

(続紙 1)

京都大学	博 士（理 学）	氏名	酒井 勝太
論文題目	Gravity and Higher Spin States in the IIB Matrix Model and the Effective Field Theory		
（論文内容の要旨） 現在の素粒子物理学において、実験結果は標準模型に基づく予言とほぼ一致しており、僅かに報告されている差異も統計が蓄積されるにつれて解消してゆく傾向にある。一方で、標準模型の範疇では解決できないと思われる理論的、宇宙論的課題が存在する。特に理論面での大きな課題として、量子重力理論の構成が挙げられる。 その候補である弦理論は、時空の揺らぎである重力子を量子論的に扱う一方で、時空そのもののダイナミクスは考慮しない。これは現在の弦理論が摂動論の範疇にあることによる。弦理論の非摂動的定式化が構成できれば、それは時空や重力を含めた量子論になると考えられる。 本論文では、その非摂動的定式化の候補であるIIB行列模型に焦点を当てて議論している。行列模型の最大の特徴として、力学変数である行列の物理的解釈が複数存在し、それぞれに非自明な物理を記述できるという点がある。論文ではまず行列が非可換多様体をなす代数であるという見方を採用した場合に、行列の揺らぎがその多様体上の重力を記述するというシナリオを検証した。その結果、非可換性のleadingしか見えないスケールで万有引力を再現する機構を提案した。一方でこの機構、ひいてはこの見方が、重力の記述という観点からは不合理なものであることを指摘した。 次に本論文では、行列を曲がった時空上の微分演算子と解釈する立場に基づき解析を行っている。これは演算子解釈と呼ばれる。この立場ではEinstein方程式の真空解が創発し、さらに重力の記述に不可欠とされる微分同相変換不変性が顕わに存在する。その一方で、tree-levelでは質量をもたない高ランクテンソル場が無数個出現し、模型の整合性が非自明になっている。本論文では、それらのテンソル場に対する高スピングージ対称性が模型に存在し、場が正ノルム状態の一般化された曲率であることを明らかにした。併せて輻射補正が各場に与える影響を評価し、それが質量項を誘導することを明らかにした。そしてその質量項が、ボソンの自由度が支配的である限りエネルギーの正定値性を保つことを示した。 さらに、行列模型の解析から示唆される有効場理論の構造についても、本論文は議論している。直接有効場理論を解析することが困難であることは知られている。本論文では代わりに、行列模型から得られると考えられている物理を、場の理論の枠組みにおいて追求することで、有効場理論の詳細な構造を浮き彫りにしようと試みている。 その一つがインフレーションに関するものである。IIB行列模型を演算子解釈で扱うと、有効場理論に出てくるスカラー場のポテンシャルは縮退した最小点を持つ。その事実を受けて本論文では、そのような形のポテンシャルとインフレーションが両立する機構を解析し、ポテンシャルの形を制限すれば観測と矛盾しないことを示した。 もう一つ本論文で扱っているものは、曲がった時空上の有質量高スピン場の記述である。そのような場はIIB行列模型の有効理論として自然に出現するものである。論文では、場の理論の文脈でこれらを記述するラグランジアンを構成を考察している。結果、スピンが3以上の場は曲がった時空上で、余分な負ノルム成分を落とす拘束条件が運動方程式に内包されておらず、整合的に記述できないことを明らかにした。また、この点の克服方法として、無限個の場を導入するという方策を論じている。			

(論文審査の結果の要旨)

本論文では、量子重力を記述し得るIIB行列模型に注目し、その理論的整合性と有効場理論の構造に焦点を当てて解析している。

行列を非可換多様体の代数とみなす立場をとる研究では、当該分野で議論が起こっていた創発重力シナリオを批判的目線で考察し、未検証だった万有引力の再現を議論することでその不合理さを指摘した。これは、行列模型をどのように扱うことで重力を記述できるか、という基本的問いの答えを絞るものであり、行列の演算子解釈を支持するものになった。

そして、演算子解釈に基づく行列模型の整合性の解析が、本論文の主要な部分を占めている。論文中で考察されているのは対称性と輻射補正に関する側面である。特に、無限個の高ランクテンソル場が状態空間の正定値性を破る可能性があるという状況に対し、高スピン対称性の存在を示すことで正定値性を示した。それだけでなく、テンソル場が一般化された曲率という幾何学的量であることを見出した。これは行列模型に出現する場の物理的解釈を特定するもので、模型から現実的な物理を読み取るための重要な手がかりとなるものである。

輻射補正の解析では、エネルギーの正定値性という観点からも理論が健全であること、各場が現実の宇宙では質量をもつことを示すことに成功している。後者については、なぜ無数の場が現実には観測されていないのかという、現象論的疑問に回答を与えた点で大きな進展である。

本論文ではさらに、場の理論の枠組みから、IIB行列模型と有効場理論の繋がりを明かそうと試みている。これは、直接導出が困難なIIB行列模型の有効理論の構造を、場の理論から遡って特定する独創的な研究である。インフレーションの解析では、定性的な提案にとどまっていた先行研究を受けて、より具体的なインフレーション機構とそれを可能にするポテンシャルの形を制限した。これにより、現実の観測との無矛盾性から、IIB行列模型の真空構造を浮き彫りにした。

また、有質量高スピン場の研究では、それらが重力と結合するならば無限種存在しなければならないことを指摘した。この結果はIIB行列模型の演算子解釈の整合性を支持するものである。さらに注目すべき点として、この二つの解析はIIB行列模型のみならず、量子重力を記述する理論が一般に持たねばならない構造を明らかにしている。したがってその結果は今後、量子重力理論を構成する一般の試みに対して重要な鍵となる。

以上のように、本研究は量子重力理論の候補であるIIB行列模型の演算子解釈に対して、その整合性を強力に支持する結果を出すだけでなく、有効場理論の構造に迫る結果をもたらした。これらはすべて、演算子解釈の下で量子重力を記述する試みに正当性を与える重要なものである。それだけでなく、量子重力を記述し得る理論体系と有効場理論のつながりを、両側から相補的に調べた点で画期的な研究である。個々の研究において両者間の関連性が薄れつつある現在の素粒子論において、本論文の立場は非常に望ましく、その上で数々の意義深い結果を出したことは高く評価できる。本論文は、堅実な物理学的思想の下で量子重力理論構成に向けた進展をもたらすものになった。

よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和2年1月16日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降