



(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) 2021年度成果と今後の研究計画

(A) 例外点的な動的量子相転移の発見

平衡状態での相転移は自由エネルギーの特異性によって特徴付けられるが、近年、温度の代わりに時間を用いて定義された「動的自由エネルギー」が特異性を持つ場合があることが発見された。これは動的量子相転移と呼ばれ、量子相転移の概念を有限時間へと拡張するものとして注目されているが、そのメカニズムなどは理解されていない点が多い。

本研究ではユニタリーな周期駆動系において現れるこの転移の新しいメカニズムとして、隠れた反ユニタリー対称性の自発的破れに起因した「例外点的な動的量子相転移」を提唱した。この転移は、動的自由エネルギーの平衡状態では存在し得ない強い特異性や、一般化相関と呼ばれる量に関する相関長の発散、および振動的な長距離秩序を伴う。本研究ではまず、元の周期駆動系があるパラメータ条件を満たすとき、それを時空間双対と呼ばれる写像に関して変換することで得られる非ユニタリー演算子が、反ユニタリー対称性を持つことを指摘した。そして、この隠れた反ユニタリー対称性が自発的に破れる（すなわち固有状態が対称性に対し不変でなくなる）とき、例外点と呼ばれるスペクトル特異性が発生し、元の模型で動的相転移を引き起こすことを示した。

(B) 孤立量子系の熱平衡化への長距離相互作用および動的制約の影響

孤立量子多体系の熱平衡化現象は、近年の人工量子系などの実験的発展に伴い注目を集めており、統計力学の基礎論とも深く関係している。系が長時間後に熱平衡状態へ緩和するかどうかは、Eigenstate thermalization hypothesis (ETH) と呼ばれる「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」という仮説が成立すれば正当化されることが知られている。我々は昨年度、局所相互作用する多体系をランダムにとった時、確率1でETHが成立することを数値的に示し、今年度それについての論文が出版された。これは局所系におけるETHの普遍性を示しているが、今年度は長距離相互作用が働いた場合はどうなるか、また局所系であってもシンプルな系で例外を見つけられるか、という二点に着目し研究を行った。

前者の問題において、我々は、距離と共にべき的に減衰する相互作用を仮定し、そのべきが一定値以上であれば、やはり確率1でETHおよび熱平衡化が成立することを数値的に示した。

一方で、その値以下のときは、有限サイズ効果が大きくなり、ETHが成立するかは判断できない。この結果は、相互作用の距離がETHの妥当性に影響を与えることを意味する。

また後者の問題において、我々は、高次元横磁場Ising模型という最も基本的な量子多体スピンの系において、横磁場が弱い極限でETHや熱平衡化が成立しなくなるということを発見した。これは、この極限でスピンのダイナミクスが動的な制限を受けるためである。また、この動的制限がHilbert space fragmentationという近年注目されている熱平衡化を破る機構に繋がることを示した。

(C) 乱れた量子多体系における普遍的な動的スケーリングの発見

我々は昨年度、量子系の粒子揺らぎの非平衡ダイナミクスにおいて（古典系の界面揺らぎ成長の普遍スケーリング則である）Family-Vicsekスケーリングが現れることを初めて示した。これは量子多体系の緩和に関する普遍的な法則を示唆しているが、その普遍クラスにどのような種類があるのかなどについては不明であった。

そこで今年度は、乱れたフェルミ多体系において、古典系にはない新しい普遍性クラスに属するFamily-Vicsekスケーリングが現れることを示した。また、粒子揺らぎだけでなく、系のエンタングルメントエントロピー（量子系特有の、エンタングルメントを特徴付ける量）にも同様な動的スケーリングが現れることを示した。

今後の計画

次年度以降も今年度の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追求し、その制御法を探索することを目標とする。具体的には、例えば上記のHilbert-space fragmentationなど孤立系で重要な概念を量子開放系に拡張し、開放系での平衡化、熱平衡化等の概念を探究・分類していく。そのような開放系の多様な非平衡クラスがどのように達成されるか、制御されるかについて考察する。その中で、非平衡開放系と、情報理論・制御理論・計算量理論など異なる分野との関係を考察し、それらの融合を図る。もう一つの方向性として、多体系の非平衡則に関する厳密な理論を構築することも目指している。例えば、量子多体系の遷移にかかる時間や、それを制御するのに必要なコストについて探求する。

(3) 研究室メンバー

(2021年度)

濱崎立資(研究チームリーダー)、深谷香織(アシスタント)

(4) 発表論文等

1. Atsuki Yoshinaga, Hideaki Hakoshima, Takashi Imoto, Yuichiro Matsuzaki, and Ryusuke Hamazaki, arXiv:2111.05586 (2021).

2. Ryusuke Hamazaki, Nat. Commun. 12, 1-7 (2021).

3. Kazuya Fujimoto, Ryusuke Hamazaki, and Yuki Kawaguchi, Phys. Rev. Lett. 127, 090601 (2021).

4. Taiki Haga, Masaya Nakagawa, Ryusuke Hamazaki and Masahito Ueda, Phys. Rev. Lett, 127, 070402 (2021).

5. Shoki Sugimoto, Ryusuke Hamazaki, and Masahito Ueda, Phys. Rev. Lett. 126, 120602 (2021).

Laboratory Homepage

<https://sites.google.com/view/nonequantstatmech/home?authuser=0>
https://www.riken.jp/research/labs/hakubi/h_nonequil_qtm_stat_mech/