

# 論文審査の結果の要旨

氏名 石井 隆志

本論文は9章からなり、第1章は序論、第2章はユニタリー時間発展による緩和の概説、第3章は eigenstate thermalization hypothesis (ETH) の概説、第4章は Generalized Gibbs ensemble (GGE) の概説、第5章は strong ETH の一般化に関する考察、第6章は時間周期系の概説、第7章は可積分時間周期系に関する考察、第8章は可積分時間周期系の heating に関する数値解析、第9章はまとめと結論、をそれぞれ記している。

本論文の前半部分(第2章から第5章)では、静的な可積分系における GGE への緩和の基礎づけの問題を調べている。まず、通常のエネルジーシェルを一般化して、局所的な保存量から構成される「一般化シェル」を定義した。この一般化シェルを用いて、ETH の一般化である「一般化 ETH」を定義した。この一般化 ETH の成立を、並進対称な非相互作用可積分系について証明した。

この結果から、系の初期状態が一般化シェル内にある時、系が GGE へと緩和することが導かれる。この結果は、クラスター性を要請した先行研究の証明よりも広いクラスの初期状態について GGE への緩和を証明している。特に、非相互作用フェルミオン系に変換できるスピン系においては物理的な初期状態はスピン演算子についてクラスター性を満たすはずだが、そのような初期状態がフェルミオン演算子についてクラスター性を満たしているかどうかは非自明であり、この結果が特に重要である。今回の結果は、局所性は満たさないものの局所的な保存量に似た性質を持つ「quasilocal」な保存量が重要であると予想されている相互作用可積分系の場合へも拡張可能だと期待される。

本論文の後半部分(第6章から第8章)では、閉じた可積分時間周期系の定常状態を、具体的なモデルについて数値的に、ヒーティングの条件と度合を調べている。

有効ハミルトニアンが自由フェルミオン系に変換できる可積分時間周期系を解析した結果、フロケマグナス展開が発散する点の近くでヒーティングの度合が急激に上昇することを見出した。また複数のモデルについて、無限温度近くへのヒーティングが起こることを見出し、その低周波数領域に

については周期  $T$  と系のサイズ  $L$  についてのスケーリング則が成立することを明らかにした。さらに、定常状態の無限温度状態とのエネルギー密度差が  $T^{-2}$ ,  $L^{-1}$  でスケールすることを見出し、 $T \rightarrow \infty$ ,  $L \rightarrow \infty$  の極限では定常状態のエネルギーが無限温度状態のエネルギーに一致することを明らかにした。またフロケ GGE の有効温度を計算し、無限温度近くへのヒーティングが起こる際はフロケ GGE が無限温度状態に近くなることを明らかにした。一方で無限温度近くへのヒーティングが起こらないモデルも示し、ヒーティングの性質の違いを波数空間における混合の程度の違いから議論している。

これらの結果は、自由フェルミオン（にマップできる）系に限定されていることや、定性的には直感的に導かれる結果であることから、その物理的重要性には若干の疑問を呈する意見もあった。しかし、多数の物理学者が研究している分野に一定の寄与を与えたことは間違いなく、量子統計力学の基礎的問題に対する理解が進んだ。よって本論文は、博士論文として十分な内容を持つものと審査委員全員が認めた。

なお、本論文は、森貴司氏、羽田野直道氏、桑原知剛氏との共同研究であるが、論文提出者が主体になって分析及び検証を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

よって、博士（理学）の学位を授与できると認める。