

| | |
|------|---------------------------|
| 氏名 | 小林 研介 |
| 所属機関 | 大阪大学・大学院理学研究科・物理学専攻 |
| 研究題目 | 高精度ゆらぎ測定を用いた非平衡スピン依存伝導の研究 |

1. 研究の目的

近年、ナノテクノロジーと材料科学の発展に支えられて、既存の半導体素子とは異なる特色を持つ次世代型の固体素子の開発が盛んに進められている。例えば、電荷とスピンという電子の持つ自由度の両方を用いた次世代素子の開発を目指すスピントロニクス研究はその代表例である。一方、一般に、トランジスタのような能動素子においては、**非平衡電気伝導を真正面から取り扱う必要がある**。この事情は、既存の半導体素子においても、次世代素子においても、変わることはない。特に、素子の性能を決定づける信号雑音比は、最終的には素子における**非平衡電流ゆらぎ(雑音)**で決まる。そのため、素子性能を向上させるための非平衡電気伝導の研究の必要性は、今後も高まる一方である。

本研究の目的は、**微細加工技術を駆使して作製した微小な固体素子(メソスコピック系)**を用いて、多彩な非平衡スピン依存伝導を解明することにある。本研究の特色は、素子を通る電流のゆらぎ(雑音)に注目することにある。我々が独自に開発してきた**世界有数の高精度の電流ゆらぎ測定系**を用いて、人工原子をはじめとする様々な素子におけるスピン依存伝導を詳細に調査する。このような研究によって、これまで困難であった**非平衡スピン伝導の微視的な素過程の電氣的検出**が可能となる。

本研究は、多彩な非平衡スピン伝導の詳細を解明すると同時に、スピントロニクス研究における非平衡電流ゆらぎ測定の有用性を確立する先駆的な研究と位置づけられる。

2. 研究の内容(手法、経過、評価など)

概要

本研究はメソスコピック系と呼ばれる微小な固体素子を用いて、素子を通る電子のスピン依存性を高精度な電流ゆらぎ測定で明らかにすると同時に、それを利用した新しい機能の創出を行うことを目的とした。素子は、電子線リソグラフィやフォトリソグラフィを組み合わせることで作製した。素子に電圧を印加し、外部磁場やゲート電圧などによって素子の電子状態を制御しながら、電流と同時にそのゆらぎを測定し、解析を行った。この手法を用いて、(1) 非磁性半導体におけるスピン注入とスピン分極電流の生成、(2) コヒーレント伝導過程の検出、(3) 近藤効果における単一スピン散乱の検出、の3つのテーマを軸として研究を行った。

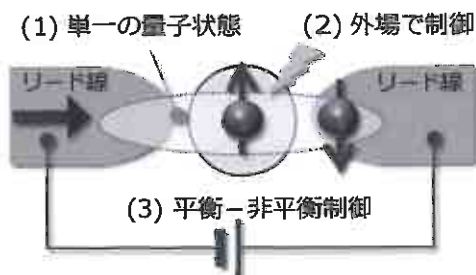
3年間の研究期間で最も進展があったのはテーマ(3)であり、**論文[3][7]**を発表した([...]で示した数字は、**「4. 3. 成果論文」に記載した論文**を指す。以下同)。テーマ(1)と(2)についても、それぞれ**論文[8]**および**論文[1][2][6]**を発表した。それ以外にも、非平衡量子ホール状態**[4]**およびゆらぎの定理**[5]**についても、研究が進展した。このような非平衡輸送過程に関する研究は、今後のスピントロニクスの発展に資するものである。以下では、ただ一つの電子(スピン)が関わる伝導に関して、極めて定量性の高い成果が得られたテーマ(3)を中心に、研究内容を記載する。

メソスコピック系とは

これまで、スピン依存伝導の研究は主にバルク物性の評価を通じて行われてきたが、1990年代以降の微細加工技術の発展により、新しい研究手法が現れてきた。それは**微小な固体素子(メソスコピック系)を舞台とする研究手法**である。それらの多くは、半導体や金属薄膜を微細加工して作られる数nm～数μm程度の小さいサイズの素子である。しかし、それらはいくつかの外部パラメータによって制御できるようにデザインされている。

2. 研究の内容(続き)(書ききれない場合には、同一形態のページを追加しても結構です)

メゾスコピック系を対象とする研究は、従来の研究に比べて、右図に示すように、(1) 単一の量子状態に対する測定が可能、(2) 外場により量子状態の制御が可能、(3) 平衡状態から非平衡状態までを連続的に制御可能である、という利点を持つため、輸送現象の素過程を直接取り扱える点に大きな特色がある。



近藤効果

我々は、様々なメゾスコピック系を用いて、スピン依存伝導の研究を行ってきた。対象としたメゾスコピック系は、人工原子、量子細線、横型スピバルブ、グラフェン等、多岐にわたる。特に、**人工原子における近藤効果は最も基本的なスピン依存伝導の代表例**と位置づけられる。

近藤効果とは、1964年に我が国の近藤淳によって解明された量子多体効果である。具体的には、微量な磁性不純物を含む金属において、不純物のスピンを伝導電子のスピンが遮蔽することにより、「近藤一重項」と呼ばれる特異な量子状態が形成され、低温での電気抵抗が増大する、という現象である。近藤効果は量子多体効果の典型例であり、強相関電子系(重い電子系や高温超伝導など)の研究などにおいて半世紀以上にわたって数多くの研究が行われてきた。理論的には、近藤状態は「局所フェルミ液体」として記述されることが確立しており、**近藤状態の振る舞いを研究することは、強い電子相関に支配される量子液体を研究することでもある。**

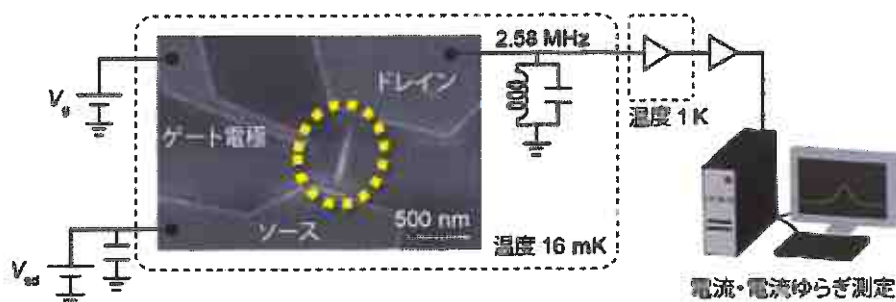
人工原子における近藤効果

これまでの多くの実験的研究においては、巨視的な試料を用いて、多数のスピンに関わる集団平均を相手とする方法がとられてきた。しかし、1999年、人工原子における単一サイトの近藤効果が報告され、実験手法に新展開がもたらされた(Goldhaber-Gordon, *Nature* **391**, 156 (1998))。人工原子とは、微細加工技術を使って作製される微小な電子回路であり、電子の数を一個ずつ制御できる素子である。したがって、たった一個の電子(スピン)によって引き起こされる近藤効果を観測し、制御することが可能である。実際、人工原子においては、近藤温度・スピン状態・軌道状態・ゼーマン分裂・平衡-非平衡状態など、近藤効果に関するあらゆるパラメータを制御できる。したがって、**近藤状態にある人工原子は、非平衡状態も含む量子多体系/量子液体についての理論を、理論に忠実な形で高い精度で検証できる理想的な舞台**である。

実験手法

右下図に、実験に用いた試料の電子顕微鏡写真および電流ゆらぎ測定回路の概略図を示す。黄色い点線で囲まれた領域に見える白い筋が、長さが1 μm 程度の単一のカーボンナノチューブからなる人工原子である。このカーボンナノチューブは、CVD法によって作製されたものであり、電子線リソグラフィ技術を用いて、二つの電極(ソースとドレイン)の間に挟み込まれている。我々は、ゲート電圧を制御することによって、この人工原子にただひとつの電子を閉じ込め、それによって生じる近藤効果について調査した。

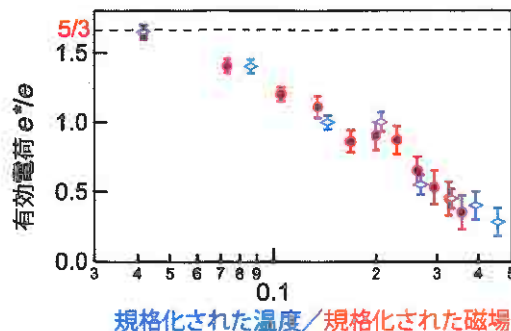
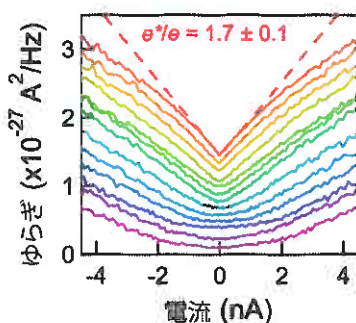
本研究において、我々は、人工原子に加えるゲート電圧や磁場を制御することによって、**理想的な近藤状態を実現**することができた。さらに、電流だけではなく、**電流に含まれる電流ゆらぎ(雑音)を世界最高水準の測定技術で精密に調べた。**



3. 研究の結論、今後の課題

実験結果と考察

我々は、一個のスピンのによる通常の近藤効果だけでなく、二個の場合や、電子軌道が複数ある場合などの多彩な近藤効果について、有効電荷を高精度で検出することに成功した（上図左）。有効電荷とは、近藤状態



を電流が流れる場合に、電子が近藤状態によって跳ね返される様子を表す量のことであり、電流雑音測定によって得られる。本研究の実験によって、近藤状態においては、一粒子の伝導過程のみではなく、電子正孔対の励起を伴う結果として、二個の電子が関与する伝導過程があり、それによって有効電荷が通常の値 (=1) よりも増大し、1.7に達することが分かった（上図左）。この有効電荷から、人工原子が極めて強い量子多体现象を示していることを実証できる。さらに、我々が得た有効電荷の値は、フェルミ液体論を非平衡に拡張した理論の予想と定量的に一致することが示される。したがって、この成果は、**非平衡状態にある強相関量子液体に対して、理論を定量的に検証するレベルでの精密な実験的研究が可能**であることを示す。

さらに、理論を検証しただけでなく、これまでに知られていなかった有効電荷の新しい性質を実験的に確立した（上図右）。有効電荷が、温度や磁場によってスケールされる、という結果である。このような非平衡状態におけるスケールリングは、本研究によって初めて明らかとなった（**成果[3][7]**）。

その他

我々は、上記以外にも、トポロジカル絶縁体端状態におけるスピン輸送を研究するための第一歩として、グラフェンにおける端状態を研究した。キラリティの異なる端状態の生成に成功し、さらに、端状態の非平衡性に基づくゆらぎを検出した（**成果[2]**）。これは、理論（Abanin-Levitov, *Science* **317**, 641 (2007)) で予想されていた端状態混合を証明した初の実験であり、今後の端状態の研究に大きな進展をもたらす。

我々は、スピン流に伴うショット雑音を検出することに成功している（T. Arakawa *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **114**, 016601 (2015))。この成果をもとに実時間でスピン流ダイナミクスを検出する理論提案を行った（**成果[8]**）。また、典型的なメゾスコピック系（量子細線）において、これまでで最も高精度な電流ゆらぎ測定を行い、熱流の役割の重要性を示した（**成果[6]**）。

研究の意義と展望

以上のような様々なスピン依存伝導を高精度の電流ゆらぎ測定によって調べた成果は、いずれも、固体素子中をスピンがどのように伝導するのか、という長年の問題を微視的な視点から明らかにしたものである。このような研究は、**スピン輸送を積極的に利用しようというスピントロニクス研究の更なる発展に資する**。特に、近藤効果に関する成果は、非平衡状態にある量子液体に対して、理論の予言を定量的に検証するレベルでの精密な実験的研究が可能であることを世界で初めて示したもので、大きな意義を持っている。量子多体现象の研究は、物理学の中でも長い歴史を持ち、数多くの研究が行われてきたが、**非平衡状態にある量子液体の挙動**については、現在でも、未踏の領域である。本研究はそのような研究の発展をもたらす引き金となるものと位置づけられる。これまで、超伝導や超流動など、量子液体の示す不思議な現象の研究は、主として平衡状態にある場合について行われてきた。しかし、今後、量子液体の性質を非平衡の領域まで拡大して調べることによって、**物質の新しい性質・機能を見いだせる可能性**が期待される。

4. 成果の価値(とくに判りやすく書いて下さい)

4. 1. 社会的価値

現在、スピントロニクス・強相関量子科学などの研究分野では、次世代素子の研究が活発に進められている。これらの次世代素子は、既存の半導体素子とは異なる特色を持ち、機能・消費電力の両面でグリーン・イノベーションに大きく貢献すると期待されている。一方、一般に、トランジスタのような能動素子は非平衡状態にあることが本質的である。さらに、その性能を決定づける信号雑音比は、最終的には素子における非平衡電流ゆらぎで決まる。そのため、素子性能の向上にむけた非平衡伝導過程の研究の必要性は今後も高まる一方である。したがって、本研究のように、**非平衡電子伝導を「ゆらぎ」の観点から定量的に明らかにする研究は、固体素子の開発に直接寄与する**ものである。特に、近藤効果についての我々の成果は、ただ一つの電子が生み出す雑音を解明したものであり、高い技術的な価値を持つ。

4. 2. 学術的価値

学術的に、我々の研究はスピン輸送を更に深く理解することに貢献する。特に、非平衡近藤状態の理論を定量的に検証し、新たな非平衡スケールリング則の存在を示した結果は、世界的に大きなインパクトを持ち、大きな注目を集めている。近年、**非平衡状態にある量子多体系に対する関心が世界的に高まっている**。スピントロニクス分野のみならず、強相関電子系・冷却原子ガスなどの分野においても、その最先端トピックの多くに「非平衡」が関わっている。近藤効果は、最も典型的な量子多体現象であるため、「非平衡」近藤効果の研究は、より**広範な非平衡量子多体効果の理解への出発点**となるという点で、必要不可欠である。得られた成果は、我々の知る限り、これまでの非平衡量子多体系の研究の中で最も定量性の高い精密な成果であり、学術的な価値を持つ成果であると自負している [科学新聞 1 面 (2015/12/11)]。

4. 3. 成果論文(本研究で得られた論文等を年代順に書いて下さい。未発表のものは公表予定を書いて下さい)

- [1] T. Tanaka, T. Arakawa, M. Maeda, K. Kobayashi, Y. Nishihara, T. Ono, T. Nozaki, A. Fukushima, S. Yuasa, "Leak current estimated from the shot noise in magnetic tunneling junctions," *Appl. Phys. Lett.* **105**, 042405 (2014).
- [2] S. Matsuo, S. Takeshita, T. Tanaka, S. Nakaharai, K. Tsukagoshi, T. Moriyama, T. Ono, K. Kobayashi, "Edge mixing dynamics in graphene p-n junctions in the quantum Hall regime," *Nature Communications* **6**, 8066 (2015).
- [3] M. Ferrier, T. Arakawa, T. Hata, R. Fujiwara, R. Delagrangé, R. Weil, R. Deblock, R. Sakano, A. Oguri, K. Kobayashi, "Universality of non-equilibrium fluctuations in strongly correlated quantum liquids," *Nature Physics* **12**, 230-235 (2016).
- [4] T. Hata, T. Arakawa, K. Chida, S. Matsuo, K. Kobayashi, "Giant Fano factor and bistability in a Corbino disk in the quantum Hall effect breakdown regime," *Journal of Physics: Condensed Matter* **28**, 055801 (2016).
- [5] K. Kobayashi, "What can we learn from noise? — Mesoscopic nonequilibrium statistical physics —," *Proceedings of the Japan Academy, Series B* **92**, 204-221 (2016).
- [6] T. Muro, Y. Nishihara, S. Norimoto, M. Ferrier, T. Arakawa, K. Kobayashi, T. Ihn, C. Rössler, K. Ensslin, C. Reichl, W. Wegscheider, "Finite Shot Noise and Electron Heating at Quantized Conductance in High-mobility Quantum Point Contacts," *Phys. Rev. B* **93**, 195411 (2016).
- [7] 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," *Phys. Rev. Lett.* **118**, 196803 (2017).
- [8] S. Iwakiri, Y. Niimi, K. Kobayashi, "Dynamics of pure spin current in high-frequency quantum regime," *Applied Physics Express* **10**, 053001 (2017).