

時空創発の記述に向けた繰り込み群に基づくテンソルネットワークの研究

メタデータ	言語: ja 出版者: 静岡大学 公開日: 2024-06-18 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 桑原, 孝明 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.14945/0002000665

(課程博士・様式7)

学位論文要旨

専攻：情報科学専攻

氏名：桑原 孝明

論文題目：時空創発の記述に向けた繰り込み群に基づくテンソルネットワークの研究

論文要旨：

人類が到達した中で、高エネルギーで最も成功を収めた理論は標準模型である。電磁気力、弱い力、強い力の量子論を統一的に記述し、実験結果と非常によく整合している。しかしながら、宇宙の起源を解明する上で、ブラックホールや初期宇宙といった対象を記述するのに必要な重力の量子論は未だ構築されていない。量子重力理論の構築こそ、素粒子論分野に残された最大の問題の一つである。

量子重力理論を構築する上で注目されているのが、Anti de-Sitter space/Conformal field theory correspondence(反 de-Sitter 空間/共形場理論対応, AdS/CFT 対応)である。この対応は、負の定曲率をもつ空間における重力理論と、その境界に定義された共形場理論が等価であることを主張する。具体例としては、古典重力理論と large N 強結合ゲージ理論が対応する。AdS/CFT 対応は、共形場理論のエンタングルメント構造を始めとする数多くの例で正当性が検証されている。しかしながら、AdS/CFT 対応は提唱から 20 年以上経った今日においても厳密な証明がされておらず、基本的な機構が理解されていない。

AdS/CFT 対応の基礎を解明するには、AdS/CFT 対応を顕に仮定せずして、境界上の理論からこれらの条件を満たすような時空内部(バルク)の連続幾何を構築することが必要である。そこで、テンソルネットワークによるアプローチが有力視されている。実際、MERA や HaPPY code, Random tensor network などが離散幾何を記述し、AdS/CFT 対応が備えるべき性質を捉えている。実際に時空の創発を記述するには、連続的な幾何を導出するという困難と、境界としてゲージ理論を扱うという困難とを克服する必要がある。

本論文では、AdS/CFT 対応の機構解明に向けた繰り込み群に基づくテンソルネットワークの研究について述べる。最終的に境界上のゲージ理論のテンソルネットワークから連続的な幾何を構築すべく、テンソルネットワークと量子エンタングルメント、繰り込み群、量子誤り訂正の関係を明らかにすることを目指す。

まず、一般のゲージ理論の経路積分をテンソルネットワークの形式で表す新たな定式化を提案した。この定式化を用いて、テンソルネットワークを用いる手法の一種であるテンソル繰り込み群により、3次元 SU(2)ゲージ理論の解析を行った。この研究はテンソル繰り込み群により、3次元以上の非可換ゲージ理論の解析に成功した初めての研究である。AdS/CFT 対応において、古典重力と対応するのは強結合ゲージ理論であることから、将来

的にはゲージ理論から数値的に創発する幾何へとアプローチすることが期待される。さらに波及効果として、有限密度 QCD への応用が考えられる。テンソル繰り込み群は、従来用いられてきたモンテカルロ法による解析を阻んできた符号問題が原理的に生じない。そのため未解明である有限密度 QCD の相構造の第一原理計算による直接探索の手法の有力候補である。テンソル繰り込み群によって、スカラー場とフェルミオン場は 4 次元系の解析がすでにされている。本研究は 4 次元 QCD の解析に不可欠な高次元ゲージ理論の解析に初めて成功したという点においても、重要な進歩と考えられる。

重力理論に向けた解析的なアプローチとして、スカラー場の波動関数のスケール依存性を記述する汎関数微分方程式を厳密繰り込み群により導いた。これは連続幾何を直接扱うための連続テンソルネットワークを、AdS/CFT 対応において不可欠である繰り込み群から直接得るための枠組みを構築したことを意味する。将来的には、量子誤り訂正との関係の究明や、エンタングルメント構造の解析により時空創発へとつなげることが展望である。

また、繰り込み群と量子誤り訂正の関係について研究を行った。量子誤り訂正はもともと量子コンピュータにおいてデータをノイズから守るために構築された理論である。近年では AdS/CFT 対応において、バルクの自明理論を避けるためには、量子誤り訂正と関係づかなければならないことが示された。そこで、我々が厳密繰り込み群から構築した連続テンソルネットワークと量子誤り訂正もまた関係づくと考えられる。この関係を議論するため、まず ERG 方程式の摂動解を用いて、繰り込み群の逆のフローから量子誤り訂正符号を構築する例を示した。

将来的にはこの研究を更に発展させて、量子誤り訂正を繰り込み群の枠組みで記述することで、連続テンソルネットワークと量子誤り訂正、繰り込み群の関係がつくと期待される。これらの研究により、今まで部分的な理解にとどまっていたテンソルネットワークと繰り込み群、量子誤り訂正の関係の解明へと一歩近づいたと言える。将来的には、これらの関係を包括的に理解し、テンソルネットワークからバルク幾何を構成することが展望である。