



## (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現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) 2020年度成果と今後の研究計画

### (A) スペクトルギャップとダイナミクスについての新しい関係式の発見

従来、系のダイナミクスの緩和時間は、ダイナミクスを記述する生成子のスペクトルギャップの逆数で見積もることができると考えられていた。我々はこの関係の(i)束縛ダイナミクス系での厳密化および(ii)表皮効果が起こる場合の破れをそれぞれ発見した。

(i)に関して、例えば量子系で十分大きなエネルギーギャップが開いているときは、実効的な物理は低エネルギー理論によって近似される。この有効理論によりダイナミクスも近似できるが、実際には時間とともに誤差が蓄積し、近似は悪くなる。我々はこうした束縛ダイナミクスの誤差について、普遍的に成り立つ誤差の上限を、生成子のスペクトルギャップの逆数の関数として厳密に示した。これは束縛ダイナミクスの妥当性を数学的に保証する初めての結果になっている。(ii)に関して、従来、量子開放系の基本方程式の一つであるLindblad方程式で記述されるダイナミクスの緩和時間は、Lindblad演算子のスペクトルギャップの逆数になると信じられていた。我々は、近年非エルミート系で注目されていた表皮効果と呼ばれる現象がLindblad系でも起こり、それが起こった場合にはスペクトルギャップと緩和時間の関係が変更を受けることを示した。

### (B) 孤立量子系の緩和に関する普遍性の発見

孤立量子多体系の熱平衡化現象は、近年の冷却原子気体などの実験的発展に伴い非常に注目を集めているテーマであり、統計力学の基礎論との関係も深い。我々は特に、こうした孤立系の非平衡ダイナミクスにおける普遍性について研究を行った。

まず、Eigenstate thermalization hypothesis (ETH)が現実的な系で普遍的に成立することを数値的に示した。ETHは「系のエネルギー固有状態そのものが熱平衡状態と区別がつかない」と言う仮説で、長時間後における熱平衡化の十分条件を与える。一方、ETHは個別の系について多くの数値的証拠があるものの、現実的な系でどれほどETHが普遍的に成立するか、という問題は非自明であった。我々は、(現実的な系を特徴付けると期待される)局所相互作用をランダムにした集団を考え、その集団内のほとんどのサンプルについて、

ETHが成立することを数値的に示した。

また、熱平衡状態に緩和するまでのダイナミクスにも、普遍性は現れうる。我々は古典確率過程の界面成長の文脈でよく知られていたFamily-Vicsekスケーリングが、量子多体系の密度揺らぎにも現れうることを示した。

### (C) 量子開放系におけるランダム行列に関する理論的発見

Dysonは孤立量子系を記述するエルミートランダム行列を時間反転対称性（複素共役操作）に関して三種類のクラスに分類し、これに応じて準位間隔分布などの局所スペクトルの統計が三種類の異なる普遍性を持つことを示した(Dyson's threefold way)。一方、開放量子系を記述する非エルミートランダム行列理論においては、局所スペクトルの統計の普遍性は時間反転対称性の有無で変化せず、そのため一種類しか知られていなかった。そこで、我々は複素共役操作と転置操作が非エルミート系では非等価であることに注目し、転置操作に対する対称性に関するランダム行列のクラスで新しい普遍的な準位間隔分布が発現すること、これが非エルミート行列におけるthreefold wayに対応することを（Dyson's threefold wayとの相違点とともに）指摘した。

### 今後の計画

次年度以降は、今年度行った研究を深めるとともに、量子開放系を中心とする非平衡多体系の普遍性をさらに追求することを想定している。具体的には、多体局在など孤立系で重要と分かっている概念を開放系に拡張し、開放系における量子カオスの概念を探究する。これは上の(A)や(C)のテーマとも深く関わっている。もう一つのターゲットに、孤立系の熱平衡化ダイナミクスの普遍性やその例外についての研究がある。例えば、前述のFamily-Vicsekスケーリングの普遍性が乱れや粒子性などによってどう変化するかや、ETHが破れる例外的な系の探索を現在進めているところである。また、(A)では非平衡ダイナミクスを記述する時間スケールをスペクトルギャップとの関係を鑑みて評価しているが、このように緩和時間の問題は非平衡統計力学の重要なテーマである。近年、少数系についてはこうした速度限界が情報理論などとの関係性とともに進んでいる。来年度以降はこうした情報理論的な速度限界を多体系に拡張するなど、非平衡統計力学・多体理論・情報理論の融合を図っていく。

### (3) 研究室メンバー

(2020年度)

(理研白眉研究チームリーダー)  
濱崎立資

(アシスタント)  
深谷香織

### (4) 発表論文等

1. Zongping Gong, Nobuyuki Yoshioka, Naoyuki Shibata, and Ryusuke Hamazaki, Phys. Rev. A 101, 052122 (2020).
2. Zongping Gong, Nobuyuki Yoshioka, Naoyuki Shibata, and Ryusuke Hamazaki, Phys. Rev. Lett. 124, 210606 (2020).
3. Kazuya Fujimoto, Ryusuke Hamazaki, and Yuki Kawaguchi, Phys. Rev. Lett. 124, 210604 (2020).
4. Ryusuke Hamazaki, Kohei Kawabata, Naoto Kura and Masahito Ueda, Phys. Rev. Research, 2, 023286 (2020).
5. Xiao Chai, Di Lao, Kazuya Fujimoto, Ryusuke Hamazaki, Masahito Ueda, and Chandra Raman, Phys. Rev. Lett. 125, 030402 (2020). [Selected as Editor's Suggestion, Featured in Physics]

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/)