

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 金子 和哉

量子力学から出発して熱力学・統計力学の基礎を理解することは、物質の緩和過程を理解し、新奇な緩和特性をもつ物質を設計するうえでも重要である。近年、冷却原子気体などの実験や、厳密対角化による数値シミュレーションに基づき、可逆なユニタリ発展であるにもかかわらず孤立量子多体系が熱平衡状態へと緩和することが明らかになってきた。理論的には、量子多体系の単一のエネルギー固有状態自体が熱平衡状態を表すという固有状態熱化仮説 (Eigenstate Thermalization Hypothesis, ETH) が、熱平衡化の機構として盛んに研究されている。ETH は量子多体系のカオス性を表していると理解できるが、量子カオスは量子情報理論やブラックホールの物理の観点からも注目され、量子情報の非局在化現象が新しいカオス性の特徴づけとして議論されている。

本論文では、ETH を発展させた二つの研究を行っており、それぞれ第 5 章と第 6 章・第 7 章でまとめられている。一つ目は、孤立量子多体系における第二法則の成否を明らかにすることを目指したものである。二つ目は、情報の非局在化やエンタングルメントの普遍的な構造という、カオスの量子情報理論的な側面と ETH との統一的な理解を目指すものである。

第 1 章では、導入として本研究の三つの背景、すなわち統計力学の基礎づけ、量子カオス、孤立量子多体系の実験の大意が説明されている。第 2 章では ETH が詳細に説明されている。第 3 章では、熱力学第二法則に関する先行研究が概観されている。第 4 章では、量子情報理論及び高エネルギー物理の観点からの量子カオスに関する近年の研究が紹介され、量子情報の非局在化の指標である非時間順序相関関数 (out-of-time-ordered correlator, OTOC) が説明されている。

第 5 章で、本論文の第一の主要な結果が議論されている。熱力学第二法則がエネルギー固有状態でも成り立つか、すなわちエネルギー固有状態から仕事を取り出すことが可能かについて論じられている。ETH の類推から、単一のエネルギー固有状態から単純なサイクル操作では仕事を取り出せないという「固有状態第二法則」を仮説として提案し、その妥当性を数値厳密対角化によって確認している。その結果、固有状態第二法則は非可積分系では成立するが、可積分系では成立しないことが明らかにされた。また、非局所物理量の ETH との関連も議論されている。さらに、弱い形での固有状態第二法則、すなわち仕事を取り出せる固有状態の割合が熱力学極限でゼロになることが、一般的な量子多体系で解析的に証明されている。

第 6 章では、本論文の二つ目の主要な結果が議論されている。まず量子情報理論的なアイデアに基づき、ETH の高次への拡張が提唱されている。高次の ETH は、エネルギー固有状態の高次のランダムネスと複雑性を特徴づけている。とくに、従来の ETH では説明不可能であった、固有状態のエンタングルメントエントロピーが Page 曲線と呼ばれる普遍的な構造を持つことが説明されている。また、高次の ETH と OTOC の減衰の関係性が議論され、有限サイズ効果のため OTOC は高次の ETH を特徴づけられないことが明らかにされている。さらに、数値厳密対角化により、非可積分スピン系では高次の ETH が成立していることが確認されている。

第 7 章では、第 6 章の議論をさらに量子情報理論の観点から発展させている。とくに、観測できる物理量が制限されている状況下で、ダイナミクスの擬似ランダムネスを記述する新たな枠組みとして、部分ユニタリデザインという概念が導入されている。高次の ETH

は、ハミルトニアンダイナミクスの一様時間サンプリングについての部分ユニタリデザインと対応している。部分ユニタリデザインにより、ランダムネスの階層的な構造を特徴づけることが可能であることが、複数の具体例の解析を通して示されている。

第8章では、本論文の成果のまとめと将来の展望が述べられている。

以上のように本論文では、量子多体系におけるカオスが、従来の ETH を超えた視点から研究されている。第一に、固有状態における熱力学第二法則の成否が明らかにされた。第二に、量子情報理論の知見を活用して ETH を拡張し、エンタングルメントの構造によって量子カオス性が特徴づけられることが明らかにされた。これらの成果は、量子力学に基づく熱力学の基礎付けのみならず、量子情報理論や量子エレクトロニクス実験とも深くかかわっており、量子多体系の緩和過程についての量子情報理論的な理解を可能にした。したがって統計物理学および量子情報理論への顕著な貢献が認められ、物理工学への寄与は大きい。よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として認められる。