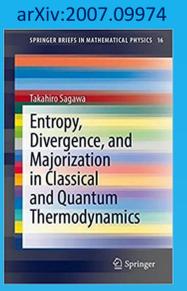
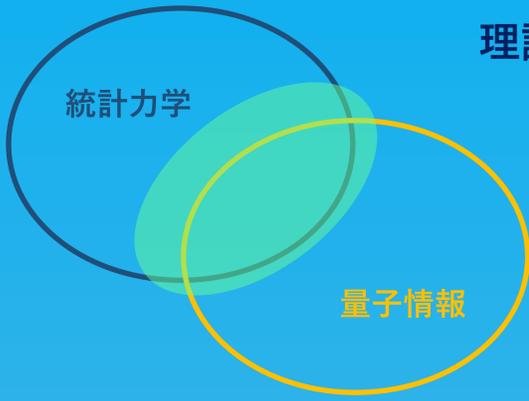


沙川・布能 研究室

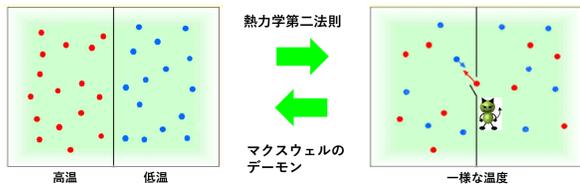
理論物理で「情報」と「物質」のクロスオーバーに挑む



情報熱力学：分子機械から量子多体系まで

マクスウェルのデーモン

熱・統計力学の基礎に関わる19世紀以来の問題



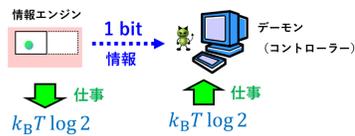
分子の速度を一つずつ観測して、扉を開け閉めする
温度差を作り出せて、熱力学第二法則に反する？



マクスウェル (1831-1879)

現代から見たデーモン

熱ゆらぎのレベルで系を測定し、その情報を用いたフィードバック制御を行う



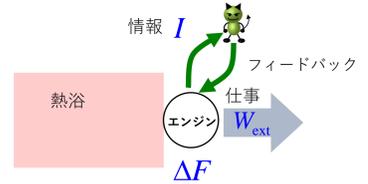
情報熱力学

$$1 \text{ bit} \Leftrightarrow k_B T \log 2$$

- ✓ 熱・統計力学の原理の理解
- ✓ 情報処理に要するエネルギーコストの解明

レビュー：J. M. R. Parrondo, J. M. Horowitz, & T. Sagawa, *Nature Physics* **11**, 131-139 (2015).

情報熱力学の第二法則



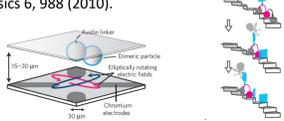
$$\text{フィードバックあり： } W_{\text{ext}} \leq -\Delta F + k_B T I$$

フィードバックで取り出しうる仕事量は、測定で得た相互情報量でパウンドされる

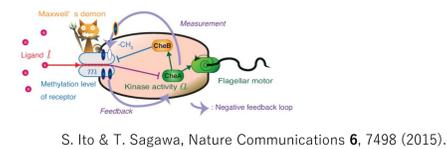
T. Sagawa and M. Ueda, *PRL* **100**, 080403 (2008)

実験によるデーモンの実現

Toyabe, TS, Ueda, Muneyuki, & Sano, *Nature Physics* **6**, 988 (2010).



生物物理への応用

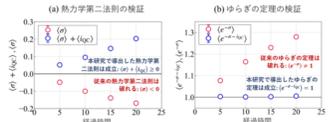


S. Ito & T. Sagawa, *Nature Communications* **6**, 7498 (2015).

量子連続制御下での熱力学



	一回測定	連続測定
古典系	相互情報量	移動エントロピー
量子系	量子・古典相互情報量	量子・古典移動エントロピー

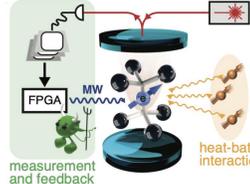


$$\langle \sigma \rangle \geq -\langle i_{QC} \rangle$$

$$\langle e^{-\sigma - i_{QC}} \rangle = 1$$

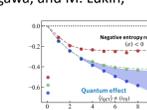
「量子情報の流れ」の概念を導入することで、連続的に測定・フィードバック制御された量子系に熱力学を拡張

SiVセンタを用いた実験による検証



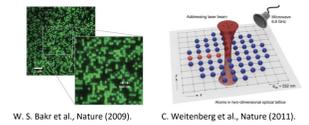
Lukin研 (ハーバード大) との共同研究

T. Yada*, P.-J. Stas*, A. Suleymanzade, E. Knall, N. Yoshioka, T. Sagawa, and M. Lukin, arXiv:2411.06709



量子多体系の制御と熱力学

単一原子レベルで量子多体系を測定・制御する技術の発展

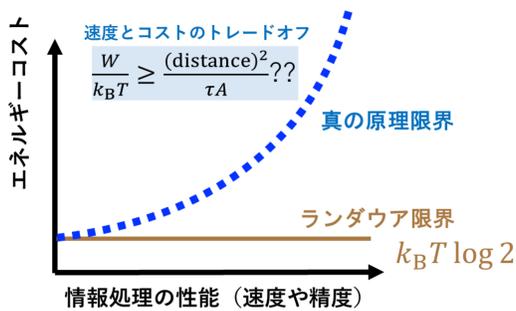


W. S. Bakr et al., *Nature* (2009). C. Weitenberg et al., *Nature* (2011).

量子多体系のフィードバック制御と情報熱力学の構築へ向けて

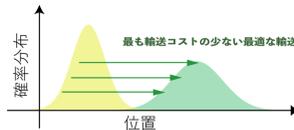
有限速度の情報熱力学

高いエネルギー効率と高速な情報処理を如何にして両立させるか？



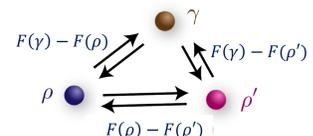
- ✓ 1bitと $k_B T \log 2$ の対応 (ランダウア限界) は、準静極限でのみ達成可能
- ✓ 現在の実用的な計算機においては、ランダウア限界と100万倍くらいの差がある

最適輸送理論などによるアプローチ



リソース理論

“有用な状態”をリソースと見なす数学的/情報理論的な考え方の総称
✓ 量子情報理論：エンタングルメント
✓ (量子) 熱力学：自由エネルギー、仕事



P. Faist, T. Sagawa, et al., *Phys. Rev. Lett.* **123**, 250601 (2019).
T. Sagawa, P. Faist, et al., *J. Phys. A: Math. Theor.* **54**, 495303 (2021)

量子情報理論に基づく熱力学の包括的な再定式化

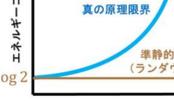
ERATO情報エネルギー変換プロジェクト

情報とエネルギーの相互変換の原理限界の学理的確立

超伝導量子回路実験



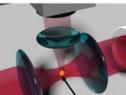
量子多体系の理論



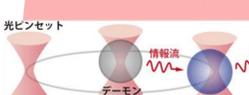
冷却原子実験



ナノ粒子実験



コロイド粒子・分子機械実験



量子 (量子ゆらぎ)

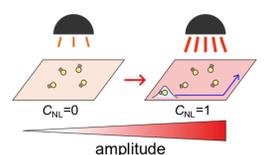
古典 (熱ゆらぎ)

トポロジー

トポロジカル物理の概念を非線形系に拡張

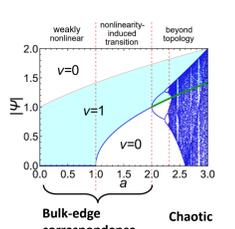
非線形チャーン数と非線形性誘起トポロジカル転移

K. Sone, M. Ezawa, Y. Ashida, N. Yoshioka, and T. Sagawa, *Nature Physics* **20**, 1164-1170 (2024)



トポロジカルからカオスへの転移によるバルクエッジ対応の破れ

K. Sone, M. Ezawa, Z. Gong, T. Sawada, N. Yoshioka, and T. Sagawa, *Nature Communications* **16**, 422 (2025).



古典確率過程におけるトポロジー

Sawada, Sone, Hamazaki, Ashida, & Sagawa, *Phys. Rev. Lett.* **132**, 046602 (2024)

