

## VII-3 ナノ量子物性グループ

准教授 谷口 伸彦

大学院生 (1名)

半導体ナノ構造系に現れる様々な量子現象の理論的研究を行っている。現在、特に力を入れているのは、半導体量子ドット系 (GaAs/AlGaAs 系) における非平衡・非線形領域に現れる、量子物性と電子相関効果の解明である。本年度の成果は以下の通り。

### 【1】量子ドット系の磁場効果：磁気コンダクタンスの符号反転 (論文 [1])

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ことが知られている。一方、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。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であろうことを示した。

### 【2】カーボンナノチューブ量子ドット・縦型量子ドット

カーボンナノチューブ量子ドットおよび縦型量子ドットは、外殻軌道はほぼ二重に軌道縮退する「縮退軌道を持つ量子ドット」とみなすことが可能である。我々はとくに、電子相関の強結合領域現象である近藤効果が支配的となる極低温領域での非平衡量子輸送現象に興味をもち、研究を進めている。

#### (1) 非線形コンダクタンスの挙動 (論文 [2])

通常の使われる相互作用  $U = \infty$  スレーブボゾン近似では実験で観測するようなゲート電圧依存性を解析することはできない。我々は、有限相互作用スレーブボゾン平均場近似を用いることで、ドットの平均量子数 0 ~ 4 に対応するゲート電圧の全領域において、非線形コンダクタンスを評価し、その温度依存性/有限バイアス依存性を調べた。

$SU(4)$  アンダーソン模型を実験結果に適應させる際の妥当性の証左とされる各  $N_d =$

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大きさにより大きく影響される。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。従来、様々な実験で観測／非観測と相反する結果であった二粒子近藤効果が、実験で使われたバイアス電圧値に依るものとして系統的に解釈可能であることが明らかになった。

## (2) 非平衡揺らぎと電子相関 (論文 [3])

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、電流の非平衡揺らぎ (ショットノイズ) 測定である。電流揺らぎには、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。以下のことが明らかになった。(1) ショットノイズに対する電子相関は、自己エネルギーとしてだけでなく、2 体結節部からも寄与がある。(3) 通常、使われている透過率によるノイズの表式は、前者の寄与のみに相当する。(4) ゲート電圧の大きさにより、2 体結節部の寄与の重要度は変わる。 $N_d \approx 2$  の近藤領域では 2 体結節部が本質的に重要となるが、 $N_d \approx 1$  の領域では、この寄与を考慮しなくとも、観測されている実験結果を説明することが可能である。

## 【3】 スピン・電荷制御非平衡ナノ量子素子

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。その中で、GaAs/AlGaAs 系を使い、Aharonov-Bohm 型位相干渉系に量子ドットを埋め込んだ系 (AB リング・ドット系) は、制御性も高く量子素子として大きな可能性を持つ。この系に垂直方向に電場をかけることで誘起させたラシュバ型スピン軌道相互作用を有効的磁束として使うことで、電場によりスピン流の生成やスピン制御を行う可能性が模索されている。

## (1) 非平衡近藤効果を利用した電場によるスピン流生成 (論文 [4], 講演 [1,2])

ラシュバ型スピン軌道相互作用のみの存在でスピン流が生成されるわけではなく、実際、線形応答領域や相互作用のない系でスピン流が生成されることは無い。そこで、リング+ドット系 (ラシュバリング・ドット系) において、どのような条件下でスピン流が生成されるかを考察した。その結果、(1) 電子相互作用が存在しかつ有限バイアス下という「電子相関非平衡」条件でのみ、スピン流が生成されること、(2) 最初は印加するバイアス電圧に従いスピン流が現れるが、バイアスが大きすぎると抑制してしまうこと、(3) 温度効果は常にコンダクタンスのスピン依存性を壊す方向に働くこと、がわかった。

## (2) 有効準位とスピンコンダクタンス (講演 [1])

スピン流が生成されるためには、ドット上で有限のスピン分極を持つことは必要であるが、それで十分であるとは限らない。例えば、相互作用のないドット系では有限バイアスによりスピン分極を作ることにはできるがスピン流は現れない。相互作用ドット系でのスピン分極とスピン流関係を明らかにするため、ドット内の準位をスピン分裂させスピン分極を人為的に作り、有限バイアス下でスピン分極とスピン流の相関を調べた。その結果、相互作用ドット系においてはスピン分極はスピン流の生成を常に伴っている、つまり図 1 に示すように、スピン流とスピン分極の消失はほぼ一致していることが明らかになった。

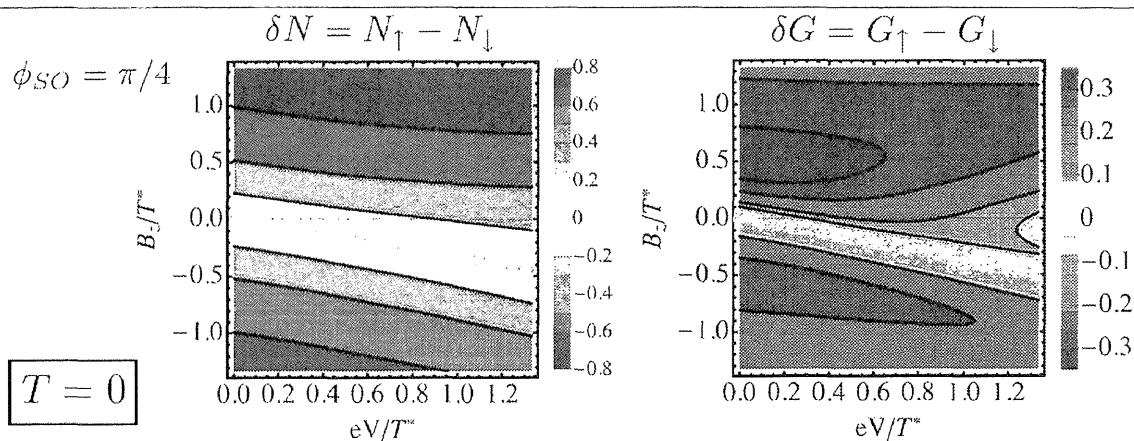


図 1: スピン分極 (左図) とスピンコンダクタンス (右図) のバイアス電圧と準位分裂依存性の比較。パラメータは  $\xi = 0.3U$ 、 $\Gamma = 0.5U$ 、 $eV = 0.15U$ 。

## (3) 斜行磁場の影響: スピン回転対称不変スレーブボゾン平均場近似 (講演 [3])

ラシュバ型スピン軌道相互作用に付随する位相干渉効果を調べるため、近年、半導体ドット面内方向に成分を持つ磁場 (斜行磁場) を導入する量子輸送実験 (現時点では電流測定) が行われ始めた。量子ドット内での斜行磁場はスピン・フリップ過程をもたらすことで近藤一重項状態を壊す一方で、スピン分極を作ることによってスピン流の生成源ともなり得る。非平衡近藤効果により生成されるスピン流が斜行磁場にどのような影響を受けるかは興味深い問題である。

これまで理論計算を行ってきた有限相互作用スレーブボゾン (KR スレーブボゾン) 平均場近似は、スピン軸を  $z$  軸 (半導体面に垂直) 方向に選択的に固定していたため、スピン回転対称性を完全には満たしていない。斜交磁場によるスピンフリップ過程を取り込むためには、近似を完全にスピン回転対称な取り扱いに拡張する必要がある。

このような拡張を KR スレーブボゾン近似に施したのがスピン回転対称不変 (SRI) ス

レーブボゾン法である。以下図 2 に予備的結果として、磁場の大きさを固定し、 $x-z$  平面内でその方向  $\theta$  を回転させた時の、スピンコンダクタンス  $\Delta G$  の挙動を示す。スピン流の大きく変化する領域 ( $0 \rightarrow \pi$ ) とあまり変化しない領域 ( $\pi \rightarrow 2\pi$ ) があることがわかる。これは斜行磁場により安定的にスピン制御が可能となることを示唆している。

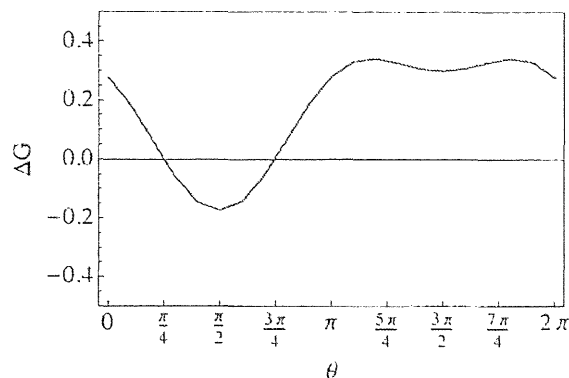


図 2:  $zx$  平面内で磁場を回転させる時のスピンコンダクタンス。パラメータは  $T = 0$ 、 $Vb = 0.1U \cos \theta$ 、 $B_z = 0.1U \sin \theta$ 、 $\xi = 0.3U$ 、 $\Gamma = 0.5U$ 、 $eV = 0.15U$ 、 $\phi_{SO} = \pi/4$ 。

#### 【4】開いた量子ドット系の有効場理論の研究 (講演 [4])

ラシュバ型量子ドット系のハミルトニアンは時間反転対称性を保持する。そのため、線形応答領域では相互作用系であってもスピン流が生成されることはない。有限バイアス電圧がドット系に与える影響を調べることで、有限バイアス下でどのようにスピン流が生成されるかを有効場理論の立場から議論した。Keldysh 非平衡理論を汎関数積分により定式化すると、有限バイアス下であっても熱浴=導線の自由度を完全に積分消去することが可能であり、「開いた量子ドット」の有効作用を求めることができる。左右の導線の影響は、導線自由度の積分の結果現れるドットの自己エネルギー部分  $\Sigma_{\text{lead}}^{R,A,K}$  として反映される。ラシュバ型スピン軌道相互作用のある系を考えると、リング形状の時のみ、 $\Sigma_{\text{lead}}^K$  がスピン依存性を持つことがわかった ( $\Sigma_{\text{lead}}^{R,A}$  は常にスピンによらない)。つまり、 $\Sigma_{\text{lead}}^K$  の効果により定常分布が変形することでスピン分極を生み出し、そのスピン分極が相互作用によりスピン流へとなる、機構が明らかになった。

#### 研究業績

##### <論文>

1. H. Oguchi and N. Taniguchi, “Universal conductance enhancement and reduc-

- tion of the two-orbital Kondo effect”, J. Phys. Soc. Jpn. **79** 054709 (2010).
2. N. Taniguchi, “Universal and Nonuniversal Dynamical Conductivity in Small Metallic Grains: an Ambivalent Role of T-invariance at Finite Frequency”, J. Prob. Statistics, **2010**, 751395 (2010).
  3. H. Oguchi and N. Taniguchi (投稿準備中).
  4. K. Isozaki and N. Taniguchi (投稿準備中).

<講演>

1. N. Taniguchi and K. Isozaki, “Electrical spin filter through a Rashba dot by the Kondo effect”, The 6th International Conference on Physics and Applications of Spin Related Phenomena in Semiconductors, Tokyo, August, 2010.
2. 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, 大阪府立大学).
3. 根元太郎, 谷口伸彦 「斜行磁場下における AB 干渉計のファノ近藤効果とスピン制御」日本物理学会第 66 回年次大会 (2011 年 3 月, 新潟大学).
4. 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).

<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 (下)」 (2010 年 6 月, 吉岡書店).

<外部資金>

1. 科研費 基盤研究 (C) 「スピン・電荷制御非平衡ナノ量子素子の有効理論の研究」 (研究代表: 谷口伸彦 2010 年度~2012 年度) .