

論文の内容の要旨

論文題目 量子ドットにおけるコヒーレント伝導
(Coherent Transport through a Quantum Dot)

氏名 相川 恒

半導体量子ドットは閉じ込めによる離散エネルギー準位の形成と電氣的な孤立に伴う帯電効果によってクーロン振動などの多様な伝導特性を示すことが知られており、現在までも数多くの研究が行なわれている。本研究はその中でも特に、半導体量子ドットを電子が量子コヒーレンスを保って透過する現象を実験的に調べたものである。コヒーレントな伝導現象においては量子ドットと電極などの周辺系を一つの複合系と見なすような取り扱いが必要になってくる。本研究の目的は、このようなコヒーレンスが介在する複合系において新しい現象を見出すとともに、量子ドット内の電子状態に関してもより深い理解を得ることである。このための考え方の一つとして、現象を一電子効果と多電子効果とに大別する。

一電子効果は量子ドットを散乱体と見なしたポテンシャル問題として捉えることができる。本研究では Fano 効果を切り口にしてこの問題を掘り下げた。Fano 効果は離散エネルギー準位と連続準位との干渉によって起きる現象で、量子ドット系でもその発現が予想されている。本研究では、量子ドットが Aharonov-Bohm(AB) 干渉計に埋め込まれた系 (図 1(a))、T 結合型の量子ドット (図 1(b))、多準位伝導下での単一量子ドットの電気伝導測定において Fano 効果の観測を試みた。これによって、以前までの AB 干渉効果とは別の切り口から量子ドットの透過振幅と位相シフトの情報が得られることが期待される。

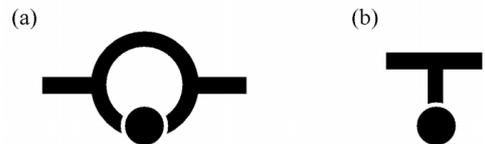


図 1. (a) 量子ドットが Aharonov-Bohm(AB) リングに埋め込まれた系、(b) T 結合型の量子ドットの模式図。黒塗りの部分を伝導電子が通過する。

まず AB 干渉計の一方の経路のみに量子ドットを埋め込んだ構造の試料を GaAs/AlGaAs 二次元電子系から作製し、電気伝導測定を極低温 (数十 mK) で行なった。この系の特徴の一つに様々なパラメタの高い制御性が挙げられる。これを利用して連続準位の伝導の on/off することで、連続準位の伝導がある場合に量子ドットの共鳴ピーク形状が大きく歪むことを観測した (図

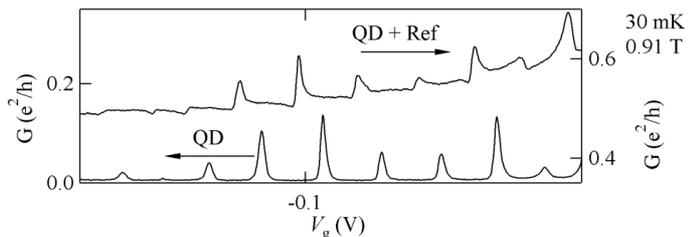


図 2. 量子ドット・AB リング複合系に現われる Fano 効果。量子ドットのみゲート電圧 V_g に対する伝導度 G は通常のクーロン振動だが (下)、量子ドットと参照経路を同時に透過させると Fano 効果が発現する (上)。

2)。Fano 共鳴の特徴的なピーク形状の解析から、これが Fano 効果の発現を観測していることが明らかになった。

Fano 効果には特徴的な共鳴ピーク形状が現われるが、これが外部磁場の変化に対して周期的に変化することを確認した (図 3)。これは連続準位と離散準位が空間的に分離されているという AB 干渉計に原因がある。ピーク形状の周期的な変化は AB 振動の周期

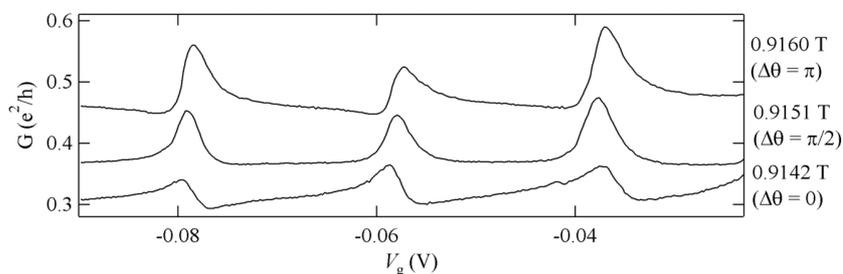


図 3. 磁場による Fano 干渉の制御。位相差を逆転させると ($\Delta\theta = \pi$) 非対称形状が逆転する。

と一致しており、これは AB 効果を通じた Fano 干渉の位相の制御であるといえる。また、干渉の位相制御は連続準位のフェルミ波数を静電的に制御した場合でも実現可能であることを実証した。またこれらのデータの詳細な解析から、Fano 共鳴のピーク形状を表すパラメタ q が複素数であるべきことを明らかにした。これは連続準位と離散準位の空間分離のために、磁場の印加によって時間反転対称性が破られたことに対応する結果だと考えられる。静電的な位相制御については、Fano 効果が位相のパリティを検出する極めて強力な手段であることに依存する部分が多い。ただし、AB 干渉計はそれ自体が共鳴器として働くために、AB 干渉計に埋め込まれた状態での量子ドット本来の位相シフトの議論は、Fano 線型だけでなくモデルによる解析が必要である。

そこで AB 干渉計よりも更に簡便な干渉実験が T 結合型量子ドットで可能な点に着目し、次にこの系での実験を行なった。ここでは量子ドットは細線の横に接続しており、反射成分が Fano 干渉に寄与するはずで、実験的にもこれを確認した (図 4)。この系は AB 干渉計よりも簡略な構造をしているので、簡単なモデルによって干渉効果に対する測定温度の影響を調べることを試みた。測定温度の上昇は、位相の平均化と量子デコヒーレン

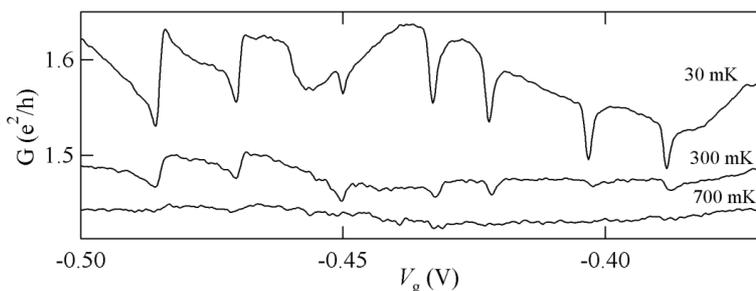


図 4. T 結合型量子ドットの伝導度に見られる Fano 効果。

スの増大によって干渉効果を減衰させることが一般的に知られているが、この系でも高温側での Fano 効果の消失を確認した。モデル解析の結果、Fano 効果の消失には量子デコヒーレンスだけでなく量子ドットを T 結合にしている細線部分での平均化の効果が大きく効いていることが明らかになった。ただし、系のサイズ自体は AB 干渉計よりも小さいので、先ほどの実験に比べるとその影響も小さいことを確認した。

T 結合型量子ドットにおいても量子ドットは外部の細線と繋がっているため、これでも量子ドット本来の位相を測定する系としては完全ではない。そこで、外部干渉計を使わない干渉実験を考案した。それは量子ドット自身を干渉計にしまい、Fano 効果からその情報を抜き出すというものである。この情報は量子ドットの波動関数に直結したものであり、コヒーレント伝導による干渉実験を通して量子ドットを理解するという、研究全体の目的に最も近いものである。このような干渉計が実現するためには、強結合準位という量子ドットの離散エネルギー準位のうち電極と特に強く結合した準位の存在が重要だと考えられる。これによって、ある実験条件においては強結合準位が連続準位としての役割を果たして、外部干渉系のない単一量子ドットの電気伝導においても Fano 効果が観測されることが期待できる。

実験では幾つかの点から強結合準位の存在を確認した。まず、ある測定条件では量子ドットの伝導度がクーロン振動に比べてはるかにゆっくりとしたバックグラウンドを持つ事が分かった。また、量子ドットを有限バイアス下で測定した伝導度にも、通常のクーロン振動にみられるクーロンダイヤモンドとは別の大きな構造を見いだした。この構造は零バイアス伝導度のゆっくりとしたバックグラウンドと連動して現われるものである。また、個々のクーロン振動ピークに着目すると、全て Fano 効果に見られる特徴的な共鳴ピーク形状へと変化してしまっているのが分かった。これらはいずれも強結合準位とそれ以外の準位が同時に量子ドットを通過できる多準位伝導状態において期待される Fano 効果の特徴である (図 5)。

Fano 共鳴のピーク形状をよくみると、パラメタ q の符号がバックグラウンドの振動の山と谷の部分で入れ替わっていることが分かった。 q の符号は常に正か負のどちらかのパリティに固定されている

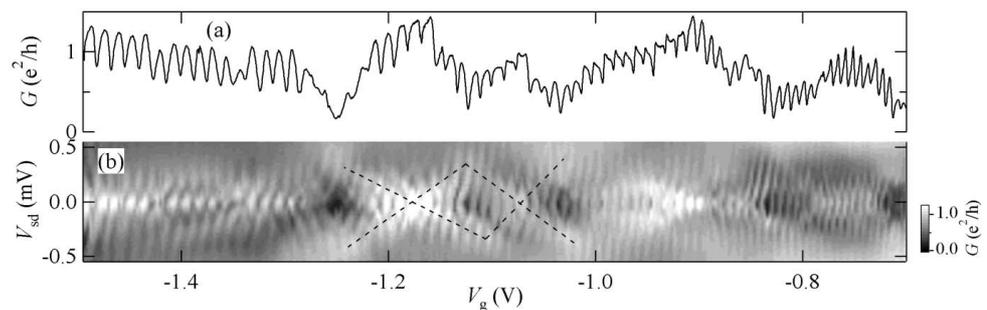


図 5. 多準位伝導下における単一量子ドットにみられる Fano 効果。(a) 沢山の Fano 線型のクーロン振動ピークが強結合準位によるバックグラウンドの上になっている。(b) 有限バイアス下での測定にも強結合準位による V_g に対する大きな

ものに固定されているものだとこれまで過去の実験事実から思われてきた。しかし、符号が一定であることは本来直感と反する事実であり、同位相の問題として長年にわたって謎とされてきたものである。これに対する一つの解答が強結合準位の存在であると理論的に予言されていたが、この実験結果は理論の予想と良く一致するものであった。したがって、この実験によって同位相の問題に対する実験的な解答が得られたと考えられる。

さて、もう一方の多電子現象としては様々なものが考えられるが、ここではスピン散乱に関連する現象に的を絞った。量子ドットの電子数が奇数の場合、量子ドット上には必ず $1/2$ 以上の孤立スピンが発生し、伝導電子との間にスピン散乱が生じる。

このスピン散乱によって量子ドットのスピンと伝導電子のスピンの絡み合いを起こし、その結果、量子デコヒーレンスが生じるものと予想されている (図 6)。

これを確かめるために、AB 干渉効果の干渉振幅をもってコヒーレンスの指標とし、スピン反転の有無による干渉振幅を定量的に比較する実験を試みた。測定試料は量子ドットが組み込まれた AB 干渉計である。現実の試料では理論的に考察されているよりも複雑な相互作用が存在するので、これを排除してできるだけ理想的な実験状況にするために量子ドットをスピンペアと呼ばれる特別な状態において実験を行なった。ここから確かにスピン反転過程が存在し得る場合とそうでない場合とでコヒーレンスに定量的な差が出ることを明らかにした (図 7)。

量子ドットと伝導電子とのスピン散乱は十分低温では近藤状態の形成に繋がる。これは、まさに量子ドットと周辺系との相互作用による多体効果である。まず前述の実験と同様に AB 振動の振幅からコヒーレンスの定量性を調べた。その結果、近藤状態の発達が不十分な場合には、スピン反転によるデコヒーレンス過程が非ユニタリ極限の近藤状態と共存していることを明らかにした。しかし、AB 振動を示す成分に関しては、近藤状態での特異な位相シフトに由来する Fano 効果と近藤効果の共存状態が理想的な形で実現していることを見いだした (図 8)。これは二端子測定という実験状況を考えると一見不自然な結果であり、これは AB リングに張り付いた特別なモードが発生している可能性を示唆している。

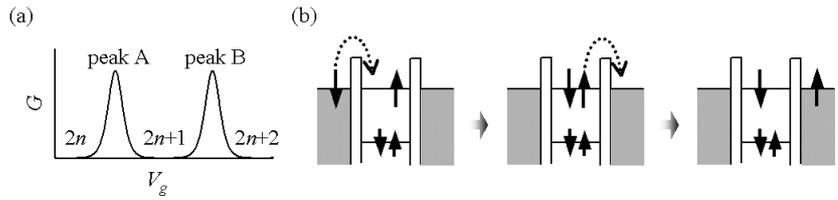


図 6. (a)電子数が奇数($2n+1$)のクーロン谷では量子ドットがネットスピンを持つ。(b)スピンを持つ量子ドットを伝導電子が通過するときに起きるスピン反転の模式図。

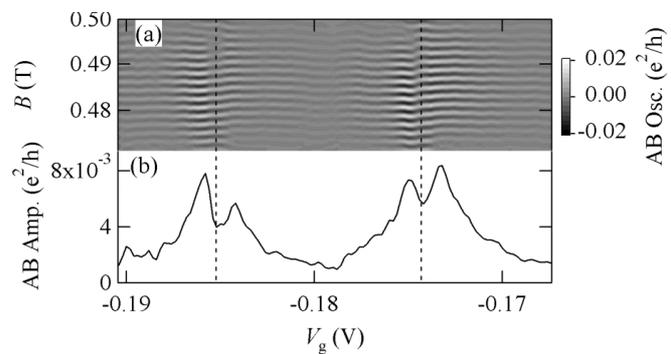


図 7. (a)スピンペアのクーロン振動ピーク対に対して AB 振動を測定した結果。(b) (a)の図をまとめたもので、ゲート電圧 V_g に対する AB 振動の強度をプロ

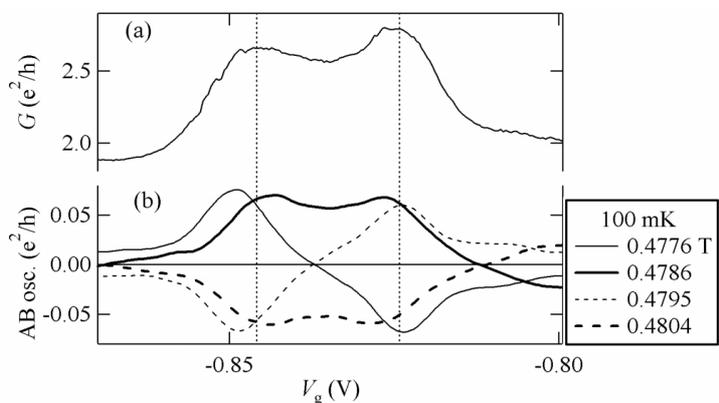


図 8. (a)近藤効果によって 2 本の破線の内側で伝導度が大きくなったクーロン振動。(b)AB 振動成分は Fano-近藤効果に期待される伝導度形状とその磁場依存性を示している。