

近年、長時間熱平衡化しない量子多体系が実験的に発見された。この実験を契機として、熱平衡化が著しく遅い、あるいは、熱平衡化しない量子多体傷跡状態と呼ばれる状態に関する研究が盛んに行われている。本論文は、これらの研究の進展に動機付けられた研究であり、従来提案されてきたものとは異なる新しい機構による、量子多体傷跡状態を持つ模型の構成を提案する理論的研究である。特に、模型の構成手法、及び、その模型の物理状態の熱的・非熱的振る舞いについて議論している。

本論文は 5 章からなる。第 1 章は論文全体のイントロダクションである。まず、固有状態熱化仮説 (ETH) と呼ばれる孤立量子多体系の熱平衡化を説明する理論的機構を紹介し、それが成立する、あるいは、破れる状況について述べられている。特に、ETH が破れる系として従前から認識されていた 3 種類の系、すなわち、可積分系、多体局在系、Hilbert space fragmentation と呼ばれる構造を示す系について、理論・実験双方の観点からレビューしている。第 2 章では、上述の 3 種類の系とは異なる機構で ETH を破る量子多体傷跡状態を持つ系について述べられている。まず、量子多体傷跡状態が認識される契機となったリュードベリ原子系での実験が紹介され、その実験の有効模型について解説している。続いて、量子多体傷跡状態に関する理論的研究の進展と、本論文の研究動機が述べられている。

第 3 章以降においては、本論文の主要な成果である、厳密に書き下せる量子多体傷跡状態を持つ模型を構成する新たな手法を提案している。第 3 章では、提案手法で構成できる最も単純な模型として、スピン量子数 $1/2$ の量子スピン鎖を詳しく調べている。まず、可積分模型である XX スピン鎖を出発点とし、そのハミルトニアンと可換な特定の演算子に着目することで非熱的なエネルギー固有状態を書き下し、これらの非熱的な状態は固有状態として残したままハミルトニアンの可積分性を破壊する摂動を加えることで、量子多体傷跡状態を持つ模型を構成する。摂動は並進対称性を破ってもよく、このような乱れに対しても安定な量子多体傷跡状態を陽に構成したのは本研究が初めてである。このように構成した模型について、準位間隔統計、固有状態の可観測量期待値、エンタングルメント・エントロピー、及び、ダイナミクスを数値計算で調べている。その結果、本模型は非可積分系にもかかわらず ETH を破る傷跡状態が存在すること、典型的な初期状態は直ちに熱平衡化するが、傷跡状態で張られる部分空間内の状態は、周期的運動を繰り返し熱平衡化しないことを明らかにしている。第 4 章では、第 3 章での構成手法を一般化し、傷跡状態を持つ量子スピン鎖模型で任意の整数スピン、半整数スピンをとるものや、パラメタを複数持つ傷跡状態を構成している。この一般化にあたり、重要な役割を果たすオンサーガー代数とオンサーガー対称性を持つ、任意のスピンの可積分な量子スピン鎖模型を出発点とする。オンサーガー代数の任意の元がハミルトニアンと交換するために、ある特定の演算子に着目することで非熱的な固有状態を陽に書き下すことができ、第 3 章での構成手法と同様に、これらの非熱的な状態を固有状態としたままハミルトニアンの可積分性を破壊するような摂動を加えることで、望む模型を構成している。このような摂動は、着目する演算子により生成されるコヒーレント状態を考えることで効率的に見つけることができるが、着目するオンサーガー代数の元の数に応じて、コヒーレント状態も複数のパラメタを持つものに一般化している。これらの一般化の具体例として、スピン 1 の模型、及び、2 パラメタのコヒーレント状態から構成される模型の性質を数値計算により詳しく調べている。その結果、第 3 章で見られたものと同様な熱的/非熱的な振る舞いを確認し、この一般化が確かに有効であることを明らかにしている。第 5 章では全体のまとめと展望を述べている。

本論文の内容は、桂法称氏、吉岡信行氏との共同研究を含むものであるが、論文中で述べられている結果はいずれも論文提出者が主体となって導出したものであり、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士 (理学) の学位を授与できるものと判断する。