 干渉計のファノ効果とスピン制御」日本物理学

会第 66 回年次大会, 2011 年 3 月 28 日, 新潟大学.

- ⑨ 谷口伸彦 「非平衡ラッシュバ量子ドットの有効場理論とファノ近藤効果」日本物理学会第 66 回年次大会, 2011 年 3 月 28 日, 新潟大学.
- ⑩ 谷口伸彦・根元太郎 「量子ドット系のファノ近藤効果とスピン操作 II」日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010 年 9 月 24 日, 大阪府立大学
- ⑪ N. Taniguchi and K. Isozaki, *Electrical spin filter through a Rashba dot by the Kondo effect*, the 6th International Conference on the Physics and Applications of Spin Related Phenomena in Semiconductors, 2010 年 8 月 3 日, 東京大学.

[その他 (学位論文)] (計 2 件)

- ① 須能梓: 修士 (理学) 「量子ドット干渉計におけるスピン流の非平衡生成: 電子間相互作用の摂動論による解析」(筑波大学 2013 年 2 月).
- ② 根元太郎: 修士 (理学) 「非平衡近藤領域における量子ドット系のスピン制御と電荷揺らぎ」(筑波大学 2012 年 2 月).

6 研究組織

(1) 研究代表者

谷口 伸彦 (TANIGUCHI, NOBUHIKO)
筑波大学・数理物質系・准教授
研究者番号 70227221