

平成 30 年 7 月 17 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17680

研究課題名(和文) 電流ゆらぎ測定を用いたスピン流の緩和ダイナミクスの解明とその制御

研究課題名(英文) Investigation of relaxation dynamics of the spin current using current fluctuation measurement

研究代表者

荒川 智紀(Arakawa, Tomonori)

大阪大学・理学研究科・助教

研究者番号：00706757

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：スピン流を印加する対象となるカーボンナノチューブの人工原子にSU(2)とSU(4)の2種類の近藤効果を発現させることに成功した。近藤効果とは電子のスピンに起因する量子多体現象であり、低温でのスピン流の緩和においても重要な役割を果たす。さらに、これらの近藤効果を系統的に制御し、独自に開発した測定系を用いて電流ゆらぎ測定を行った。その結果、近藤効果に伴う電子の散乱現象を定量的に評価することに成功し、理論と一致する結果を得た。また、GaAs/AlGaAs、グラフェンの二次元電子系において電流ゆらぎ測定を行い、非平衡状態において発現する現象の起源の解明につながる成果を得た。

研究成果の概要(英文)：We succeeded to develop the two types of Kondo effect of SU(2) and SU(4) in artificial atom of carbon nanotube. The Kondo effect is a quantum many body phenomena caused by an electron spin and plays an important role in relaxing the spin current at low temperature. In addition, we have systematically controlled these Kondo effects and measured the current fluctuation using a handmade measurement system. As a result, we succeeded to quantitatively evaluate the electron scattering phenomenon accompanying the Kondo effect, and obtained results consistent with the theory. We also measured the current fluctuation in the two-dimensional electron system of GaAs / AlGaAs and graphene, and got the result which clarified the origin of the phenomenon which is appears in the non-equilibrium state.

研究分野：数物系科学

キーワード：スピン流 電流ゆらぎ メソスコピック系 ショット雑音 近藤効果

1. 研究開始当初の背景

電子のスピン自由度に起因する現象が注目され、世界的に研究が行われている。このスピンの関わる現象は多岐にわたるが、私は主に以下の二つに焦点を絞り研究を行った。

一つ目はスピン流である。通常の電流は電荷の流れであるのに対し、スピン流はスピン角運動量の流れである。このスピン流は応用の観点から注目されており、磁気センサー、エネルギー損失を伴わない情報伝達素子、エネルギー変換素子、などの実現に向けて盛んに研究されている。近年では、半導体、金属、有機物、それらの複合系などにおいてスピン流の生成・検出が実現してきており、その効率が重要視されている。一方で、スピン流は基礎物理の観点からも重要な概念である。スピン流はアップとダウンの電子の化学ポテンシャルに差がある特殊な非平衡状態であり、そこで生じる緩和現象は非自明なものである。この緩和現象の微視的な理解を得ることは、応用・基礎双方の観点から重要と考えられる。

二つ目は人工原子におけるスピンである。固体素子中の電子には大きく分けて伝導電子と局在電子がある。上述のスピン流はスピンの偏った伝導電子であるのに対し、ここで対象とするのは人工原子にトラップされたスピンをもつ局在電子である。この人工原子の系は量子コンピュータの量子ビットとして注目されている。また、この系は局在したスピンの振る舞いを調べるのに最適な系であり、スピンが関わる多体効果（主に近藤効果）の基礎的な研究の舞台としても盛んに研究が行われている。

2. 研究の目的

以前の研究で、電流ゆらぎ測定を用い、スピン流の有効温度を見積もることに成功していた [T. Arakawa *et al.*, PRL **114**, 016601 (2015).]. しかし、この過程でスピン流の有効温度がスピン流を生成する過程で大きく上がってしまうことが明らかになった。本研究の目的は測定手法を改良することで、電子のエネルギー分布をより詳細に測定し、非平衡スピン緩和を解明することである。

一方、近藤効果は、金属中に微量に含まれる磁性不純物の局在スピンと伝導電子のスピンに起因する多体効果である。この近藤効果はスピン流の緩和に対しても重要な役割を果たすことが知られている。本研究では、人工原子を用いることで単一の近藤状態を人工的に用意し、その非平衡状態での振る舞

いを明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では電流ゆらぎ測定を主たるプローブとする。通常の伝導度測定が時間的に平均化された電流 $\langle I \rangle$ を測定するのにに対し、電流ゆらぎ測定は電流のゆらぎ成分 $\langle I^2 \rangle$ を測定する。この測定のメリットは非平衡領域においても定量的な議論が可能である。

測定はすべて、熱的な電子のゆらぎを抑えるために低温環境下で行った。特に、希釈冷凍機中 (20 mK ~ 1 K) に独自に構築した測定系は世界有数の高感度 (分解能 10^{-29} A²/Hz) を有しており [T. Arakawa *et al.*, APL **103**, 172104 (2013).], これを主に用いた。

4. 研究成果

(1) 人工原子における近藤効果

本研究ではカーボンナノチューブ (CNT) からなる人工原子を用いた。CNT は化学気相成長法で Si 基板上に成長させている。さらに微細加工法を用いて図 1 に示すような電気伝導を測定するためのソース・ドレイン電極を接続している。また、人工原子内の電子数を調節するためのゲート電極を用意した。

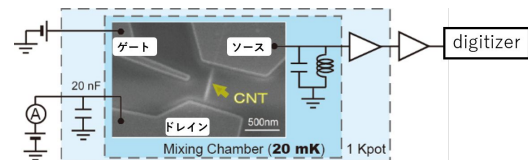


図 1 試料と測定系の概念図

この系ではゲート電極に印加する電圧を変化させることで、CNT 内の電子を一個ずつコントロールすることができる。その際、人工原子内の電子数が奇数個の時には正味のスピン 1/2 となり近藤効果を発現する。図 2 は 20 mK で測定された平衡状態の伝導度のゲート電圧依存性である。伝導度のピークが近藤効果の表れている領域である。一般に

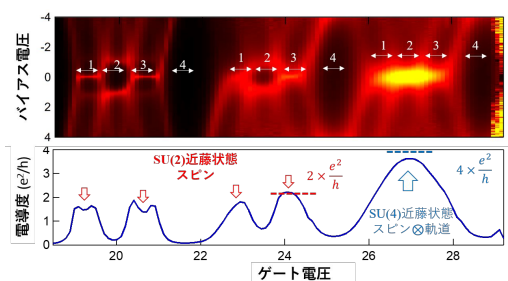


図 2 測定に用いた試料の 20 mK における電導度のゲート依存性。矢印で示す領域が近藤状態。

近藤効果が理想的な状態であると伝導度が量子化電導度($2e^2/h$)に達する(ユニタリー極限)。本研究では複数の試料を測定し、ユニタリー極限に達する理想的な近藤状態を用意すること成功した。

通常のスピンの関与する近藤効果は SU(2)近藤効果と呼ばれている。ここではスピンのアップ・ダウンの2自由度が縮退していることが重要である。CNT では、この自由度に加えて右回り・左回りの軌道の2自由度が存在する。これら4自由度が全て縮退する場合には SU(4)近藤効果と呼ばれる現象が発現する。本研究ではゲート電圧を制御し、人工原子とソース・ドレイン電極との結合を調節することで SU(4)近藤状態を用意することにも成功した。

以上のように実現した SU(2)・SU(4)近藤状態に対し、温度、磁場、バイアス電圧をパラメーターとして伝導度及び電流ゆらぎを測定した。ここで、バイアス電圧とはソース・ドレイン間の電圧差であり、これを変化させることは非平衡度合いを変化させることに対応する。

(1-1) 有効電荷と相互作用の強さ

近藤効果の平衡領域での振る舞いはフェルミ液体論で説明できる。しかし、非平衡領域での振る舞いについては実験的な検証が不十分であった。そこで、近藤状態において伝導度と電流ゆらぎのバイアス依存性詳細に解析し、理論との比較を行った。

図3は測定された電流ゆらぎのバイアス電圧依存性である。SU(2)近藤効果がない場合とある場合で明確な差が出ていることがわかる。近藤効果の場合に注目すると、ゼロバイアス付近(平衡状態近傍)では電流ゆらぎが少ない。一方、バイアスの増加に伴って非

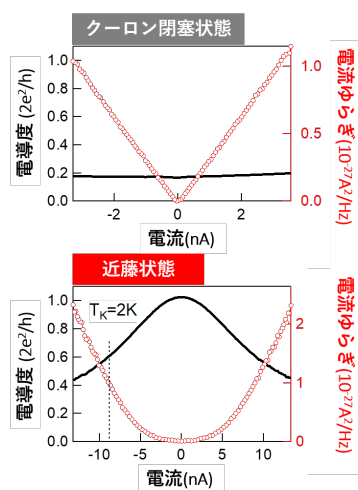


図3 近藤状態とそれ以外の領域で測定した電導度と電流ゆらぎ信号。

線形に電流ゆらぎが増大している。これが、理論的に予測されていた2電子後方散乱の寄与である。ここまで明瞭に観測できたのは初めてである。さらに、これを解析することで有効電荷を求め、理論(5/3)と定量的に一致する結果を得た。ここで、有効電荷が1を超えるのは近藤効果が多体効果故に、複数の電子が絡み合って同時に散乱されるためである。

上記のように、この有効電荷の値は多体効果の相互作用の大きさを示す一つの指標といえる。この有効電荷の、磁場の増加や温度の上昇による変化も測定した。これらの外場によって近藤効果は弱められるが、有効電荷も減少することを確認した。また、SU(4)近藤状態に関しても同様の実験を行い、有効電荷の見積りに成功し、理論(4/3)と一致する結果を得た。

(1-2)SU(4)近藤状態から SU(2)近藤状態への遷移

上記の実験では SU(2)・SU(4)近藤状態間をゲート電圧の値で制御していた。この場合、人工原子とソース・ドレイン電極との結合も変化してしまう。そこで、より精密な実験を行うべく、磁場による近藤状態の制御を試みた。磁場の印可によって、スピンの2自由度はゼーマン分裂によって縮退が解け、軌道の2自由度も軌道ゼーマンによって縮退が解ける。一般にこれら2つのゼーマン効果の係数は異なるが、軌道ゼーマンの方は磁場の印加する角度によって制御することができる。本実験ではこの性質を利用し、SU(4)近藤状態

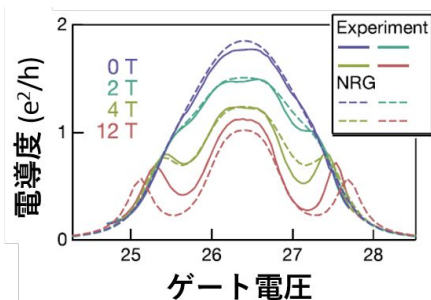


図4 磁場を加えて測定した電導度のゲート電圧依存性と理論値の比較。

から SU(2)近藤状態への連続的な制御に成功した。

図4に示すのは各磁場で得られた伝導度のゲート電圧依存性である。理論計算の結果とよく一致しており、量子状態が期待通りに制御できていることが分かる。この中央のゲート電圧では SU(4)近藤状態から SU(2)近藤状態への遷移が起こっていると考えられるが、電導度測定ではこの2つを区別することは

きない。そこで、実際に電流ゆらぎ測定を行い、有効電荷を評価することで、SU(4)からSU(2)への遷移を実証した。さらに、相互作用の強さを示すウィルソン比に対する有効電荷の振る舞いは理論とよく一致する結果となった。

これら一連の結果によって量子多体系の非平衡状態の理解は進展したと思われる。

(2) 高移動度 QPC におけるエネルギー緩和

量子ポイントコンタクト(QPC)は最も典型的な量子伝導体であり、半導体 2 次元系に狭窄構造を作ることによって実現できる。この系における電気伝導は電流ゆらぎも含めてよく理解されている。しかし、電流ゆらぎを精密に測定すると、微かに余剰な電流ゆらぎが存在することが知られている。

本研究では世界最高レベルの高移動度の GaAs/AlGaAs 二次元電子系上に作られた QPC において電流ゆらぎ測定を行った。結果、この試料においても有限の余剰な電流ゆらぎが存在し、磁場の印加によって減少するという結果を得た。この試料に不純物によるポテンシャルゆらぎはほとんどないと考えられるため、バイアス電圧で加えたエネルギーが緩和する過程で電子系の温度を上昇させる機構が余剰な電流ゆらぎの主な要因であるという結果を得た。

(3) グラフェンにおける $1/f$ 雑音

電流ゆらぎ測定の技術を応用し、グラフェンにおける $1/f$ 雑音を測定した。 $1/f$ 雑音は抵抗のゆらぎに伴う雑音である。グラフェンにおいては、ゲートで電子密度を変調する際に、電子とホールが切り替わる点において $1/f$ 雑音が増大する。本研究ではバイアス電圧を系統的に変化した実験を行い、特定のバイアスの印加で $1/f$ 雑音の振る舞いが大きく変わることを発見した。これは $1/f$ 雑音の増大に電子ホールパドル間の電子の移動が関係していることを示している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 7 件)

1. H. Taniguchi, S. Suzuki, T. Arakawa, H. Yoshida, Y. Niimi, K. Kobayashi, "Fabrication of thin films of two-dimensional triangular antiferromagnet Ag₂CrO₂ and their transport properties", AIP Advances, 査読有, 8巻, 2018, 025010-1-6.

DOI : 10.1063/1.5016428

2. M. Ferrier, T. Arakawa, T. Hata, R. Fujiwara, R. Delagrangé, R. Deblock, Y. Teratani, R. Sakano, A. Oguri, K. Kobayashi, "Quantum Fluctuations along Symmetry Crossover in a Kondo-Correlated Quantum Dot", Physical Review Letters, 査読有, 118巻, 2017, 196803-1-5.
DOI : 10.1103/PhysRevLett.118.196803
3. T. Muro, Y. Nishihara, S. Norimoto, M. Ferrier, T. Arakawa, K. Kobayashi, T. Ihn, C. Rossler, K. Ensslin, C. Reichl, and W. Wegscheider, "Finite Shot Noise and Electron Heating at Quantized Conductance in High-mobility Quantum Point Contacts", Physical Review B, 査読有, 93巻, 2016, 195411/1-7.
DOI : 10.1103/PhysRevB.93.195411
4. Y. Teratani, R. Sakano, R. Fujiwara, T. Hata, M. Ferrier, T. Arakawa, K. Kobayashi, and A. Oguri, "Field-enhanced Kondo correlations in a half-filling nanotube dot: evolution of an SU(N) Fermi-liquid fixed point", Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, 85巻, 2016, 094718/1-18.
DOI : 10.7566/JPSJ.85.094718
5. T. Hata, T. Arakawa, K. Chida, S. Matsuo, and K. Kobayashi, "Giant Fano factor and bistability in a Corbino disk in the quantum Hall effect breakdown regime", Journal of Physics: Condensed Matter, 査読有, 28巻, 2016, 055801/1-7.
DOI : 10.1088/0953-8984/28/5/055801
6. M. Ferrier, T. Arakawa, T. Hata, R. Fujiwara, R. Delagrangé, R. Weil, R. Deblock, R. Sakano, A. Oguri, and K. Kobayashi, "Universality of Non-equilibrium Fluctuations in Strongly Correlated Quantum Liquids", Nature Physics, 査読有, 12巻, 2016, 230-235.
DOI : 10.1038/nphys3556
7. S. Takeshita, S. Matsuo, T. Tanaka, S. Nakaharai, K. Tsukagoshi, T. Moriyama, T. Ono, T. Arakawa, and K. Kobayashi, "Anomalous behavior of $1/f$ noise in graphene near the charge neutrality point", Applied Physics Letters, 査読有, 108巻, 2016, 103106/1-4.
DOI : 10.1063/1.4943642

[学会発表](計 142 件)

1. 荒川智紀、則元将太、岩切秀一、浅野拓也、新見康洋、小林研介、「スピン注入を目的とした円偏光マイクロ波生成技術の開発」、日本物理学会第73 回年次大会、2018年、東京理科大学
2. T. Arakawa, "Microscopic understanding of spin current probed by shot noise (招待講演)", APS March Meeting 2016, 2016, Baltimore, Maryland(USA)

3. T. Arakawa, M. Maeda, F. Meydi, Y. Niimi, K. Kobayashi, J. Shiogai, M. Kohda, J. Nitta, M. Ciorga, M. Utz, D. Schuh, D. Bougeard, and D. Weiss, "Microscopic dynamics of spin current probed by noise measurement", 13th Joint MMM-Intermag Conference, 2016, San Diego, California (USA)
4. 荒川智紀、塩貝純一、M. Ciorga、D. Schuh、好田誠、新田淳作、D. Bougeard、D. Weiss、小野輝男、前田正博、小林研介、
「(Ga,Mn)As/GaAsエサキダイオードにおけるショット雑音」、日本物理学会2015年秋季大会、2015、関西大学(大阪府吹田市)
5. T. Arakawa, M. Maeda, T. Ono, J. Shiogai, M. Kohda, J. Nitta, M. Ciorga, M. Utz, D. Schuh, D. Bougeard, D. Weiss, K. Kobayashi, "New perspectives of mesoscopic current noise: spin accumulation and Kondo effect", 5th Summer School on Semiconductor/Superconducting Quantum Coherence Effects and Quantum Information, 2015, Hotel Sun valley Nasu (栃木県那須郡)
6. T. Arakawa, J. Shiogai, M. Ciorga, M. Utz, D. Schuh, M. Kohda, J. Nitta, D. Bougeard, D. Weiss, T. Ono, and K. Kobayashi, "Shot noise in the presence of spin imbalance", International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2015 (SFS2015), 2015, 京都大学(京都)
7. T. Arakawa, J. Shiogai, M. Ciorga, M. Utz, D. Schuh, M. Kohda, J. Nitta, D. Bougeard, D. Weiss, T. Ono, and K. Kobayashi, "Bias dependent shot noise in (Ga,Mn)As/GaAs Esaki diode", The 21st International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-21), 2015, 仙台国際センター(宮城県仙台市)
8. T. Arakawa, M. Maeda, T. Ono, J. Shiogai, M. Kohda, J. Nitta, M. Ciorga, M. Utz, D. Schuh, D. Bougeard, D. Weiss, K. Kobayashi, "Shot noise induced by spin accumulation (招待講演)", ISSP International Workshop on New Perspectives in Spintronic and Mesoscopic Physics (NPSMP2015), 2015, 東京大学物性研究所(千葉県柏市)

〔その他〕

ホームページ等

スピンのゆらぎを初めて検出

http://meso.phys.sci.osaka-u.ac.jp/spin_shot_noise.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

荒川 智紀 (ARAKAWA, Tomonori)

大阪大学・理学研究科・助教

研究者番号：00706757

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者
なし

(4) 研究協力者
なし