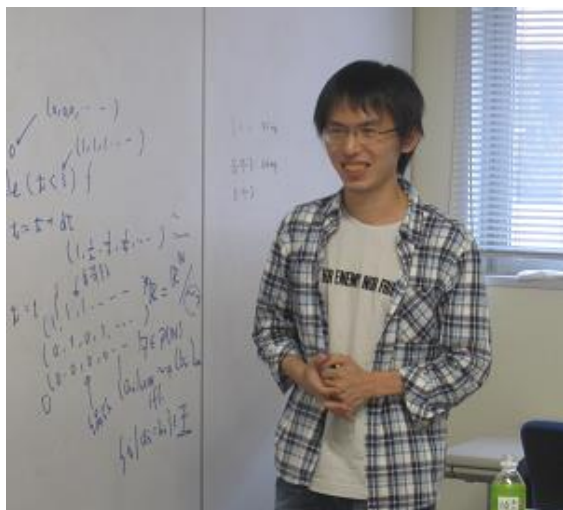


## 非平衡統計物理



沙川貴大准教授

沙川貴大 准教授 Takahiro Sagawa, Assoc. Prof.

当研究室の研究テーマは、非平衡統計物理（およびそれと情報科学や生命科学との境界領域）の理論である。新しい原理の発見や基礎理論の探求を目指しつつ、具体的な系の理論的解析も重視する。

### 非平衡基礎論

平衡系の熱力学と統計力学は、熱平衡状態にあるマクロな物質の性質を記述する上で、驚異的な成功をおさめた。さらに、オンサーガの線形非平衡熱力学や久保の線形応答理論は、平衡からわずかにずれた状態を記述することに成功した。しかし、平衡から遠く離れた系の熱力学や統計力学については、普遍的な（系の詳細に依存せず、広い適用範囲をもち、強力な）理論はほとんど発見されていない。さらに、ミクロで可逆な力学（量子力学）の世界と、マクロで不可逆な熱力学の世界を如何に橋渡しするか、という古くからの難問も、未解決のまま残されている。

そんな中、この20年で、「ゆらぎの定理」や「Jarzynski等式」と呼ばれる非平衡関係式が発見された。それらは熱力学第二法則に基礎づけを与え、さらに第二法則を平衡から遠く離れた状況に一般化するような、強力な関係式である。さらに、それら非平衡関係式は、量子ドットから生体分子モーターまで多彩な実験系で検証・応用されており、非平衡基礎論は世界的に活発な研究分野となっている。このような成果によって、ようやく非平衡基礎論の本格的な探求の第一歩が踏み出

されたと言える。

当研究室では、多彩な角度から、非平衡統計物理の原理的な問題に迫りたい。その際に、当研究室で特に注目するのが「情報」の役割である。より具体的には、以下のような研究テーマに取り組んでいく。

### 情報熱力学

これまで沙川は、情報理論と熱力学を融合した「情報熱力学」の理論の構築と、その実験的検証を行ってきた。たとえば、「情報（相互情報量など）」を取り入れることで、熱力学第二法則や非平衡関係式を一般化することに成功した。これは、19世紀以来の難問として知られてきた「マクスウェルのデーモンのパラドックス」を解決に導いた。原子・分子のレベルで熱力学系を制御できる「デーモン」がいれば熱力学第二法則が破れるのではないか、という問題に対して、情報の役割を適切に考慮すればデーモンと熱力学が矛盾しないことを示したのである。また、実験によってデーモンを実現することにも成功した。

これらの研究成果は、情報理論と非平衡統計物理をつなぐ研究の出発点となるものである。たとえば、自律的に動作する情報処理マシン（いわば、自律的なマクスウェルのデーモン）の動作原理の解明や、測定やフィードバックといった制御構造が非平衡系の中でどうやって自発的に「創発」するのかといった、いろいろな挑戦すべき問題が挙げられる。

### ゆらぎ分子機械の理論

生体内の分子モーターのような、ゆらぎの大きな環境下で自律的に精妙な動きをする分子機械の動作原理を理解することは、非平衡統計物理の観点からも非常に興味深いテーマである。分子機械の複雑な内部自由度がどのように協調的に動作し、ゆらぎの大きな環境下で所望の動作を実現しているかを理解することは、非平衡統計物理を拡張することにつながる可能性がある。たとえば、異なる時間スケールの自由度たちが協調することや、前述のような「情報」がうまく使われることが、熱力学的効率や散逸とどう関連しているかを明らかにしたい。

さらに将来的には、より一般の生命現象の背後にある原理な何なのかという、生命システムの物理学的理解へつなげていきたいと考えている。

<http://noneq.c.u-tokyo.ac.jp/>

連絡先

准教授 沙川貴大 16号館 727A号室

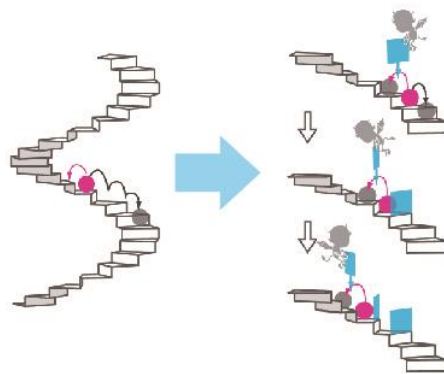
sagawa@noneq.c.u-tokyo.ac.jp

## 不可逆性の起源

「ミクロなダイナミクス（量子力学）が時間反転対称であるにもかかわらず、マクロな世界が不可逆なのはなぜか」という問いは、ボルツマン以来の難問である。近年この問題に、理論と実験の両面から新しい光が当たっている。

たとえば、「ユニタリ発展する孤立量子系が、熱平衡状態に緩和する」というと、奇妙に聞こえるかもしれない。しかし近年、冷却原子気体で、このような現象が実験的に観測されている。さらに理論的には、量子力学だけから（いわゆるエルゴード性を仮定せずに）平衡統計力学を基礎づけたり、熱力学第二法則を導出したりすることが可能になってきた。

すなわち孤立量子系は、平衡統計力学の基礎や不可逆性の起源をめぐって、ミクロとマクロをつなぐ現代の研究の格好の舞台である。当研究室でも、熱力学・統計力学の基礎という観点から、孤立量子系のダイナミクスを研究テーマとする。



マクスウェルのデーモンを実現した実験のイメージ図。

(下記の原著論文3より許可を得て転載)

## 量子情報・量子制御と熱力学

量子情報や量子制御と熱力学の関係も、当研究室の重要なテーマである。たとえば、前述の情報熱力学を量子系に拡張する際に、多彩な量子情報量が熱力学とどう関係しているかを解明したい。またこれは、メソスコピック系における電子輸送の量子制御や、量子情報処理デバイス設計原理などの観点からも、興味深い研究テーマである。

### 主な著書

“Thermodynamics of Information Processing in Small Systems” (Springer, 2012)

### 主な原著論文

- 1) Fluctuation Theorem with Information Exchange: Role of Correlations in Stochastic Thermodynamics, Phys. Rev. Lett. **109** (2012) 180602.
- 2) Quantum Szilard Engine, Phys. Rev. Lett. **106** (2011) 070401.
- 3) Experimental demonstration of information-to-energy conversion and validation of the generalized Jarzynski equality, Nature Physics **6** (2010) 988-992.
- 4) Generalized Jarzynski Equality under Nonequilibrium Feedback Control, Phys. Rev. Lett. **104** (2010) 090602.
- 5) Minimum Energy Cost for Thermodynamic Information Processing: Measurement and Information Erasure, Phys. Rev. Lett. **102** (2009) 250602.

### 学生へ一言

幅広い視野と興味を持つとともに、一つの分野を深く究めてください。できれば修士課程の間に、これだけは世界のだれよりも深く理解している、というトピックを一つ持てると良いと思います。それが、オリジナルな研究、さらには新しい物理理論の発見につながる第一歩です。

### 研究室のメンバー

2013年1月にできたばかりの研究室です！ 2013年4月1日現在は、修士課程学生が1名います。