

審査の結果の要旨

氏名 真田 兼行

本論文は、熱化に代表される量子多体系のダイナミクスにおいて重要な、量子多体傷跡状態(Quantum Many-Body Scars; QMBS)について、新たな実例の構成と、新たな構成法の提案を行ったもので、以下の 5 章からなる。第 1 章はイントロダクションであり、量子多体系における熱化について概観している。系を長時間放置すると熱平衡状態に到達する現象を熱化と呼ぶ。熱化は、統計力学における基礎的な仮定であるが、近年、孤立量子多体系について、微視的なダイナミクスから熱化を説明する研究が盛んになっている。特に、全てのエネルギー固有状態が熱的であるという(強い)「固有状態熱化仮説」に基づく議論が盛んに行われている。強い固有状態熱化仮説は多くの量子多体系で成立していることが知られているが、可積分系などの例外もある。近年では、可積分性などの構造がない系でも、少数の非熱的な固有状態が現れる、強い固有状態熱化仮説に対する例外も注目されている。このときの非熱的な固有状態の一種を QMBS と呼ぶ。第 2 章では、QMBS に焦点をあててレビューを行っている。熱的な状態では、部分系とその外部との間のエンタングルメントエントロピーは熱的なエントロピーに対応して、部分系の体積に比例してスケールする。一方、QMBS は、基底状態に比べ高いエネルギーを持つにもかかわらず、エンタングルメントエントロピーが抑制され体積に比例しない。このような QMBS の特徴を、既知の実例に基づいてレビューしている。さらに、QMBS の系統的な構成法をレビューしている。特に、状態空間の部分空間における梯子演算子に対応する、制限されたスペクトル生成代数(Restricted Spectrum Generating Algebra; RSGA)に基づく構成を紹介している。

第 3 章と第 4 章が、オリジナルな研究成果を含む本論文の中心部分である。第 3 章では、スピン 1 の系における新たな量子多体傷跡状態を具体的に構成している。たとえば、スピン 1 鎖において隣接する 3 つのスピンに関するスカラーカイラリティを非摂動ハミルトニアンとし、そこにゼーマン項とランダムな単一イオン異方性を導入したモデルが、非自明な量子多体傷跡状態を持つことを示している。QMBS の構成は、既に確立している方法論である RSGA に基づいているが、3 体以上の相互作用をもつスピン 1 鎖における QMBS はあまり知られておらず、本論文で与えられた新しい実例には意義がある。また、得られた低エンタングルメント状態が他の要因によるものである可能性を排除するために、丁寧な議論を行っている。まず、エネルギー準位統計がガウス型ユニタリーアンサンブルのランダム行列に一致することを確認した。これは、系が非可積分であることを示唆する。また、RSGA によって得られた低エンタングルメント状態の一部は、対称性により他の状態から分離したもので QMBS には相当しないことを指摘し、残る

低エンタングルメント状態が QMBS である可能性が高いことを論じている。また、適当な初期条件を与えたときの量子ダイナミクスの数値的なシミュレーションを行い、RSGA に付随する QMBS の存在を反映した周期的な再帰現象が見られることを確認している。さらに、この章での議論は 2 次元以上の系にも拡張できることを論じている。

第 4 章では、可積分な境界状態(Integrable Boundary States; IBS)に基づく、QMBS の新しい系統的な構成法を提案している。場の理論における境界条件は、時空を回転して境界を空間軸に平行にすると、初期条件に対応する量子状態で記述される。可積分な場の理論において境界も可積分性を保つ場合、境界条件は無限個の保存量のゼロ固有値に属する。これを IBS と呼ぶ。格子模型でも IBS を考えることができ、これらは低エンタングルメント状態であり行列積状態として記述できる。行列積状態については、それを基底状態として持つような「親ハミルトニアン」の構成法が知られており、そのような親ハミルトニアンは一般に非可積分である。そこで、親ハミルトニアンと、保存量の和によってハミルトニアンを構成すると、IBS はエネルギー固有状態のままであるが、基底状態から離れた高エネルギー状態にすることができる。このとき、構成したハミルトニアンについて、IBS は QMBS を与える。この構成の応用として、たとえば、スピン 1/2 鎖のスカラーカイラリティを保存量、非可積分な親ハミルトニアンをマジランダー・ゴッシュ模型としたとき、ダイマー状態が QMBS となることを示している。この IBS に基づく QMBS の構成についても、2 次元以上に拡張可能であることを論じている。

以上のように、本論文では、量子統計力学で近年重要となっている QMBS について、新しい興味深い実例の構成と、新たな構成法の提案を行ったもので、学術的に価値が高い。なお、本論文は桂法称氏・Yuan Miao 氏との共同研究であるが、論文提出者が主体となって構成およ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。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。