

A01-002 非平衡量子系の輸送ダイナミクス

大阪大学大学院理学研究科 小林研介
慶応義塾大学理工学部 齊藤圭司
東京大学大学院総合文化研究科 沙川貴大

微細加工技術によって作製される極小の固体素子においては、平衡状態から非平衡状態までを連続的に制御できるため、非平衡量子系を定量的に取り扱える理想的な舞台である。我々の班では、このような固体素子を舞台として、非平衡ダイナミクスを取り扱う方法論の創出を目指している。本年度の主たる成果は以下の通りである。

スピン流に伴う電流ゆらぎの検出

1918年、ショットキーは真空管を流れる電流に注目し、そのゆらぎが素電荷と電流の平均値に比例するという普遍的な性質を持つと指摘した。このゆらぎは真空管の陰極からランダムに放出される電子の分配過程と電荷の離散性に起因した現象で、ショット雑音と呼ばれる。ところで、電子は電荷だけでなくスピンという自由度も持つため、スピンの離散性も電流のゆらぎに影響を与えるのではないかと考えるのは自然である。しかし、スピンに起因するショット雑音については理論的な提案があったものの、実験的な検証は行われてこなかった。

小林らは、トンネル接合にスピン流を印加し、それに伴うショット雑音の検出に成功した。具体的には、強磁性半導体(Ga,Mn)Asと非磁性半導体GaAsからなるトンネル接合にスピン流を印加し、電流ゆらぎ測定を行った。図に示すように、トンネル接合に流れるスピン流と電流を独立に制御することで、ショット雑音に含まれる電流とスピン流の寄与を分離して評価した。その結果、スピン流の絶対値が求まると同時に、ショット雑音とスピン流の比例関係が実証された。この結果はトンネル過程において電荷とスピンの一体となったトンネルしていることの直接的な帰結である。今後、本検出手法がスピン流の研究を発展させていくと期待される。

本研究成果は *Physical Review Letters* の Editors' Suggestion に選ばれた [1]。

ネルンスト効果の熱力学

齊藤らは、非平衡におけるゆらぎを調べる一環として、小さな系を介した電子輸送現象を考えて、熱の流入が電流に変換されるいわゆる熱電効果を考察した。とくに磁場などで時間反転対称性を奪ったとき、熱効率と仕事率がどのような関係にあるかに焦点をあてた。単純

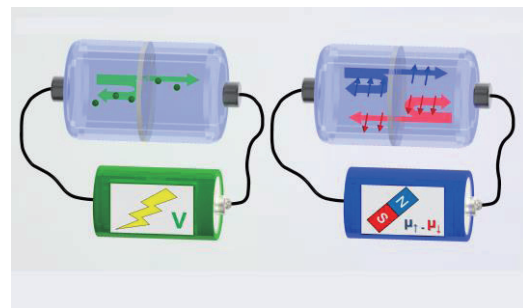


図:電荷ショット雑音とスピンショット雑音
(左図)トンネル接合において電子が散乱されショット雑音が発生している様子。この図はショットキーの理論に基づく古典的なショット雑音の発生を示す。(右図)正味の電流がなく、スピン流だけが存在する場合にもショット雑音は発生する。

な線形応答の解析では、熱力学第2法則はカルノー効率と有限の仕事率の共存を許してしまう。この共存は直感に反するので、自然界には熱力学第2法則よりも強い拘束があることが、齊藤らによりすでに予想されていた。このような背景の中、齊藤らは、磁場が存在してはじめて生じるネルンスト効果に注目し、電子間に相互作用がない状況下での厳密な熱効率の上限を導いた。そしてカルノー効率が達成できないことや、低熱効率であることが既存の実験観測と矛盾しないことなどを議論した。

本成果はネルンスト効果に対して熱力学の観点から厳密にアプローチした初めての仕事であり、*Physical Review Letters* の Editors' Suggestion に選ばれた[2]。

熱輸送にあらわれる界面成長ダイナミクスの実証

齊藤らは、本新学術領域のテーマの一つでもある界面成長のダイナミクスに関する仕事も行った。ただしここでは本物の界面成長ではなく、一次元熱輸送現象のダイナミクスの中に非自明にカーダー・パリージ・ザンの方程式が現れることを数値的に実証したのである。齊藤らは異常な輸送現象を示すフェルミー-パスター-ウラム系において大規模数値計算をすることでこの予想を実証した[3]。

量子エントロピー生成の定義の等価性

量子非平衡ダイナミクスにおいてエントロピー生成をどう定義すべきかは、熱力学第二法則に関する基本的な問題である。沙川らは、従来理論的に提案されていた二つの定義（量子軌道を用いた定義と、量子相対エントロピーを用いた定義）が等価であることを証明した。さらにそれに基づき、量子相対エントロピーの単調性の新しい証明を、特別なクラスの CPTP 写像について示した[4]。

単一電子による情報熱機関の実現

沙川らは、単一電子箱を用いて、フィードバック制御により情報を仕事に変換する情報熱機関を実験的に実現した。この際の効率は約 75%であった。さらに相互情報量を含んだ形の一般化 Jarzynski 等式を検証した。これによって、情報処理を含む非平衡ダイナミクスの従う基本原理が実験的に検証されたと言える[5]。

参考文献:

- (1) T. Arakawa *et al.* *Phys. Rev. Lett.* **114**, 016601 (2015) [Editors' Suggestion].
- (2) J. Stark, K. Brandner, K. Saito, and U. Seifert, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 140601 (2014) [Editors' Suggestion].
- (3) S. Das, A. Dhar, K. Saito, C. Mendl, and H. Spohn, *Phys. Rev. E* **90**, 12124 (2014).
- (4) J. M. Horowitz and T. Sagawa, *J. Stat. Phys.* **156**, 55-65 (2014).
- (5) J. V. Koski, V. F. Maisi, T. Sagawa, and J. P. Pekola, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 030601 (2014).