

VII-3 ナノ量子物性グループ

准教授 谷口 伸彦

研究員 小口 悠 (物創 白石グループ所属)

大学院生 (1名) 磯崎健太

スピン・電荷の自由度を制御可能な「量子論理ゲート」の実現を目指し、現在、様々な系が提案されているが、GaAs/AlGaAs 系に代表されるナノサイズの半導体量子ドット系は、スケーラビリティにも優れ最も実現が望まれている系である。量子ドット系を用いてスピン・電荷を制御する試みは多岐に渡っており、例えば (1) 量子ドットが持つ強い電子相関、(2) リング系などの量子干渉効果 (ファノ・近藤効果)、(3) 磁場効果、(4) 電場効果 (ラシュバ型スピン軌道相互作用)、等から「適切な」組合せを探ることが必要とされる。我々は、これらの「複合ナノ構造系」に対して、量子輸送特性と荷電・スピン制御性を明らかにすべく継続的に研究を進めている。特に有効理論に基づいた普遍的挙動の観点から、電子相関効果と量子効果に着目した議論を行っている。本年度の成果は以下の通りである。

【1】軌道縮退系の電子相関と量子輸送

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ことが知られる ($N_d = 1$ の軌道近藤効果)。またカーボンナノチューブドットの外殻軌道はほぼ二重に軌道縮退するため、「内部縮退自由度を持つ」量子ドットとして同じ範疇に属すとみなすことができる。前年度までの線形コンダクタンスの計算結果を踏まえ、本年度は特に非線形コンダクタンス、及び非平衡揺らぎ (ショットノイズ) に関する議論を進めた。

(1) 非線形コンダクタンスの挙動 (論文 [1,2]、講演 [2])

軌道縮退量子ドット系において非線形コンダクタンス G の温度 T 依存性および有限バイアス V 依存性を有効理論により調べた。有限バイアス電圧は、繰り込みフローの切断エネルギーとして有限温度と同様の役割を果たすと期待されるが、我々の計算結果は基本的にこれを支持する (図 1(左))。つまり、非線形コンダクタンスの普遍関数 $F_n(t = T/T^*, v = eV/T^*) \equiv G(T, V)/G_0$ は大きいエネルギー $\max[T, eV]$ によって支配される (ただし T^* は各ゲート電圧で定義される特性温度 = 近藤温度)。

有限バイアスの存在は量子ドットの電子間相互作用に大きな影響を及ぼす。しばしば $N_d = 2$ 領域における近藤効果によるコンダクタンス増大の有無と、 $SU(4)$ アンダーソン模型を用いた解析の妥当性が議論されるが、有限バイアスの存在によりコンダクタンス挙動は大きく変わるため、より注意深い議論が必要となることが明らかになった。実際、Wilhelm らのグループによる並列二重準位縮退量子ドット系の実験では $N_d = 1$ の領域のみでコンダクタンス増大が観測され、軌道縮退アンダーソン模型で説明することは困難と考えられていた。しかし我々は、相互作用の非対称性と有限バイアス電圧効果を適切に考慮すれば、軌道縮退アンダーソン模型の枠組の中でもこの実験結果に一貫した解釈を与えることが可能であることを示した (図 1(右))。

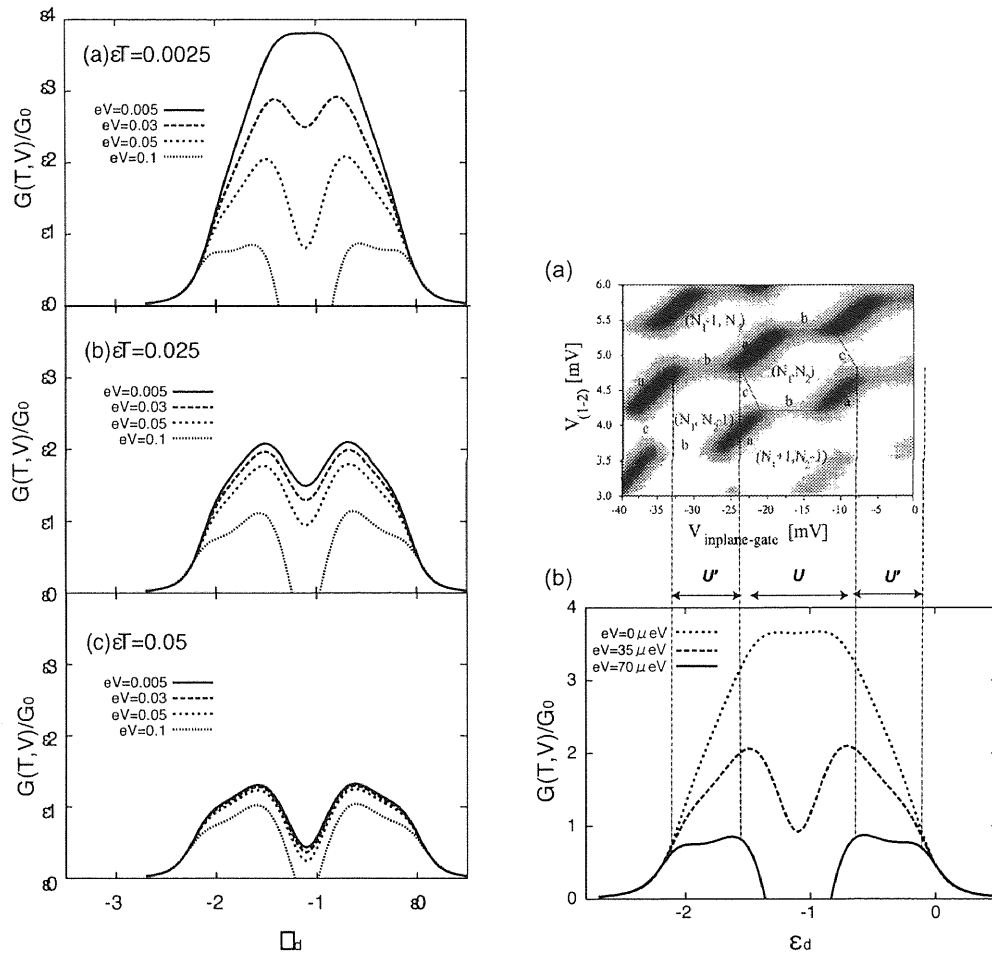


図 1 (左) 非線形コンダクタンスの温度依存性。バイアス電圧との大小関係により挙動が大きく変わる。(右) Wilhelm らによる実験結果と当グループの計算結果との比較

(2) 非線形コンダクタンスの普遍類 (論文 [2])

現在、実験で使われている量子ドットの軌道内/軌道間クーロン相互作用の大きさ U , U' は、ドットの緩和定数 Γ の 10 ~ 20 倍程度である。通常、相互作用 ∞ の極限では、 $U' < U$ においてコンダクタンス挙動を支配する普遍類に、 $SU(4) \leftrightarrow SU(2) \times SU(2)$ の乗り移りが起こることが期待されている。しかし、実験に対応する $U \approx 10 \sim 20\Gamma$ のパラメータレンジでは、コンダクタンスの普遍類は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、その挙動はむしろ常に $SU(4)$ 対称性により支配されていることが明らかになった。

(3) 非平衡揺らぎ (講演 [1])

量子ドット系の非平衡状態を記述する現象として非線形コンダクタンスとともに良く用いられているものが、非平衡揺らぎ (ショットノイズ) である。一般に、非平衡揺らぎは、典型的な「電子相関非平衡現象」であり、コンダクタンスに比べ電子相関がより重要な影響を及ぼす。ショットノイズを特徴づけるファノパラメータ \tilde{F}_0 は、ドットに相互作用のない場合には $\tilde{F}_0 = 1$ 、通常の単一量子ドットの近藤領域でのショットノイズに対しては $\tilde{F}_0 \approx 1.67$ となる。従来ショットノイズ測定は困難であるが、最近、Delattre らのグループにより、カーボンナノチューブ量子ドットの近藤領域 ($N_d = 1$) におけるショットノイズ測定が実施され、 $\tilde{F}_0 \approx 0.5$ という結果が報告された。我々は有効理論から $\tilde{F}_0 \approx 0.54$ という値を得ており、実験結果と比較的良好一致をみている。ただしこの値はドットのクーロン相互作用の大きさ U/Γ や、軌道間/軌道内のクーロン相互作用の比 U'/U にも依存しているため、今後更に詳しい解析が必要である。

【2】AB リング-量子ドット系の電荷制御性 (講演 [3]、学位論文 (修士)[1])

量子ドットを埋め込んだ Aharonov-Bohm 干渉系 (AB リング・ドット系) は、制御性が高く量子素子として有望である。しかしリング・ドット系は、低温において、多体効果 (近藤効果) と量子干渉効果 (ファノ効果) が影響を及ぼしあうファノ・近藤効果を示す系として知られ、微視的理論に基づいた解析を必要とする。一方、リング・ドット系は、「AB 効果 \leftrightarrow AC 効果」対応によりラシュバ型スピン軌道相互作用により生じるスピントロニクス現象を理解する上でも、重要な雛型ともなっている。本研究では、近藤効果が顕在化するファノ・近藤低温領域において、量子干渉と電子相関の複合的影響を調べた。特に、(1) 近藤温度の磁束依存性とクーロン相互作用との関連、(2) 単一量子ドット系で確

認されている温度・有限バイアスの普遍的スケーリングが、ファノ・近藤系で成立するか否か、の2点を議論対象とした。

非平衡グリーン関数法による標準的定式化により線形／非線形コンダクタンスを微視的理論から構成し、2,3 のもっともらしい仮定を使うと、ファノ公式 $G(T \rightarrow 0, V_b \rightarrow 0) \propto |e + q|^2 / (e^2 + 1)$ を有限温度、有限バイアスに拡張することができる。有限相互作用スレーブボゾン法を適用すると、特性温度 (近藤温度) が AB 磁束に依存するだけでなく、その磁束依存性の様子自体がクーロン相互作用の大きさ U/Γ により大きな変化することを明らかになった (図 2)。

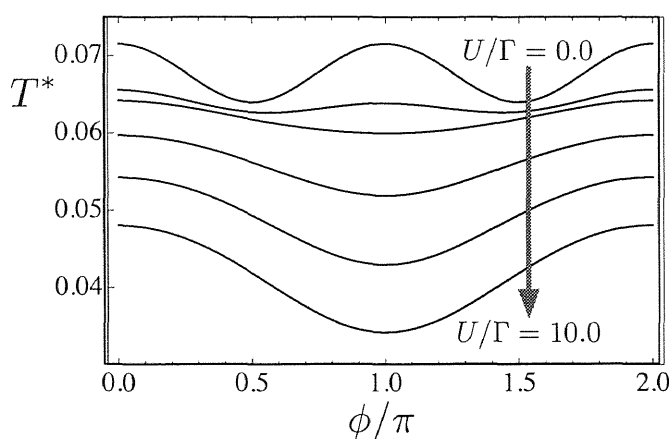


図 2 特性温度 T^* の磁束依存性 (ゲート電圧=一定)。曲線は上から $U/\Gamma = 0.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0$ 。

【3】ファノ・近藤効果によるスピン操作 (講演 [4]、学位論文 (修士)[1])

ラシュバ型スピン軌道相互作用は、スピン依存性をもつ位相効果を与えることから有効的な磁束として働き得る。そのため、電場によるスピン制御を可能とする期待から現在活発に研究が進められている。しかしラシュバ型スピン軌道相互作用のみだけでスピン依存輸送が実現されるわけではない。スピン依存輸送を誘起させるためには、更に有限バイアス電圧の存在、電子間に相互作用効果があることが必要と考えられているが、このような「電子相関非平衡現象」に対する理解は十分なされていない。このような観点から、我々は、有限バイアス下での近藤効果という「電子相関非平衡現象」がラシュバ型スピン軌道相互作用を介してスピン依存輸送にどのように関わっているかを調べている。特に本年度においては、スピン制御系 (ラシュバリング・ドット系) の線形・非線形量子輸送現象

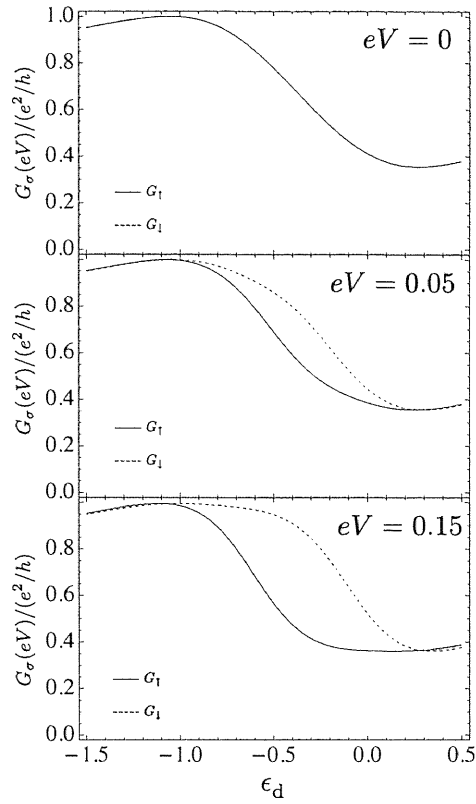


図3 有限バイアス電圧によるスピン依存輸送の誘起。線形領域 (上) ではコンダクタンスにスピン依存性は現れないが、有限バイアスにするに従い (中、下)、スピン依存輸送が現れる。パラメータは $T_b = 0.71$, $\phi_{SO} = 0.25\pi$, $T = 0$ 。

をファノ近藤効果が顕著に現れる低温領域において調べた。その結果、(1) 有限バイアス下でスピン依存輸送が生じる (2) 印加するバイアス電圧が大き過ぎるとスピン依存輸送は小さくなる (3) 温度効果は、コンダクタンスのスピン依存性を壊す方向に働く、ということが理論計算より明らかになってきた。(2,3) は有限バイアス及び有限温度が近藤状態を破壊するためと解釈できる。(1)–(3) のため、スピン依存輸送を最大にする最適のバイアス電圧が存在することがわかった。最適なバイアス電圧は、アーム部の伝導率 T_b やラッシュバ相互作用の大きさ ϕ_{SO} によるが、おおむね $eV \approx 0.3 \sim 0.7T^*$ の値を取る。

研究業績

<論文>

1. H. Oguchi and N. Taniguchi, “Thermal Symmetry Crossover and Universal

- Behaviors in Carbon Nanotube Dots”, J. Phys. Soc. Jpn. **78** 083711 (2009).
2. H. Oguchi and N. Taniguchi, “Universal conductance enhancement and reduction of the two-orbital Kondo effect”, J. Phys. Soc. Jpn. **79** 054709 (2010).
 3. N. Taniguchi, “Universal and Nonuniversal Dynamical Conductivity in Small Metallic Grains: an Ambivalent Role of T-invariance at Finite Frequency”, to appear in J. Prob. Statistics (2010).

<著書等>

1. 新井正男・井上純一・鈴木秀勝・田中秋広・谷口伸彦 (共訳) 「凝縮系物理における場の理論 (上)」 (2009 年 11 月, 吉岡書店).
2. 新井正男・井上純一・鈴木秀勝・田中秋広・谷口伸彦 (共訳) 「凝縮系物理における場の理論 (中)」 (2010 年 1 月, 吉岡書店).

<学位論文 (修士)>

1. 修士論文: 磯崎健太「量子ドット系のファノ近藤効果と電荷・スピン制御性の理論的研究」 (筑波大学大学院数理物質研究科 2010 年 2 月提出).

<講演>

1. 小口悠, 谷口伸彦「二重軌道縮退量子ドット系のショットノイズ: 軌道間クーロン相互作用の影響」日本物理学会 2009 年秋季大会 (2009 年 9 月, 熊本大学)
2. H. Oguchi and N. Taniguchi, “Finite-bias effect in quantum transport through capacitively coupled double quantum dots”, International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology (ISANN2009) (December, 2009 in Hawaii).
3. 谷口伸彦, 磯崎健太「AB リング・ドット系におけるクーロン電子相関と近藤温度の磁束依存性」日本物理学会第 65 回年次大会 (2010 年 3 月, 岡山大学).
4. 磯崎健太, 谷口伸彦「量子ドット系のファノ近藤効果とスピン操作」日本物理学会第 65 回年次大会 (2010 年 3 月, 岡山大学).