

氏 名 Atis YOSPRAKOB

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2352 号

学位授与の日付 2022 年 9 月 28 日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 素粒子原子核専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Complex Langevin, thimbles and tensor networks as
solutions to the sign problem

論文審査委員 主 査 日高 義将
素粒子原子核専攻 教授
北野 龍一郎
素粒子原子核専攻 教授
磯 暁
素粒子原子核専攻 教授
西村 淳
素粒子原子核専攻 教授
金児 隆志
素粒子原子核専攻 講師
福間 将文
京都大学 理学研究科 准教授

(Form 3)

Summary of Doctoral Thesis

Name in full Atis YOSPRAKOB

Title Complex Langevin, thimbles and tensor networks as solutions to the sign problem

The numerical sign problem is the recurring obstacle that appears in Monte Carlo studies of many systems in high energy physics. To tackle such problems, several techniques had been introduced with different advantages and disadvantages. Here, we will discuss three of the most promising ones: the complex Langevin method (CLM), thimble simulations, and the tensor network approach.

For the CLM, we apply the technique to the two-dimensional $U(1)$ gauge theory with a theta term which, although is exactly solvable, suffers from a severe sign problem in the Monte Carlo simulation. For the CLM to reproduce the correct result, a certain condition based on the distribution of the drift terms must be satisfied. We find that the naïve implementation of the CLM only works in the weak-coupling region, where another problem—the topology freezing problem—occurs. We also find that the validity issue of the CLM and the topology freezing are trade-off problems that cannot be solved separately. The solution to this is the introduction of a topological defect on the lattice, where even though the notion of topology is sacrificed, the issues of topology freezing and validity of CLM are both solved simultaneously in the continuum limit.

For the thimble calculation, we consider a new approach to simulating the path integral using the hybrid Monte Carlo (HMC) algorithm. Despite the common knowledge that performing HMC on the original manifold is slower than performing on the deformed manifold, we show that the first approach can be done equally fast with the use of the backpropagating technique. We demonstrate the success of this technique on the real-time path integral in 1+1-dimensional quantum mechanics, where the sign problem is known to be extremely severe.

Finally, we discuss the application of the tensor renormalization group (TRG) approach to two-dimensional gauge theories. In particular, we propose a way to efficiently construct the fundamental tensor using character expansion. We also discuss the behavior of large- N gauge theories from the viewpoint of the tensor network. We also discuss the theories with a theta term and also propose a new kind of large- N volume independence which only appears in the strong-coupling region by looking at the behavior of singular values of the tensor.

博士論文審査結果

Name in Full
氏名 Atis YOSPRAKOB

Title
論文題目 Complex Langevin, thimbles and tensor networks as solutions to the sign problem

Yosprakob 氏の学位論文は、場の理論の非摂動的な研究において現れる「符号問題」を克服する手法に関して、同氏が博士課程在学中に行ってきた一連の数値的な研究をまとめたものである。特に、2011年より急速に発展してきた複素ランジュバン法やレフシェッツ・シンプル法その他、テンソルネットワークを用いた全く異なる方法について、それぞれの基本となるアイデアから始まり、具体的な応用例について詳細に論じられている。

最も注目しているのは、レフシェッツ・シンプル法に関する研究である。これまでに用いられてきた方法では、積分路の変形に用いるフロー方程式の不安定性のため、系のサイズが小さい場合にしか適用できなかったが、Yosprakob 氏はフロー方程式を改良することにより不安定性を完全に取り除き、系のサイズが大きくなった場合にも適用することに成功した。また、この手法の有用性を検証するため、量子論的時間発展を経路積分によって調べた結果がまとめられている。特に、これまで量子力学におけるトンネル効果を実時間経路積分の立場から理解することは十分にできていなかったが、Yosprakob 氏は上記の手法を適用することにより、複素座標をもつような経路がトンネル効果の記述に重要な役割を果たすことを明確に示した。こうした研究成果は、今後、量子宇宙論など様々な問題への応用が期待される。

一方、テンソルネットワークを用いた手法では、ゲージ理論への応用が大きな課題として残されていた。これまでの研究では、ゲージ群が $U(1)$ もしくは $SU(2)$ の場合に限られていたが、より高階のランクをもつゲージ群の場合への応用例はなかった。これに対して Yosprakob 氏は 2次元ゲージ理論について、 $U(N)$ や $SU(N)$ をゲージ群としてもつ場合の計算を具体的に行うことにより、基本となるテンソルの構成法を詳細に論じた。特に、ゲージ群の表現に関する足し上げをどのように打ち切るか、といったことが問題となるが、これに対して具体的な方針を確立することに成功し、 $SU(3)$ のゲージ理論で記述される量子色力学の研究などへの新しい道を切り開いた。

これらの内容は学術的に十分な価値が認められるものであり、博士論文の内容として必要な水準を満たしていると判断し、審査委員会は全会一致で Yosprakob 氏の博士論文審査を合格と判定した。