

VII-3 ナノ量子物性グループ

准教授 谷口 伸彦

卒研究生 1名

本研究グループでは、ナノ構造系で量子性に起因して現れる興味深い量子物性・量子輸送現象を、様々な「場の量子論」の手法により理論的研究を進めている。キーワードは、量子性・電子相関・非平衡性である。特に電氣的にスピン輸送が制御可能な「非平衡ラッシュバ量子ドット干渉計」については継続して研究を進めており、これまで多くのことが明らかになっている(講演 [1,2])。また本年度は、我々が得た非平衡 2 次摂動計算の解析評価を利用することで、これまで電流保存の問題により調べられることが困難であった電子-正孔対称性の破れの影響も調べることが可能となった(論文 [1])。一方、新たな研究プロジェクトとして、「非平衡不純物アンダーソン模型」の系統的な解析を目的として、新たな厳密解の構成法の開発を開始した(講演 [3])。これらと平行して、超伝導量子ドットを介した非平衡量子輸送現象の研究も開始した(学位論文 [1])。本年度の主な成果は以下のとおりである。

【1】非平衡量子ドット系の理論的手法

(1) 多端子非平衡量子ドット系の解析的摂動計算(論文 [1])

量子ドット系の量子輸送現象の解析は、ドット系の電子相関とバイアス電圧による非平衡性を同時に考慮する必要があり、理論的な取り扱いが困難な問題の一つである。不純物アンダーソン模型は、量子ドットを介した量子輸送現象を理論的に考察する際に標準的に用いられている理論模型であるが、理論的に取り扱いの容易な「電子-正孔対称性のある二端子系」に理論研究が集中しており、このような単純化された系で得られた結果を、応用上大きな可能性の秘める多端子系や量子干渉計に対して適用可能であるかは注意深い議論を要する。

電子-正孔対称二端子ドット系に関して、非平衡二次摂動計算と非平衡量子モンテカルロ計算等の数値計算との結果を比較すると、かなり大きな電子相関と有限バイアス電圧領域まで、両者は定性的のみならず定量的にもかなり良い一致を示す。つまり非平衡二次摂動計算は大変有効な手法であることがわかる。一方、これまでの非平衡摂動計算は、ダイアグラムの寄与を数値積分することで解析をおこなってきたため、解析的な挙動が明らかでないだけでなく、大きな制御パラメータ空間をもつ多端子ドット系の挙動を系統的に調べるには不適であった。我々は非平衡二次摂動自己エネルギーを、多くのパラメータを含む系(多端子量子ドット、任意の周波数・バイアス電圧)で完全に解析的に評価を行った。本年度は特に、多端子非平衡量子ドット系の低バイアスおよび高バイアス極限の解析的挙動を求めるとともに、多端子の影響と電子-正孔対称性を破るゲート電圧の影響等を解析的に調べることができた。また、電流保存則に関して、多端子量子ドット系の自己エネルギーの低バイアス挙動が、非平衡定常 Ward 恒等式と整合していることを明らかにした。

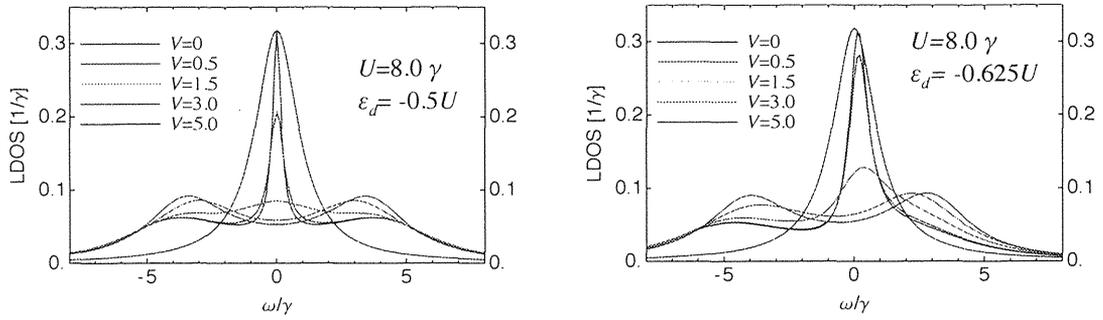


図1 非平衡スペクトルの計算例: (左) 電子正孔対称性のある系、(右) 電子正孔対称性が破れた系。

(2) 非平衡量子ドット系の電流保存則 (論文 [1])

現実の半導体素子では、ゲート電圧の存在、左右リードとドットの結合非対称性、リング形状や多端子の存在により、ドットに電子-正孔対称性が必ずしも存在しないのが普通である。一方、理論計算では取り扱いが容易になることから、しばしば電子-正孔対称性を仮定することが多い。さらに非平衡摂動論特有の問題として、このような電子-正孔対称性を破るドット系に適用しようとすると、電流保存則を必ずしも満たさなくなる、という問題点が長らく知られている。そのため、このような非平衡定常状態で電流保存を保証するために様々な「電流保存条件」の処方箋が開発・提案されてきた。このような取り扱いを遂行するためには、近藤共鳴近傍のみで正当化できる近似法(準粒子描像)では不十分で、共鳴から離れた周波数成分(インコヒーレント部分)の寄与も考慮する必要がある。

我々は、インコヒーレント部分を含む任意の周波数における2次摂動の非平衡自己エネルギーの解析的表式を持っているため、これを利用することで、上述の非平衡電流保存の問題に有効的にアプローチすることが可能となった。実際、2次摂動理論の範囲内で付加的な仮定や処方箋を使うことなく、明示的に電流保存則を満たす形で、非平衡スペクトルおよび非平衡定常電流の計算が遂行可能であることを示した。同時に、求めた非平衡スペクトルは総和則を厳密に満たすことが確認された。これは、従来の準粒子描像に立脚した手法ではなし得なかった利点である。電子正孔非対称性が非平衡スペクトルへ及ぼす影響は大きく、電子正孔対称系では低バイアス領域で3ピーク構造を示すこととは対照的に、電子正孔対称性が破れた系では一般に(低バイアス領域でも)2ピーク構造を示すことがわかった。

【2】非平衡 Rashba 量子ドット干渉計の電氣的スピン制御 (講演 [1,2])

我々のグループでは、これまで量子干渉計に量子ドットを埋め込んだ量子ドット干渉計(量子ドット干渉計)で Rashba 型スピン軌道相互作用を利用することによりスピン分極およびスピン流が非平衡生成可能という、電氣的スピン現象に着目し、その物理的機構を理論的に明らかにして来た。使った解析・近似手法は

- 有限相互作用スレーブボゾン法による自己無撞着計算
- 非平衡二次摂動論による解析的評価

の2種類である。いずれの手法によっても、量子ドット干渉計に Rashba 電場を印加することで電氣的にスピン分極とスピン流が生成されることが確認された。また電氣的スピン現象の機構は、次の二つの複合的効果の帰結であると理解できた：(1) 電子相関のない量子ドット干渉計であっても、Rashba 電場は干渉計の輸送にスピン依存する位相効果を与え、その結果として、量子ドットに非平衡スピン分極を定常的に生み出す。(2) 量子ドットに電子相関があると、(1) で誘起されたスピン分極は電子相関を介し、スピン依存した輸送チャンネルを生み出す。そのため、電子相関のある量子ドット干渉計の場合に限り、スピン流が誘起される。また、電氣的にスピン流が誘起されるのは、有限バイアス電圧を定常的に電子相関を持つ干渉計にかけた場合に限られ、非平衡近藤効果と解釈することも可能である。

非平衡定常状態でスペクトル関数を実験的に観測するためには、第三端子によるコンダクタンス測定が行われる。通常、磁気応答や強磁性リードによりスピン分極が誘起される場合には、スペクトル関数はスピン依存性を反映してディップ構造を持つ。しかし、現在考えている量子ドット干渉計に関しては、事情が少し異なることも判明した。すなわち、非平衡スペクトル関数のディップ構造は、スピン分極のみが有限でスピン流が0の時には現れず、スピン分極とスピン流が双方とも有限になって初めて現れる。つまり、第三端子によるコンダクタンス測定は、量子ドット干渉計にスピン流存在の有無を確認する検知手段となり得ることがわかった。

【3】開放量子ドット系の厳密計算 (講演 [3])

電子相関と非平衡が共存する系の計算は、現在のところ極めて特別な例を除いては厳密に評価された例はほとんどない。ナノ量子系の量子輸送現象を記述する不純物 Anderson 模型に対して平衡系の性質を厳密に計算できる理論手法として、Bethe 仮設法、境界共形場理論が知られているが、いずれも現時点では非平衡定常状態への拡張には様々な障害があり、未だ確立していない。そこで、非平衡定常状態への展開を念頭においた、これら二つの手法とは独立な厳密解の構成法の開発に着手した。我々のアプローチの基本的な考え方は、補助場 (ボーズ場) の導入により量子ドットの相互作用を扱う方法であるが、従来とは異なり、得られる有効作用を可能な限り厳密に扱おうとするものである。この方法によれば、不純物 Anderson 模型 (有限の電子相関 $U \neq 0$) の結果を、 $U = 0$ の共鳴準位模型の結果から構成することができる：

$$\Xi_{\text{SIAM}} = \left\langle \prod_{\sigma} \Xi_{\text{RLM}}(\epsilon_d + \frac{U}{2} - \sigma b) \right\rangle_b .$$

ここで Ξ_{SIAM} は不純物 Anderson 模型の大分配関数、 Ξ_{RLM} は共鳴準位模型 (=電子相関のない開放量子ドット系) の分配関数であり、 b は分散 $\langle b^2 \rangle_b = U/\beta$ を満たすボーズ場である。上式は Ξ_{SIAM} と Ξ_{RLM} を結ぶ厳密な関係式であり、電子相関のない開放量子ドット系の大分配関数 Ξ_{RLM} を厳密に求めることができれば、Bethe 仮設法・およびその有限温度拡張と等価な内容を含む理論

が構築できることを意味する。(同様な関係をグリーン関数や状態密度等の物理量へ拡張することも原理的に可能であるが、表式は複雑となる) 本アプローチは構成の明確さ・単純さから、大きな可能性を秘め、非平衡定常状態への拡張も可能であると我々は考えている。本年度においては、まず基本となる Ξ_{RLM} の表式を具体的かつ厳密に求めた。現在、得られた結果の解析を進めている。

研究業績

<論文>

1. N. Taniguchi, *Multi-terminal Anderson impurity model in nonequilibrium: Analytical perturbative treatment* (投稿済) .

<学位論文>

1. 卒業論文：新井和明「ノーマル-量子ドット-超伝導接合系における非線形電流の研究」(筑波大学物理学類 2014 年 2 月).

<講演>

1. N. Taniguchi, *Electrically induces spin current in a nonequilibrium spin-orbit nano interferometer*, in First-QS2C Workshop on Emergent Phenomena of Correlated Materials (Tokyo, 2013 年 11 月 14 日).
2. N. Taniguchi, *Nonequilibrium Spin Current and Three-terminal Probing in a Non-magnetic Spin-orbit interferometer*, in International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology (Hawaii, 2013 年 12 月 13 日).
3. 谷口伸彦「汎関数ポゾン法による開放量子ドット系の直接計算」日本物理学会 第 68 回年次大会 (2014 年 3 月 28 日 東海大学).