

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔平成29年度研究進捗評価用〕

平成26年度採択分
平成29年3月15日現在

メゾスコピック系における非平衡スピン輸送の
微視的理解とその制御
Microscopic Understanding and Control of
Nonequilibrium Spin Transport in Mesoscopic Systems



課題番号：26220711

小林 研介 (KOBAYASHI KENSUKE)

大阪大学・大学院理学研究科・教授

研究の概要

本研究の目的は、固体素子における非平衡スピン輸送の解明と制御である。高精度電流ゆらぎ測定を用いて、非平衡近藤状態の解明・新規非平衡スピン輸送の開拓・実時間ダイナミクス研究への展開を行う。「ゆらぎ」という新しい観点から輸送の素過程を解明し制御する本研究は、スピン依存伝導の研究に、実験的・理論的に本質的な新展開をもたらす。

研究分野：量子輸送

キーワード：メゾスコピック系、近藤効果、スピントロニクス、非平衡、ゆらぎ

1. 研究開始当初の背景

物性物理学は、多電子系のおりなす多彩な現象を扱う学問である。なかでも、電荷とスピンの自由度が絡み合う多体効果の発現状態に関する理解が物性物理学の本質の一つであるといっても過言ではない。特に、近藤効果や巨大磁気抵抗効果に代表されるスピン依存伝導の研究が物性物理学において果たしてきた役割は、極めて大きい。長年にわたるスピン依存伝導の研究は、近年のスピントロニクス研究の興隆に結実し、その研究は、基礎研究が応用研究に直結する新たな段階に入っている。注目すべき点は、スピン注入やスピントランスファー効果のように、系に非平衡性を導入することによって多彩な現象が見いだされていることである。しかしながら、非平衡スピン輸送の素過程を理解し制御する研究は、世界的にも緒についたばかりであり、広大な未踏領域が残されている。

2. 研究の目的

メゾスコピック系とスピントロニクスの研究を融合させることによって、非平衡スピン輸送の定量的な理解と制御を実現することが本研究の目的である。この数年、スピントロニクス研究に刺激を受けて理論が大きく進展しており、非平衡スピン輸送の研究は実験・理論双方で機が熟している。高精度測定技術を武器に、実験家である代表者が複数の理論家と包括的な共同研究を行うことによって、メゾスコピック系における非平衡スピン輸送の微視的な理解とその制御を行う。

3. 研究の方法

世界最高精度の電流ゆらぎ測定を用いて、相互に密接な関連を持つ3つのテーマ、非平衡近藤状態の解明・新規非平衡スピン輸送の開拓・実時間ダイナミクス研究への展開、について研究を行う。対象となる固体素子は、カーボンナノチューブ・半導体二次元電子系・グラフェン等から作製される量子ドットなどのメゾスコピック系である。代表者小林の実験グループが、理論家である分担者・小栗、江藤、加藤、内海、連携者・阪野と一丸となって研究を行い、実験と理論との相互フィードバックを行いながら、非平衡近藤状態や熱・スピンの絡み合った非平衡スピン輸送を精密かつ定量的に理解し制御する。

4. これまでの成果

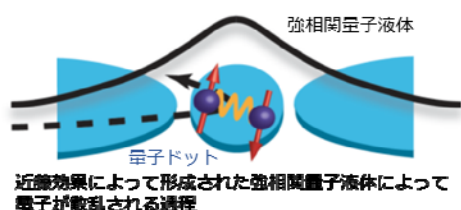
これまでの成果のうちで代表的なものを3件、以下に記載する。

(a) 非平衡近藤状態の解明[1,2]

カーボンナノチューブ量子ドットにおいて、SU(2)近藤状態と、軌道自由度を反映するSU(4)近藤状態を研究した。両方の場合で、伝導度がほぼユニタリ極限に達する、最も理想的な近藤効果の実現に成功した。さらに、伝導度・電流ゆらぎ測定を行い、その結果を理論と精密に比較することによって、強相関極限にある量子液体が実現されていることを実証した。また、これまで知られていなかった対数的な非平衡スケールリング則を実験的に確立した。

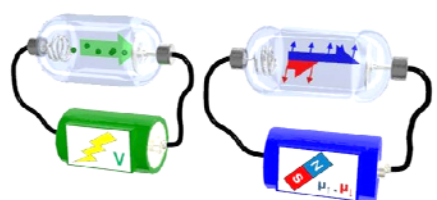
本成果は、非平衡量子多体系において行わ

れたこれまでで最も定量性の高い精密な実験である（下図参照）。同時に、フェルミ液体論を非平衡領域に拡張する方法論の妥当性を確認する大きな学術的意義を持つ。



(b) スピンショット雑音の実証[3]

古典的なショット雑音は、電子がバリアを通過する際に電荷の離散性によって生じる非平衡ゆらぎである。我々は、スピン流が散乱される場合にも、スピンの離散性がゆらぎとして現れるのではないかと予想した（スピンショット雑音、下図参照）。スピンバルブ素子を用いて、スピン蓄積に伴うスピン流が散乱される際に生じる電流雑音を検出することによって、アイデアを実証した。



通常のショット雑音(左)とスピンショット雑音(右)

(c) 端状態の非平衡ダイナミクス[4]

我々は、量子ホール状態にあるグラフェン素子中の pn 接合界面において、キラリティの異なる端状態を生成した。さらに、端状態の非平衡性に基づく特異な電流ゆらぎの検出に成功した。これは、理論で予想されていた「端状態混合」を証明した初の実験であり、端状態の研究に大きな進展をもたらす。

上記以外にも、スピン波のスネル法則の直接観測[5]、超伝導-近藤効果の競合状態の実現（アンドレーフ・近藤効果）、磁気抵抗素子における非平衡雑音の起源解明、グラフェンにおける異常な $1/f$ 雑音、表面弾性波による特異な物性開拓等の実験を行った。さらに、ゆらぎの定理のスピン트로ニクスへの応用、カーボンナノチューブ量子ドットにおけるトポロジカル相転移、時間依存外場を用いた断熱ポンプ等の理論構築を行った。

以上のように、現時点ですでに、複数の学術的な価値を持つ成果が得られており、ゆらぎ測定を武器に非平衡スピン輸送の素過程の解明と制御を目指す本研究は、スピン依存伝導の研究に新展開をもたらしつつある。

5. 今後の計画

今後も、メゾスコピック系における高精度測定実験を行い、理論との精密・定量的な比較を行うことによって、新規非平衡スピン輸送の開拓を行っていく。我々は、本研究を通じて、実時間ダイナミクス測定手法を着々と開発してきた。現在、単電子ポンプや表面弾性波技術が確立し、高周波検出技術も整いつつある。今後、これらの技術を利用して、スピンショット雑音の実時間観測、近藤状態生成の実時間追跡などを行う。

6. これまでの発表論文等（受賞等も含む）

- [1] 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* **12**, 230–235 (2016).
- [2] 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* **85**, 094718/1-18 (2016).
- [3] 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 Induced by Nonequilibrium Spin Accumulation”, *Physical Review Letters* **114**, 016601/1-5 (2015) [*Editors' Suggestion* に選定].
- [4] S. Matsuo, S. Takeshita, T. Tanaka, S. Nakaharai, K. Tsukagoshi, T. Moriyama, T. Ono, and K. Kobayashi, “Edge Mixing Dynamics in Graphene p - n Junctions in the Quantum Hall Regime”, *Nature Communications* **6**, 8066/1-6 (2015).
- [5] J. Stigloher, M. Decker, H.S. Körner, K. Tanabe, T. Moriyama, T. Taniguchi, H. Hata, M. Madami, G. Gubbiotti, K. Kobayashi, T. Ono, and C. H. Back, “Snell's Law for Spin Waves”, *Physical Review Letters* **117**, 037204/1-5 (2016) [*Physics Synopsis* に選定].

※以上を含む計 37 報の論文を発表。

【受賞】

- ・平成 26 年 7 月 8 日、第 3 回（平成 26 年度）大阪大学総長顕彰・研究部門、大阪大学（受賞者氏名：小林研介）
 - ・平成 27 年 7 月 14 日、第 4 回（平成 27 年度）大阪大学総長顕彰・研究部門、大阪大学（受賞者氏名：小林研介）
- ホームページ等

<http://meso.phys.sci.osaka-u.ac.jp/>