

## 周期駆動下での量子多体系の非平衡緩和過程

森 貴司 〈東京大学大学院理学研究科 mori@spin.phys.s.u-tokyo.ac.jp〉

桑原知剛 〈理化学研究所革新知能統合研究センター tomotaka.kuwahara@riken.jp〉

齊藤圭司 〈慶應義塾大学理工学部物理学科 saitoh@rk.phys.keio.ac.jp〉

レーザー光などの高強度、高周波数の周期外場によって非平衡状態に駆動された系は様々な興味深い性質を示すことが知られている。周期外場による効果を積極的に用いることで平衡状態では実現が困難な新奇物性を探究しようという研究が、近年強相関電子系や冷却原子系の分野で活発に進められている。

周期外場に駆動された量子多体系は豊富な物理現象を示すと考えられている一方、周期外場によって系はエネルギーを吸収し続け、ついには完全に無秩序な高温の状態に緩和していくことが予想される。近年の孤立量子系における熱平衡化についての理論的整理を通して、固有状態熱平衡化仮説 (ETH) という考え方が熱平衡化を説明する有望な視点の一つを与えるものとして提案され、数値計算によってその妥当性が確かめられてきた。このETHの周期駆動系への自然な拡張 (これをフロケETHという) は、熱的に孤立した周期駆動下での量子多体系は最終的に温度無限大の状態に行き着くことを予想する。

この予想は、強相関電子系や冷却原子系で議論されている周期外場下での興味深い非平衡状態は実際には真の定常状態ではなく、有限の寿命を持った準定常な非平衡状態であることを示唆する。それでは、完全に無秩序な状態に行き着く前に、このような準定常的な状態が本当に存在するか、存在するとしたら、それを理論的にどう理解できるか、という問題は非平衡統計物理学の基礎論の観点から面白い問題である。ま

た、周期駆動と多体効果によって創発した興味深い物性がどの程度の時間スケールにわたって持続するのか、つまりこのような非平衡状態の安定性を明らかにすることは新奇物性の探究の面でも重要である。

我々は、フロケ理論の数学的に厳密な解析によって、これらの問題に答えることに成功した。具体的には、フロケ理論で重要な役割をするフロケハミルトニアン のマグナス展開の漸近級数的な性質を数学的に厳密に証明し、この漸近収束性が、興味深い非平衡準定常状態が長時間にわたって安定に存在することを保証することを明らかにした。さらに、そのマグナス展開の発散の仕方から、非平衡定常状態が持続する時間スケールの下限を評価することができる。これらの研究によって、高強度、高周波数の外場のもとで、量子多体系は準定常状態に緩和した後に真の定常状態に緩和する、二段階緩和過程 (Floquet prethermalization) が普遍的に生じることが明らかになった。

この準定常状態は、フロケハミルトニアン のマグナス展開を低次で切断することによって得られる、静的な有効ハミルトニアン の Gibbs 状態 (熱平衡状態) によって記述される。したがって、周期外場によって駆動された系の新奇物性を探究するという目的を達成するための基本的戦略は、「対応する有効ハミルトニアン の熱平衡状態が望ましい性質を持つように、物理系と周期外場をうまく選ぶべし」、ということになる。

### —Keywords—

**ETH:**  
固有状態熱平衡化仮説 (Eigenstate Thermalization Hypothesis). すべてのエネルギー固有状態は局所物理量を見る限り熱平衡状態と区別がつかないという仮説である。この仮説から孤立量子系の熱平衡化を導くことができる。

**フロケ理論:**  
時間周期外場がかかった系の時間発展を取り扱う一般的方法である。量子ダイナミクスの文脈では、時間依存ハミルトニアンのもとでの1周期の時間発展を、時間に依存しないフロケハミルトニアンのもとでのユニタリ時間発展に置き換える方法だと考えてよい。空間周期ポテンシャル下でのブロッホの定理の時間周期版に他ならない。

**マグナス展開:**  
任意の時間依存ハミルトニアンのもとでのユニタリ時間発展は、何らかの時間に依存しない有効ハミルトニアンのもとでのユニタリ時間発展として表現できる。その有効ハミルトニアンを、元の時間依存ハミルトニアン の多重交換子から構成する系統的な展開法である。量子力学でしばしば利用するペーカー・キャンベル・ハウスドルフの公式は、マグナス展開の特別な場合である。