

氏名・(本籍)	おかざきゆうま 岡崎雄馬
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	理博第2674号
学位授与年月日	平成24年3月27日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科, 専攻	東北大学大学院理学研究科(博士課程)物理学専攻
学位論文題目	半導体量子ドット構造における近藤効果の研究
論文審査委員	(主査) 教授 平山 祥郎 教授 倉本 義夫 教授(客) 山口 浩司 准教授 遊佐 剛 准教授(客) 佐々木 智

論文目次

1 Preface	
2 The Basic Concepts	
3 Experimental Methods	
4 Spin-Orbital Kondo Effect in a Parallel Double Quantum Dot	
5 Current Noise Measurements	
6 Shot Noise Measurements for a Kondo Correlated Quantum Dot	103
Bibliography	

論文内容要旨

The Kondo effect is a characteristic phenomenon in the physics of strongly correlated electrons. Recently, the Kondo effect had been discovered in artificial quantum dot structures, which can be realized by recent progress in the fabrication of nanometer-scale electronic devices. A realization of such “artificial Kondo” system had opened unprecedented opportunities to uncover its deeper aspects, such as probing exotic Kondo states and investigating their nonequilibrium properties, with the aid of their excellent controllability of relevant parameters. Electron transport can reveal various aspects of the Kondo effect: Conventional dc conductance measurement enables a spectroscopy of local density of states within the quantum dot. Moreover, current noise measurement can yield valuable information on the microscopic mechanisms involved in the charge transport. This doctoral dissertation describes two following experiments investigating the Kondo effect in terms of such transport measurements.

In the first part, dc conductance properties of the two-orbital Kondo effect involving both spin and orbital

(pseudospin) degrees of freedom were examined in a parallel double quantum dot with a sufficient interdot Coulomb interaction and negligibly small interdot tunneling. The Kondo effect was observed at the interdot Coulomb blockade region with degeneracies of both spin and orbital degrees of freedom. When the orbital degeneracy is lifted by applying a finite detuning, the Kondo resonance exhibits triple-peak structure, indicating that both spin and orbital contributions are involved.

In the second part, we demonstrate measurements of shot noise for the Kondo quantum dot, whose low-temperature conductance reaches the unitary limit value. Measured Fano factor is enhanced to 1.6 for a small bias regime, in which the dc conductance obeys the Fermi liquid formula. The value of the observed Fano factor agrees well with the theoretical prediction, and indicates that transport is mediated by a combination of one and two particle scattering processes. Additionally, we found unexpected logarithmic temperature dependence in the Fano factor for a large bias regime, in which the transport window exceeds the width of the Kondo resonance.

論文審査の結果の要旨

GaAs系の半導体量子ドット構造は、量子情報処理やスピントロニクスなどへの応用の観点から近年注目を集めている。特に、量子ドットの制御性の良さを活かして、ドットのスピン状態と外部の伝導電子との強い相互作用に由来する近藤効果が盛んに研究されている。本研究では、単一、および二重量子ドット系において、軌道自由度に由来する擬スピン近藤効果の観測やショット雑音測定を通じて、近藤効果特有の電子相関を明らかにした。

まず、単一量子ドットにおいては、通常の電流測定に加えて、電子の粒子性に起因する電流のゆらぎ、すなわちショット雑音の測定を行った。この実験を行うために、本研究ではデジタイザと自作の低温アンプを組み合わせたMHz帯の雑音測定系を独力で新規に立ち上げた。後方散乱電流に対して定義されるショット雑音は、電子間に相関がなければポワソン統計に従ってファノ因子が1となるが、近藤効果が起こっている量子ドットにおいては、電子間に強い相関が働くことを反映して、ファノ因子が増大することが予測されるが、近藤効果が十分強く起こっているデバイスでショット雑音測定を試みたものはこれまでなかった。本研究では量子ドットのサイズを量子ドットとリード間の結合を十分に保ったまま微細化した。試料のパラメータを最適化することで、ユニタリ極限という強い近藤領域を実現することに成功し、その領域でショット雑音測定を行った。得られた結果はソース・ドレインバイアス電圧が小さい場合にはショット雑音のファノ因子が1.6になることを示したが、これは最近報告された理論の予測と一致している。さらに、ソース・ドレインバイアス電圧を大きくして近藤相関を壊した場合には、ファノ因子が1に漸近するという結果も得られた。

さらに、本研究では近藤効果が生じるドットにもう一つのドットが近接した難しい構造を作製した。二つの近接した量子ドットが強く静電結合した領域で、従来のスピンによる近藤効果に加え、電子がどちらのドットを占有するかという軌道の自由度に由来する軌道近藤効果（擬スピン近藤効果）の実験を行った。その結果、スピンと軌道が同時に関与する多重縮重状態の近藤効果を世界で初めて明瞭に観測することに成功した。これまで、二重量子ドットにおいて、スピンのみ、もしくは擬スピンのみの近藤効果は報告されていたが、両者が同時に関与する多重縮重状態の近藤効果は本研究が初めてである。

以上の研究内容は、当該分野におけるオリジナリティーの高い成果であり、自立して研究活動を行うに必要な高度な研究能力と学識を有することを示している。したがって、岡崎雄馬提出の博士論文は、博士（理学）の学位論文として合格と認める。