



## (0) 研究分野

分科会: 物理

キーワード: 非平衡科学、統計力学、量子ダイナミクス、情報理論、多体系

## (1) 研究背景と研究目標

熱力学・統計力学などのマクロな物理と、量子力学などのミクロな物理はそれぞれ独立に発展し、大きな成功をおさめてきた。マクロな系はミクロな系の集合として成立しているため、統計力学は量子力学から理解できるように思えるが、実際にはこの二つの原理のギャップは大きい。近年、冷却原子系をはじめとする人工量子系の実験的発展により、ミクロな量子動力学を高精度で制御し、そこから発現した多体现象を精密に測定することが可能になった。これにより、統計力学基礎論の実験的検証の舞台が整いつつある。

本研究チームの大きな目標は、ミクロな量子力学などのダイナミクスを用いて、マクロな非平衡系を理解し、それを制御するための理論を構築することである。具体的な設定の一つは、近年の冷却原子系などの人工量子系を念頭に、孤立および開放量子多体系で現れうる豊富な非平衡現象の普遍性と制御法を探求することにある。また、非平衡統計力学基礎論を、情報理論や統計学などとの関連に着目しつつ理解することも目指している。さらに、こうした非平衡科学の研究を通じて、物性物理学や生物学などへの、分野の枠を超えた貢献も視野に入れている。

## (2) 2024年度成果と今後の研究計画

### (A) 測定誘起スペクトル転移

測定を受けた量子多体系においては、ユニタリーダイナミクス（系のエンタングルメントを増やす）と量子測定（エンタングルメントを減らす）の競合により、新奇なエンタングルメント転移が動的に存在するという事実が発見され、注目されていた。一方、孤立量子系の量子相転移においては、一般にエンタングルメント転移は系のスペクトル（ハミルトニアン固有値）のギャップレス・ギャップフル転移を伴う。そこで、こうした測定に誘起されたエンタングルメント転移もスペクトル転移を伴うかは自然な問いである。しかし、測定過程は量子揺らぎによりランダムなプロセスを含むため、通常のスベクトルを定義できない。我々は古典カオスで知られていたLyapunov解析を援用し、実際にエンタングルメント転移がギャップレス相からギャップフル相へのスペクトル転移を伴うことを初めて示した[1]。

### (B) 揺らぎに関する速度限界の発見

非平衡統計力学に対するアプローチの一つとして、速度限界と呼ばれる非平衡遷移に対する厳密な不等式が重要な意味を持つ。最近の先行研究では物理量の期待値に対する速度限界が議論されてきたが、[2]では物理量の揺らぎについても「揺らぎの速さが速度の揺らぎより大きくならない」普遍的な限界が存在することを初めて示した。さらに、期待値と揺らぎを同時には大きくはできないという新しいトレードオフ関係を発見した。この結果は古典確率過程、古典・量子の流体方程式、量子ユニタリーダイナミクスなどに適用可能であるだけでなく、量子多体系でも有効な不等式を与える。またこの速度限界は、自由粒子系のエンタングルメントエントロピーについてもその時間発展の上限を与えるなど、種々の応用がある。

### (C) 熱的固有状態の厳密構成

熱平衡にある状態はしばしば熱的状态と呼ばれ、特に熱的なエネルギー固有状態は、孤立量子系の熱化などの文脈で重要とされる。それらの文脈では、熱的固有状態の存在は理論的に仮定されるが、実際にそのような状態を構成した例は無かった。[3]では、ある模型において、書き下せる熱的固有状態の例を発見した。その状態が熱的であることやその模型が非可積分であることも厳密に証明した。それまで固有状態の構成は、基底状態や多体傷跡状態などの低エンタングルメント状態が可積分系に限られていたが、この結果は体積則エンタングルメント状態かつ非可積分系であるという点で重要である。

### (D) マグノン臨界性に由来した量子トンネル輸送

マグノンをもちいた熱とスピンの輸送現象は、低消費エネルギーデバイス作成を目指す固体スピントロニクス分野において近年精力的に研究されている。しかしながら、固体系では、強磁場下での古典的マグノン輸送が主であり、マグノンのボース統計性に由来した輸送現象は未解明であった。そこで[4]では、量子制御性の優れた冷却原子系を用いてマグノンのトンネルスピンの輸送の量子シミュレーションを行う方法を提案した。さらに、非平衡グリーン関数法による解析から、マグノンのボース統計性と臨界性に起因するスピンコンダクタンスの発散的増大を発見した。本研究で見出したマグノンの量子効果による高効率スピン輸送機構は、固体系スピデバイス設計にも新たな指針を与え、スピン輸送現象の学際的理解において基礎科学と工学応用の両面に新展開を促すものである。

### (E) 開放量子系による運動論的に制限のある模型のシミュレーション

[5]では、開放量子多体系を用いた「運動論的に制限のある模型」のシミュレーションに関する研究をおこなった。運動論的に制限のある模型は近年エキゾチックなダイナミクスを示す模型のクラスとして盛んに研究をされているが、既存の運動論的に制限のある模型は孤立系における有効ハミルトニアンで議論されていた。我々は、デコヒーレンスフリーサブスペースという開放量子系の一般的枠組みを用いることで、こうした量子系においては一般的により強い運動論的制限を持つ模型を作ることができることを示し、その具体的応用を議論した。

### 今後の計画

上記のLyapunovスペクトル解析は他の測定系や開放系にも有効であると期待されるため、引き続き上述の研究を深めていく。また、速度限界に関連して、仕事取り出しなどの熱力学との関連や、量子力学による熱力学プロセスの優位性などを厳密に評価していく。

## (3) 研究室メンバー

(2024年度)

濱崎立資 (研究チームリーダー)

高野雅栄 (アシスタント)

Somnath Maity (特別研究員)

関野裕太（特別研究員）[兼務: iTHEMS本務]  
杉本昇大（特別研究員）  
千葉侑哉（基礎科学特別研究員）  
大島久典（大学院生リサーチ・アソシエイト）

#### (4) 発表論文等

1. Ken Mochizuki and Ryusuke Hamazaki,  
Measurement-Induced Spectral Transition,  
[Phys. Rev. Lett. 134, 010410 \(2025\)](#). [arXiv:2406.18234]
2. Ryusuke Hamazaki  
Speed limits to fluctuation dynamics,  
[Communications Physics volume 7, Article number: 361 \(2024\)](#).
3. Yuuya Chiba and Yasushi Yoneta,  
Exact Thermal Eigenstates of Nonintegrable Spin Chains at Infinite Temperature,  
[Phys. Rev. Lett. 133, 170404 \(2024\)](#)
4. Yuta Sekino, Yuya Ominato, Hiroyuki Tajima, Shun Uchino, and Mamoru Matsuo,  
Thermomagnetic Anomalies by Magnonic Criticality in Ultracold Atomic Transport,  
[Phys. Rev. Lett. 133, 163402 \(2024\)](#). [arXiv:2312.04280]
5. Somnath Maity and Ryusuke Hamazaki,  
Kinetically constrained models constructed from dissipative quantum dynamics,  
[Phys. Rev. B 110, 014301 \(2024\)](#). [arXiv:2301.07290]

Laboratory Homepage

<https://sites.google.com/view/nonequantstatmech/home?authuser=0>  
[https://www.riken.jp/research/labs/hakubi/h\\_nonequil\\_qtm\\_stat\\_mech/](https://www.riken.jp/research/labs/hakubi/h_nonequil_qtm_stat_mech/)