

## 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研究を行ってきた。5年間で得られた主要な成果を以下に記載する。

### 量子液体の非平衡ダイナミクスの定量化

近藤効果は、1960-70年代にかけて解明された量子多体効果であり、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と等価である。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, 2)。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値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(1)。また、対称性の異なる近藤状態の間の連続的な遷移にともなうウィルソン比の変化を定量的に抽出することにも成功した(2)。このような成果は、非平衡量子多体系の精密な定量化に成功したものであり、今後の理論・実験の発展を促すものと期待される。

### 熱機関における、熱効率と仕事率の関係

齊藤は、非平衡系の熱力学を理解する上で避けて通れない、熱機関の熱効率と仕事率の関係について議論した(3)。平衡熱力学は準静的な変化に対する理論であるが、その場合仕事率は消失する。仕事率を増やそうとすれば必然的に、準静的過程を離れた非平衡状態を考察しなければならない。齊藤らは、マルコフ過程の範囲内で熱効率と仕事率の間に成立する普遍的なトレードオフ関係式を導いた。それにより熱効率がカルノー効率に近づく際の仕事率のふるまいなどが定量的に議論できるようになった。

### 量子孤立系における、振動外場による熱化現象

近年、冷却原子が示す量子ダイナミクスを実験的に観測できるようになり、統計力学の基礎に関する議論も盛んになっている。孤立した量子系はどのように熱的な状態に近づいて行くだろうか？最も簡単な熱化現象は、振動外場で量子系を温める熱化現象である。この場合の定常状態は温度無限大のランダム状態である。齊藤は、このような熱化過程に段階的な緩和が存在することを、フローケマグナス展開の手法を用いて示した(4)。緩和過程では、初期

段階で準保存量にトラップされ、遅い緩和が生じる「Floquet Prethermalization」という現象が生じることを明らかにした。

### 熱力学的不確定性原理の分類

近年、電流や熱流などの熱力学的な流れには、ある種の不確定性が存在することが示唆されてきている。例えば、古典的な電流におけるファノファクターとエントロピー生成にはある種のトレードオフ関係があることがマルコフ過程の範囲で議論されている。齊藤は、この種の議論を広範囲のダイナミクスで考え、熱伝導現象(5)や、電流における熱力学的不確定性関係を議論した(6)。磁場のある系や量子系では、マルコフ過程において議論されていた結果を変更しなければならないことが分かった。

### 自律的な情報熱機関の研究

近年、「ゆらぎの定理」に代表される非平衡熱力学と、情報理論との融合が進んでいる。沙川らは、自律的な情報処理の熱力学の一般的な理論を構築し、それを生体情報処理へと応用した。一般論については、連続的な情報流を含む形に一般化されたゆらぎの定理と熱力学第二法則を導き、さらに情報流についてもオンサーガ相反定理が成立することを示した。生体情報処理への応用としては、上記で得られた一般化第二法則によって化学走性のノイズに対する頑健性を定量化できることを示した(7)。また沙川らは 2015 年に自身らの成果を中心にまとめた情報熱力学のレビューを出版した(8)。

### 孤立量子多体系におけるゆらぎの定理

量子力学から熱力学が如何に創発するかは、19世紀以来議論されてきた統計力学の基礎として重要なだけでなく、非平衡量子系のダイナミクスを理解する上でも重要な問題である。沙川らは、統計力学の概念であるカノニカル分布を仮定せずに、量子力学だけに基いて熱力学第二法則とゆらぎの定理を証明した(9)。そのさい、熱平衡化のメカニズムとして近年注目を集めている固有状態熱化仮説 (Eigenstate Thermalization Hypothesis, ETH) が重要な役割を果たした。なお ETH に数学的な証明はないが、沙川らは弱い形の ETH を証明することに成功した。

### 参考文献

- (1) M. Ferrier, *et al.*, *Nature Phys.* **12**, 230 (2016).
- (2) M. Ferrier, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **118**, 196803 (2017).
- (3) N. Shiraishi, K. Saito, and H. Tasaki, *Phys. Rev. Lett.* **117**, 190601 (2016).
- (4) T. Mori, T. Kuwahara, and K. Saito, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 120401 (2016).
- (5) S. Tamaki, M. Sasada, and K. Saito, *Phys. Rev. Lett.* **119**, 110602 (2017).
- (6) K. Brandner, T. Hanazato, and K. Saito, *Phys. Rev. Lett.* in press (2018).
- (7) S. Ito and T. Sagawa, *Nature Comm.* **6**, 7498 (2015).
- (8) J. M. R. Parrondo, J. M. Horowitz, and T. Sagawa, *Nature Phys.* **11**, 131 (2015).
- (9) E. Iyoda, K. Kaneko, and T. Sagawa, *Phys. Rev. Lett.* **119**, 100601 (2017).