

大阪大学大学院理学研究科 小林研介
慶応義塾大学工学部 齊藤圭司
東京大学大学院工学系研究科 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主たる舞台として、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。

量子液体の非平衡ダイナミクス

近藤効果は、1960年代に解明された量子多体効果であり、強相関電子系の研究などにおいて半世紀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ある。小林らは、カーボンナノチューブに作製した量子ドットにおける近藤効果を研究した(1)。本研究によって、近藤状態においては、一粒子の伝導過程だけではなく、二個の粒子が関与する伝導過程もあり、それによって電流ゆらぎが通常の数よりも増大することが分かった。この電流ゆらぎから、量子液体を特徴づける量（ウィルソン比）を求めることができ、量子ドットが極めて強い量子多体状態にあることを実証した。さらに、これまでに知られていなかった非平衡スケールリング則を実験的に確立した。

量子ホール端状態の非平衡ダイナミクス

量子ホール状態にあるグラフェン pn 接合では、量子ホール状態が完全に混じりあう結果、接合の両側への電子の分配過程の存在が推察されていたが、このことを直接的に実証した報告はなかった。小林らは、ゲート電極を組み合わせることにより pn 接合を形成可能なグラフェン試料を作製し、低温強磁場下において高精度な電流ゆらぎ測定を行った。その結果、量子ホール状態で pn 接合のある場合にはショット雑音が発生するのに対し、 pn 接合のない場合にはショット雑音が発生しないことを明らかにした。観測されたショット雑音の大きさが、理論予想とほぼ一致することも実証した。この成果は、量子ホール状態にあるグラフェン pn 接合で起こる電子分配の微視的特性を初めて定量的に確立したものである(2)。

量子孤立系での熱化現象

齊藤らは量子孤立系での熱化現象について考察した。熱化現象は冷却原子から原子核の衝突実験まで、幅広く大事なテーマである。最近では超伝導体やグラフェンなどにおいて振動外場をかけた際の有効ハミルトニアンへの熱緩和現象なども実験的に研究がなされるようになってきている。そこで、齊藤らは振動外場を量子孤立系にかけた場合、熱化現象における緩和にどのようなシナリオがあり得るのかを、解析的に計算した。その結果、高振動外場に対

して、熱化の前駆現象があらわれ得ることを数学的に示した。この前駆現象は、まさに実験において観測される有効ハミルトニアンへの熱緩和現象に対応している(3)。

小さな系の熱機関

齊藤らは、前年度に引き続き、小さな系での熱機関の研究を行った。現在ナノサイズの小さな熱機関は実験的にも構成可能になってきている。そのため、そのような系での一般的な理論的枠組みが必要になってきている。そこで、齊藤らは熱環境にあるブラウン粒子を使って熱機関を構成したときの仕事及び熱浴への熱流に関して、線形応答理論を構築した。それにより、仕事率と熱効率に関する一般的な不等式などを導出した(4)。

生体内シグナル伝達への情報熱力学の応用

沙川らは、情報熱力学を生体内シグナル伝達のモデルに応用して解析した(5)。とくにフィードバックループがあるシグナル伝達の例として、大腸菌の走化性の適応モデルを解析した。我々は、情報熱力学の第二法則を応用することにより、大腸菌の適応の外界からのノイズに対する頑健性と、フィードバックループ内を流れる情報流の間の定量的な関係を発見した。とくに、transfer entropy と呼ばれる情報量が、適応度の上限を与えることが明らかになった。さらに我々の数値実験結果から、大腸菌の適応ダイナミクスは、通常の熱機関としては非効率（散逸的）だが、情報熱機関としては効率的であることが明らかになった。

自律的マクスウェルのデーモンの統一的理解

従来、自律的な情報処理の熱力学的解析において、「測定・フィードバック」の定式化と、「情報浴」による定式化の、二つの異なる定式化が研究されていた。沙川らは、ゆらぎの定理の一般化を用いるとこれら二つの定式化が統一的に理解できることを示し、従来知られていたよりも強い不等式（情報熱力学の第二法則の一種）を導いた(6)。

量子ドットによる情報熱機関の実現の提案

沙川らは実験的に実現可能なセットアップを用いて、エンジンとメモリ（デーモン）をともに量子ドットで作成する方法を理論的に提案した。また、その際に成り立つ情報を含んだゆらぎの定理を導いた(7)。

参考文献：

- (1) M. Ferrier *et al.*, *Nature Physics* [published online (2015)]; doi:10.1038/nphys3556.
- (2) S. Matsuo *et al.*, *Nature Communications* **6**, 8066 (2015).
- (3) T. Kuwahara, T. Mori and K. Saito, *Annals of Physics* (in press).
- (4) K. Brandner, K. Saito and U. Seifert, *Phys. Rev. X* **5**, 031019 (2015).
- (5) S. Ito and T. Sagawa, *Nature Communications* **6**, 7498 (2015).
- (6) N. Shiraishi, T. Matsumoto and T. Sagawa, *New Journal of Physics* **18**, 013044 (2016).
- (7) A. Kutvonen, T. Sagawa and T. Ala-Nissilä, arXiv:1510.00190.