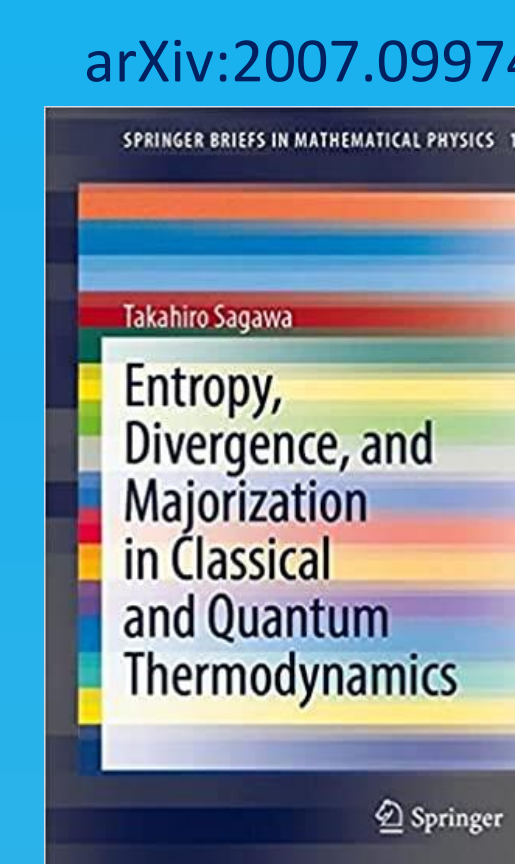
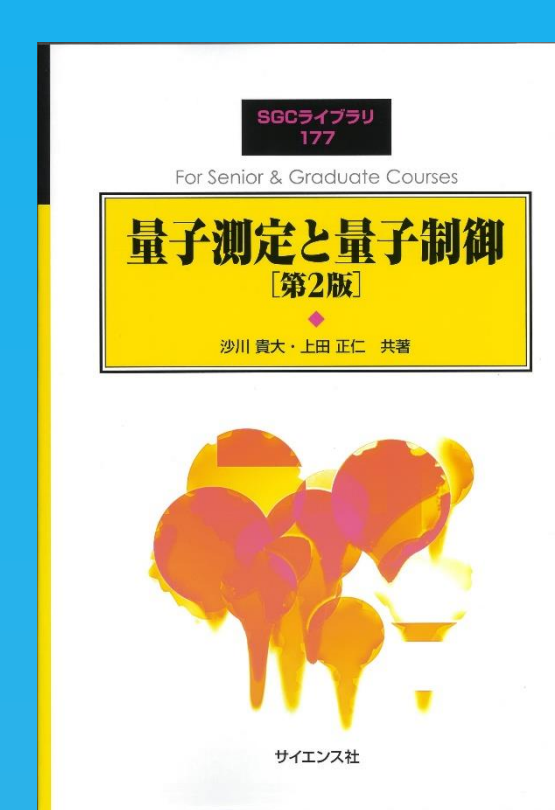
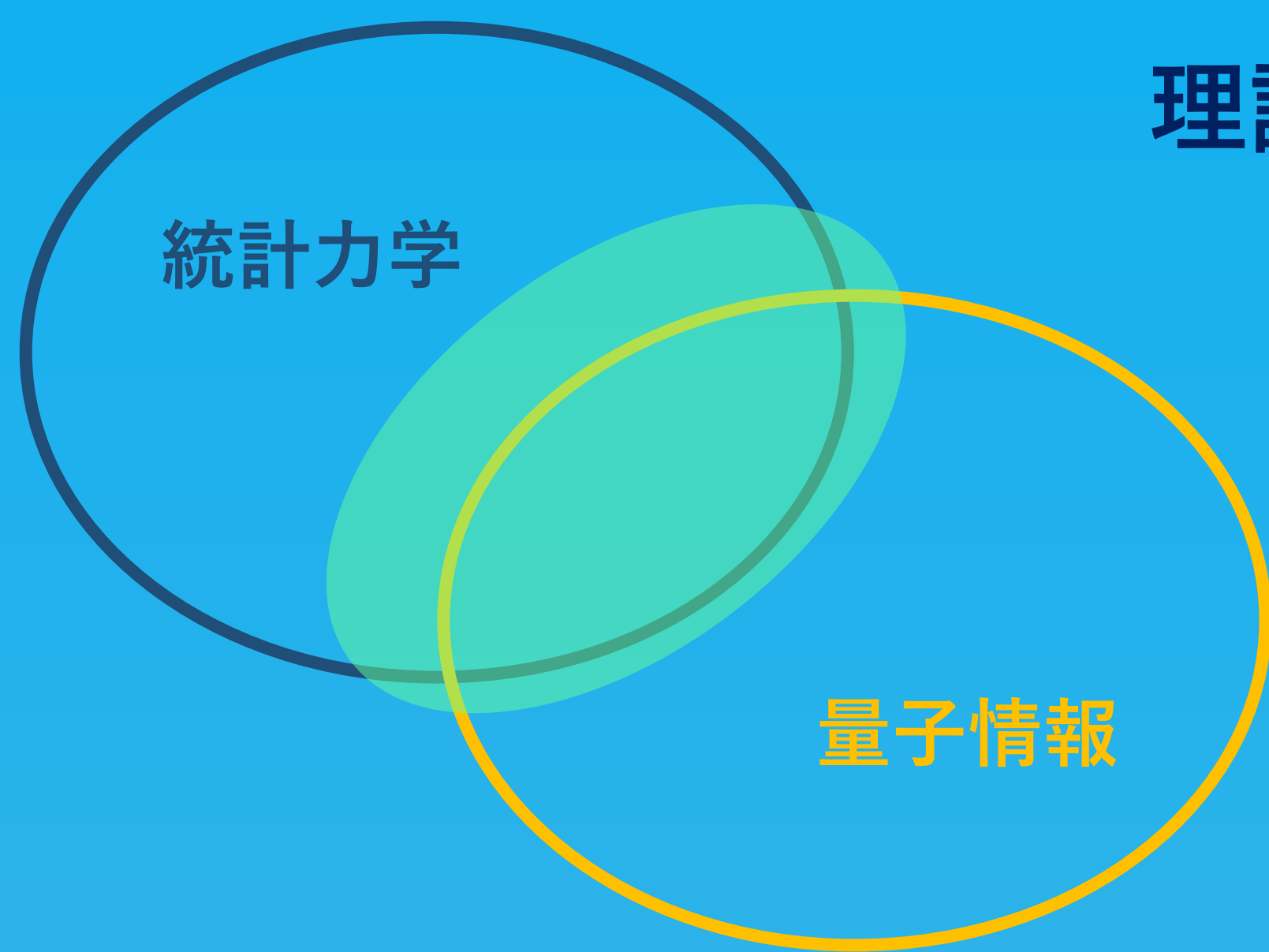


沙川研究室

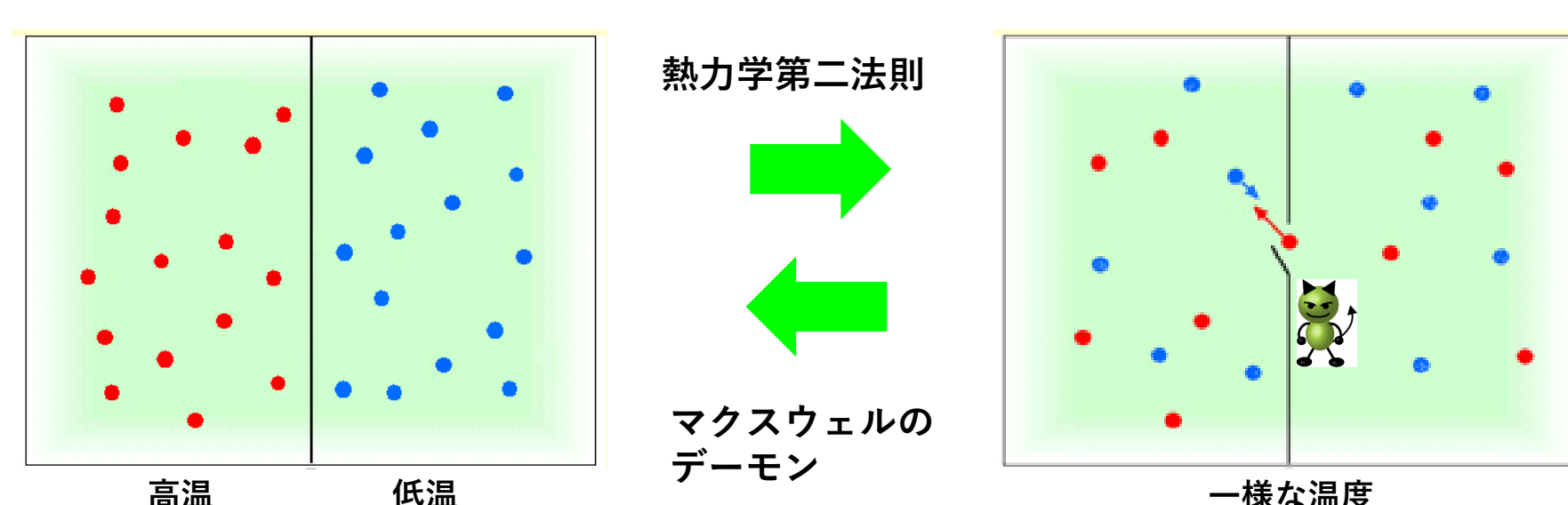
理論物理で「情報」と「物質」のクロスオーバーに挑む



情報熱力学とその応用

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

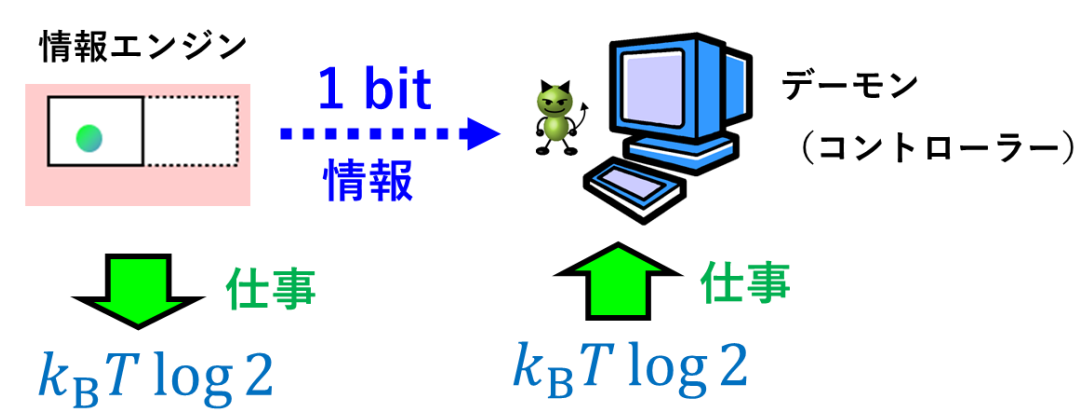


分子の速度を一つずつ観測して、扉を開け閉めする
温度差を作り出せて、熱力学第二法則に反する？



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

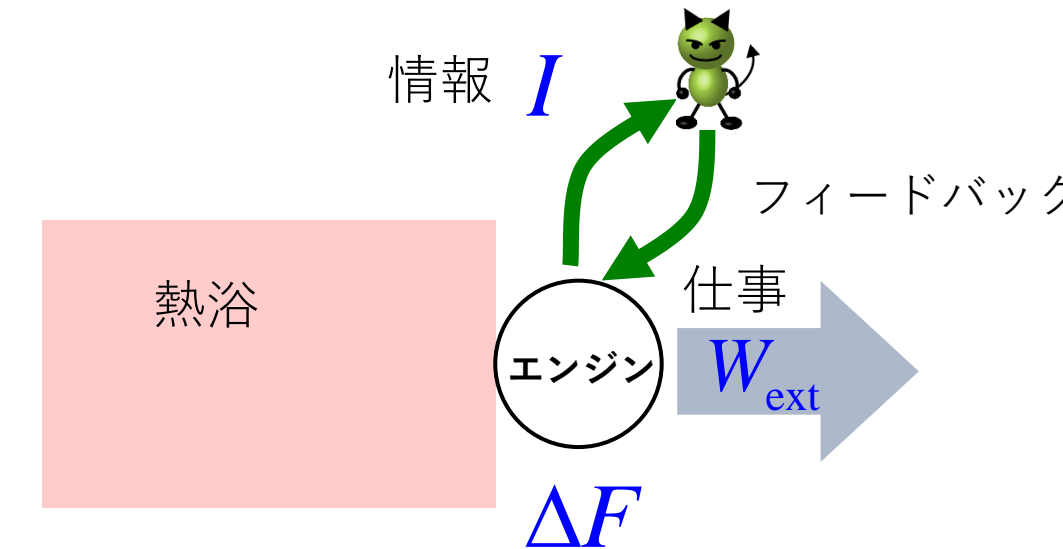


情報熱力学

- ✓ 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



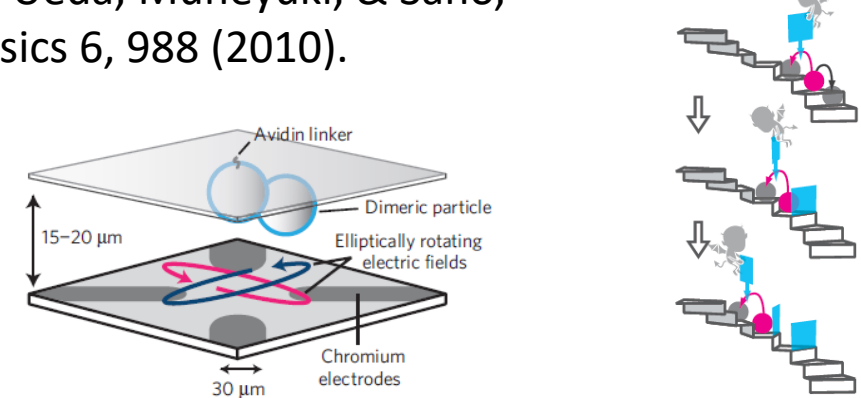
$$\text{フィードバックあり: } W_{\text{ext}} \leq -\Delta F + k_B T I$$

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

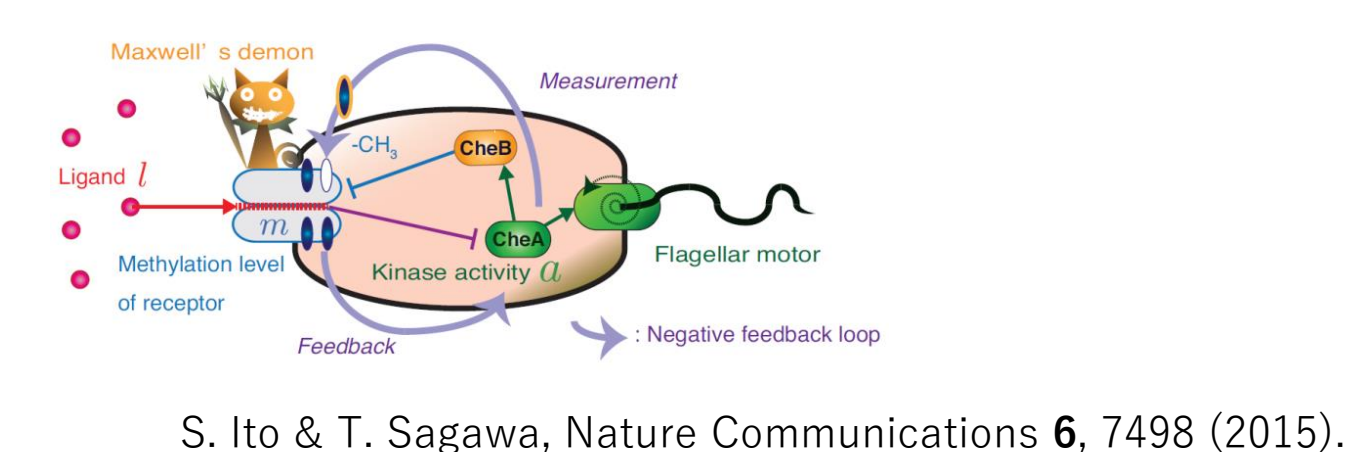
T. Sagawa and M. Ueda, *PRL* 100, 080403 (2008)

実験によるデーモンの実現

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

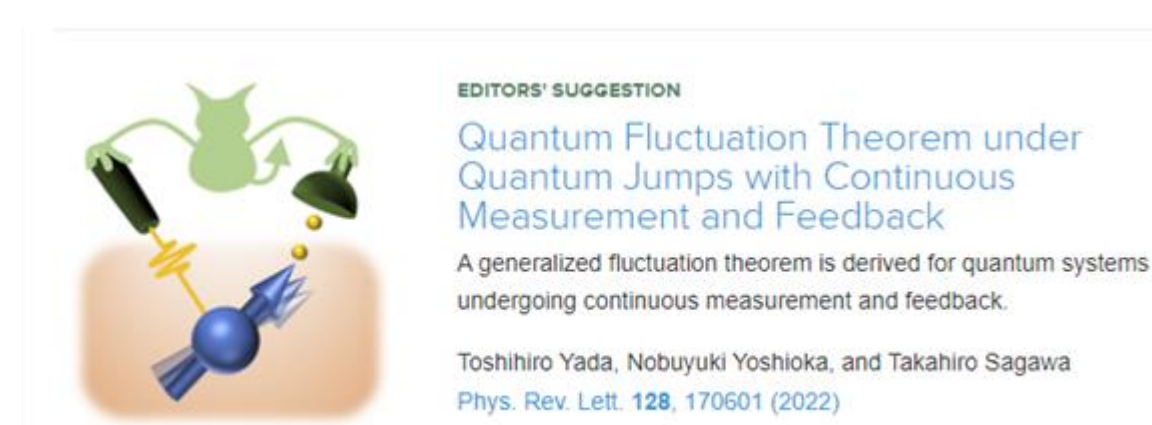


生物物理への応用

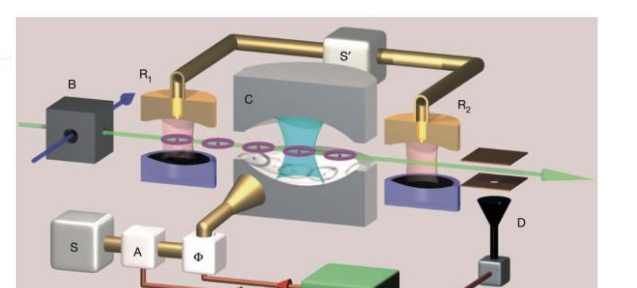
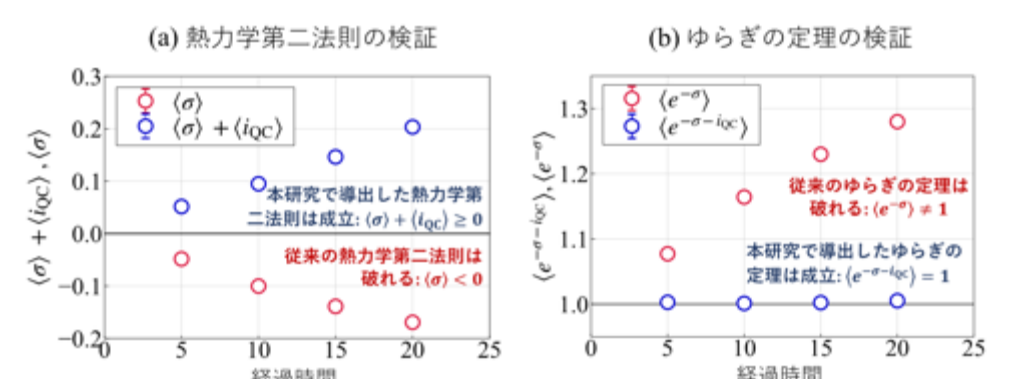


S. Ito & T. Sagawa, *Nature Communications* 6, 7498 (2015).

最近の成果：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



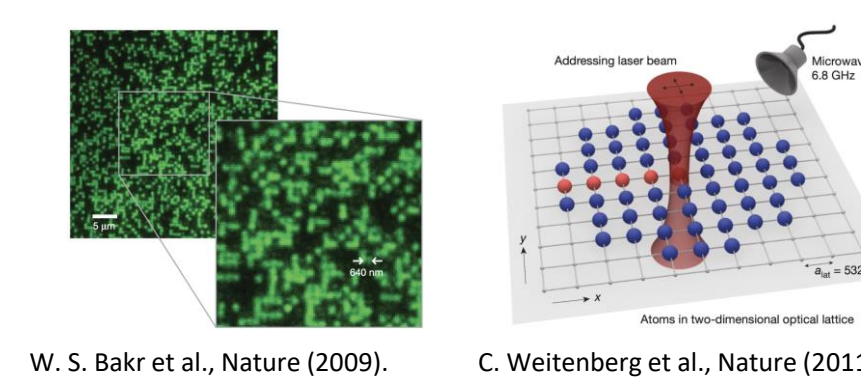
C. Sayin et al., *Nature* 477, 73-77 (2011)

第二法則 $\langle \sigma \rangle \geq -\langle i_{QC} \rangle$
ゆらぎの定理 $\langle e^{-\sigma - i_{QC}} \rangle = 1$

「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第二法則や「ゆらぎの定理」を拡張

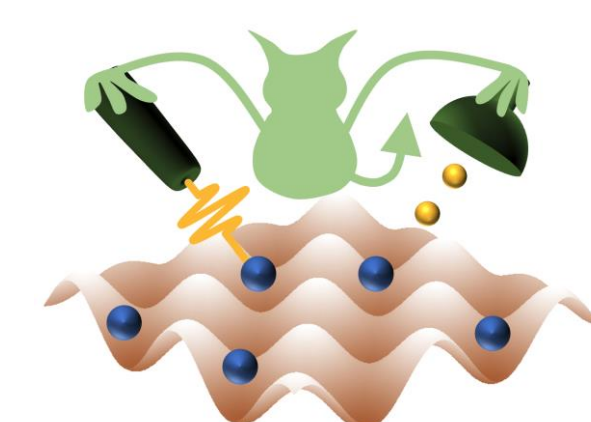
量子多体系の制御と熱力学へ向けて

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熱力学の理論の構築へ向けて

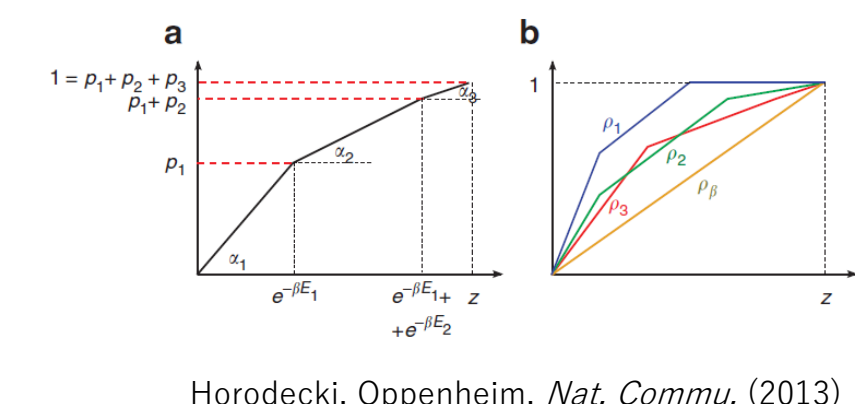


熱力学リソース理論

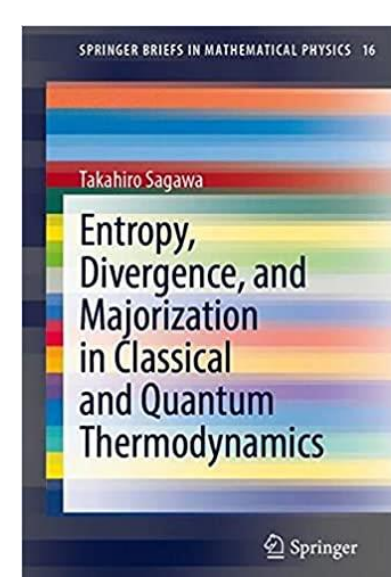
リソース理論とは

“有用な状態”をリソースと見なし、それがどれだけ取り出せるか/どれだけ必要かを議論する、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



Horodecki, Oppenheim, *Nat. Commu.* (2013)



量子情報理論に基づく熱力学の包括的な再定式化

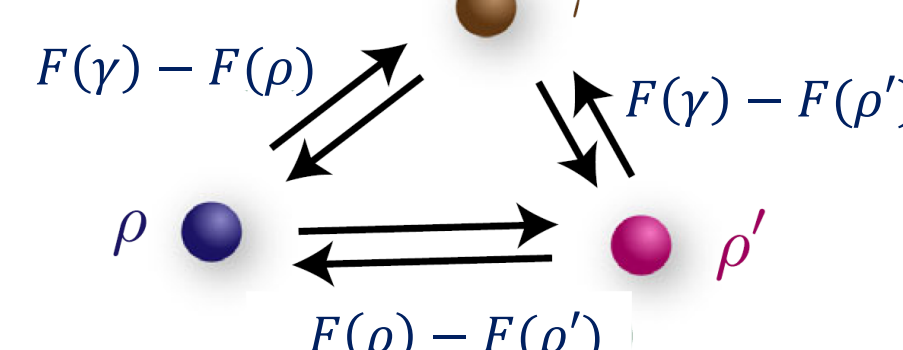
最近の成果：量子多体系における「完全」な非平衡エントロピーの存在証明

- ✓ 広いクラスの量子多体系に対して、熱力学的な状態変換を必要十分に特徴づける“完全な”熱力学ポテンシャルが存在することを証明 (状態が空間エルゴード (相共存がない)、ハミルトニアンが局所相互作用)
- ✓ 情報理論的には、量子仮説検定のSteinの補題を相互作用する量子多体系に拡張したことに等価



At Caltech (December 2018)

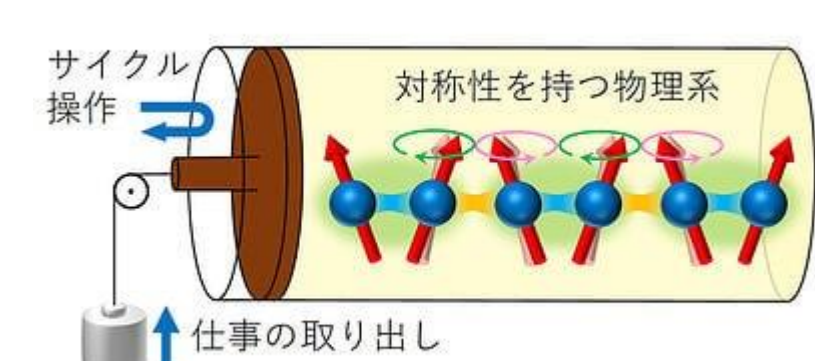
P. Faist, T. Sagawa, et al., *Phys. Rev. Lett.* 123, 250601 (2019)
T. Sagawa, P. Faist, et al., *J. Phys. A: Math. Theor.* 54, 495303 (2021)



最近の成果：対称性に保護された熱平衡状態

Generalized Gibbs ensemble (GGE)

$$e^{-\beta H - \sum_i \mu_i Q_i} / Z$$



- ✓ 熱平衡状態からは仕事を取り出せないという原理に基づいて、対称性を持つ物理系における熱平衡状態を全て同定
- ✓ 非可換な保存量にも適用できる「対称性に保護された熱平衡状態」の概念を確立
- ✓ 対称性を活用したより柔軟な量子熱機関の設計原理へ



Y. Mitsuhashi, K. Kaneko, & T. Sagawa, *Phys. Rev. X* 12, 021013 (2022).

D3三橋君

トポロジー

トポロジー

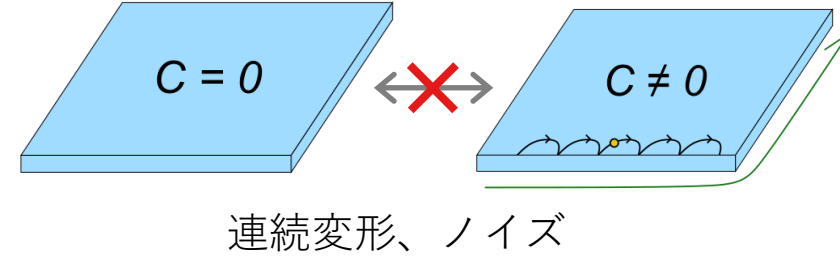
⇔ 連続変形で不変な性質
→ ロバストな特性



D3菅根君

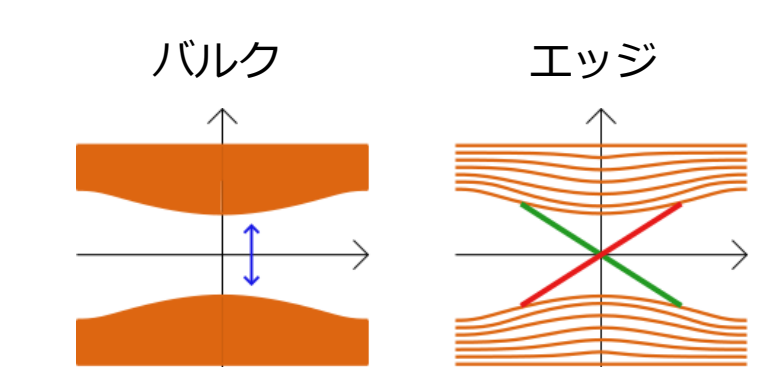
トポロジカル絶縁体 (cf. 量子ホール効果)

- バルク (周期境界)
- 非ゼロなトポロジカル指数
- 絶縁体的 (バンドギャップあり)



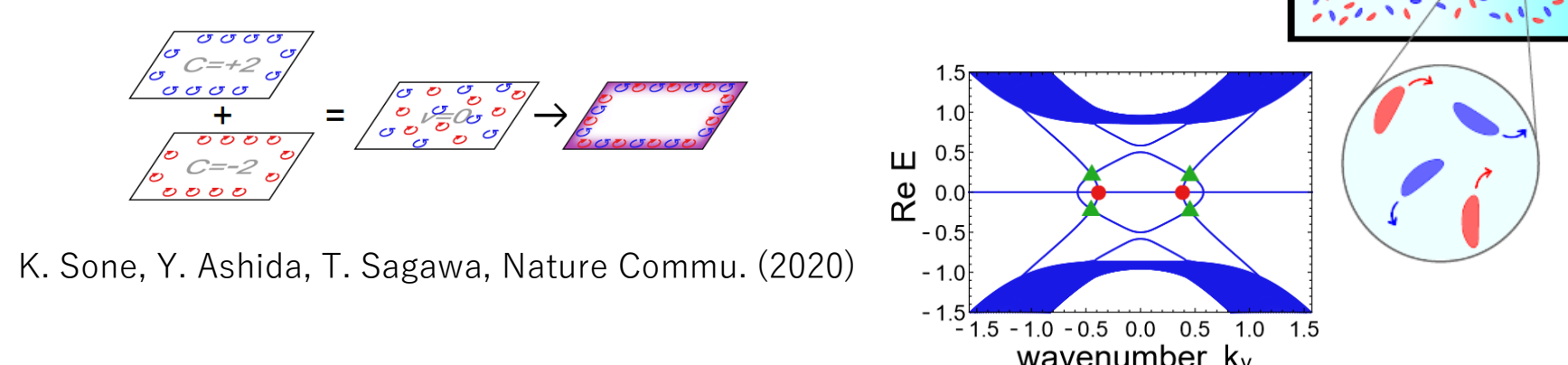
エッジ (開放境界)

- ロバストで局在したエッジモード
- 金属的 (バンドギャップ無し)



非エルミート系に固有のトポロジカル現象

- ✓ バルクは自明、エッジは非自明 ⇒ バルクエッジ対応の破れ
- ✓ Exceptional pointによってエッジモードが保護
- ✓ アクティブマターにおける非エルミート物理の初めての提案

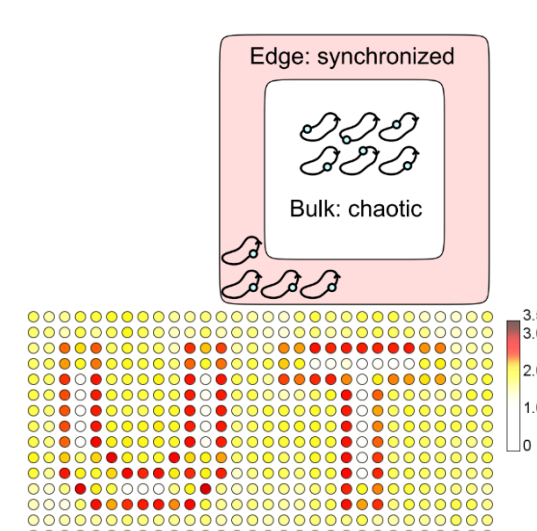


K. Sone, Y. Ashida, T. Sagawa, *Nature Commu.* (2020)

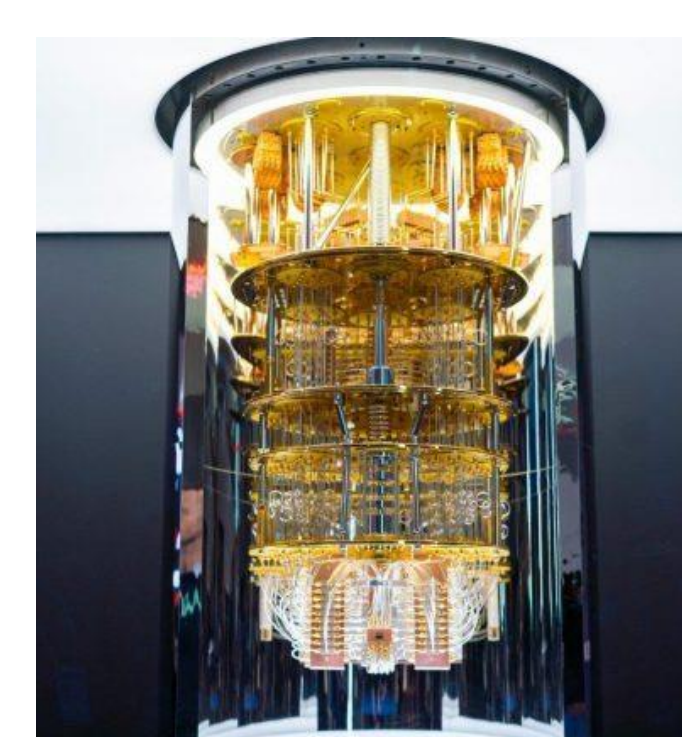
非線形系におけるトポロジカルな同期現象

- ✓ 非線形振動子系におけるバルクエッジ対応: バルクはカオスでエッジは同期
- ✓ トポロジーの概念の非線形系への拡張

K. Sone, Y. Ashida, T. Sagawa, *Phys. Rev. Research* (2022)



量子計算



©IBM

(米IBMと共同研究契約)



助教の吉岡さんを中心に、NISQデバイスのための量子アルゴリズムの開発や、性能評価の理論構築