

# 論文審査の結果の要旨

氏名 中野 颯

中野氏は本論文において、熱平衡化ダイナミクスが阻害された量子多体系の一つである量子多体スカーを解析することを目的としました。量子多体スカーの背後には古典系の周期軌道があるとの考えに基づき、行列積状態の時間発展を時間依存変分原理を用いて解析し、それによって定義される多様体上で周期軌道を発見する新しい数値解析手法を開発しました。その多様体上の軌道を半古典的運動と解釈することによって、多様体上の周期軌道と古典系の周期軌道を関連付けるというのが最終的な目標です。

中野氏は、新たに開発した解析手法を、量子多体スカーとして知られる PXP 模型に適用して周期軌道を発見することに成功し、それが実際に PXP 模型の量子多体スカー状態に対応していることを示唆しました。複雑な多様体上で周期軌道を発見する数値解析手法の開発が特に評価できます。

本論文は6章で構成されます。第1章は全体のイントロダクションであり、第2章と第3章には主要な成果を述べるためのレビューが記述されています。本論文の主要な結果は第4章と第5章に述べられています。第6章は全体のまとめです。

第2章は熱平衡化ダイナミクスにおける量子多体スカーの役割についてのレビューです。孤立量子系はユニタリ的な時間発展しかしませんが、局所的な物理量に着目するとほとんどの場合に熱平衡化の振る舞いを示すことがわかってきました。おおまかな区別として、「非可積分」な量子多体系は熱平衡化する一方、例外的に「可積分」な量子多体系は、保存量が多数存在するために熱平衡化しないという認識が得られています。しかし非可積分系でも、模型や初期状態によって熱平衡化しない場合があることが、最近になって指摘されるようになりました。これに対応する現象が古典力学系にあるという考え方が第2章では説明されています。古典力学系でカオスになる系でも、初期条件によって周期軌道が現れる場合があります。前者が量子系の熱平衡化する場合と対応しており、後者が初期状態によって熱平衡化しない場合に対応するという考え方です。古典力学系での周期軌道をスカーと呼ぶため、量子系での現象を量子多体スカーと呼ぶことが述べられています。

第3章では量子ダイナミクスを、ある多様体上の半古典的な軌道として記述する理論がレビューされています。まず量子多体系の状態を量子積状態に射影し、それに時間依存変分原理を適用して、行列積状態を記述する多様体上の軌道として量子系の時間発展を記述する理論です。後の章で数値計算に必要な事項として、実際に行列積状態において時間発展を計算するアルゴリズムが詳細に説明されています。

第4章では中野氏の主要結果の一つである、行列積状態で周期軌道を発見するアルゴリズムを詳細に述べています。本論文では PXP 模型を例にして説明していますが、一般の一次元短距離相互作用格子系であれば適用することができます。行列積状態には「ボン

ド次元」というパラメーターがあり、正確な量子的ダイナミクスはボンド次元が無限大で回復されます。一方でボンド次元が1の場合は単一サイト平均場描像に相当します。中野氏は、ボンド次元を変化させることによって半古典的な（より正確には平均場的な）描像と、量子的な極限を結びつけることを目指して、ボンド次元が2以上のときにも効率的に周期軌道を発見するアルゴリズムを提案しました。特に、時間依存変分原理によって定義される多様体上でのダイナミクスを追跡するために、微分を正確に計算する手法を組み合わせていることが注目されます。さらにこれらを用いた数値計算を実行して、中野氏が提案したアルゴリズムが効率的にスカー状態を検出することを実証しています。

第5章では、第4章のアルゴリズムで検出した周期軌道の重ね合わせとしてスカー状態に対応するエネルギー固有状態を構築する手法を述べています。ここではボンド次元として2, 3, 4の計算結果を提示し、およそその収束が見られることを報告しています。確定的な結論を得るためには、より大きいボンド次元での計算から、ボンド次元に関するスケーリング則を見い出してボンド次元無限大へ連続的に外挿することが必要ですが、その実行可能性が視野に入ってきたことを述べています。

なお、本論文第4章と第5章の内容はアメリカ物理学会誌に藤堂眞治氏との共著論文として投稿して公表される予定ですが、論文提出者が主体的に研究を進めたものであり、論文提出者の寄与が十分であると判断しました。また、論文の内容と形式は東京大学大学院理学系研究科における博士論文に関する指針に則っていることを確認しました。

以上のことから、中野颯氏に博士（理学）の学位を授与できるものと審査員全員が認定しました。