

氏 名	はな だ まさ のり 花 田 政 範
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 3126 号
学位授与の日付	平 成 19 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	理 学 研 究 科 物 理 学 ・ 宇 宙 物 理 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	Emergence of spacetime from IIB matrix model and large- N reduced Yang-Mills theories (IIB 行列模型及び次元縮約されたヤン・ミルズ理論における時空の生成)
論文調査委員	(主 査) 教 授 川 合 光 教 授 畑 浩 之 教 授 植 松 恒 夫

論 文 内 容 の 要 旨

自然界には電磁相互作用、弱い相互作用、強い相互作用および重力相互作用という4種類の基本的な相互作用が存在する。現在実験・観測がなされている範囲では、これらの相互作用は素粒子標準模型と一般相対性理論によって非常にうまく記述されている。しかし、この枠組みは未だ究極のものではなく、現在観測が行なわれていないより高エネルギーの領域ではこれらを統一する新たな理論が存在するであろうと考えられている。超弦理論はそのような「統一理論」の有力な候補である。

超弦理論は未だに摂動論的な定式化しか知られていないが、その枠内でも既に非常に豊かな構造を持ち、低エネルギーで標準模型を再現可能であると信じられている。しかし、本当に標準模型を再現してみせるには非摂動的な定式化が不可欠である。そのため、超弦理論の非摂動的な定式化を探す試みが精力的になされている。

本論分では、超弦理論の非摂動的定式化の有力な候補の一つである IIB 型行列模型及びそれに関連したヤン・ミルズ型の行列模型について、背景時空がどのように記述されるかに特に重点を置いて論じている。IIB 型行列模型においては、時空の構造は行列の配位と対応しており、真空として実現される時空は行列模型の基底状態としてダイナミカルに決定される。しかし、これまでは行列模型の枠内で任意の曲がった背景時空を記述する手法は知られていなかった。申請者は申請論文において、曲がった背景時空を行列模型で取り扱うための新しい物理的解釈を導入した。具体的には、行列模型の変数を背景時空に作用する共変微分と同一視した。また、この同一視を可能にするために、ヒルベルト空間として曲がった時空の上の主 $\text{Spin}(10)$ 束の上の関数全体の空間を取ることで、共変微分を行列、より正確に言えば無限時限のベクトル空間の上の自己準同型写像として表すことができることを示した。このようにすると、あらゆる曲がった背景時空が統一的に取り扱えるのみならず、一般座標変換不変性及び局所ローレンツ不変性が行列模型のユニタリ対称性の一部として実現される。更に、行列模型の運動方程式から自然にアインシュタイン方程式が従うことも示されている。以上により、行列模型が重力を含んだ背景非依存な理論であると解釈できることが分かる。申請論文では、更に、振率を伴った共変微分を考えればディラトンや2階反对称場といった超弦理論に不可欠な場が行列模型に埋め込めることや、超行列模型を用いれば局所超対称性が超ユニタリ対称性の一部として実現できることなども示されている。また、将来的な数値計算への応用を見据えて、曲がった時空上の共変微分を行列で表す際の具体的な成分表示も論じられている。

論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

自然界には四種類の基本的な相互作用が存在し、これらは現在実験が行なわれている範囲では素粒子標準模型及び一般相対論によってうまく記述できている。しかし、現在の枠組みでは理論に非常に多くのパラメーターが存在するほか、物質場の世代数がなぜ3であるのか、なぜちょうど量子異常が存在しないような物質場の組み合わせが存在するのかといった基本的な問題が説明できない。このような理由から、現在の枠組みを越えた統一理論の存在が予想されている。超弦理論はその有力な候補である。

超弦理論の非摂動的な定式化は、素粒子論における最重要課題のひとつである。行列模型は超弦理論の非摂動的定式化の有望な候補であり、さまざまな側面から研究されている。行列模型の特に著しい性質として、背景時空が理論の基底状態としてダイナミカルに決定可能できることが挙げられる。この性質は、超弦理論から現実の世界が再現できるかどうかを決定する上で非常に重要である。しかし、申請者を含む共同研究以前には、行列模型の枠内で任意の曲がった時空を記述する手法は知られていなかった。そのため、行列模型で現象論的に望ましい複雑なコンパクト化の仕方が可能であるかどうかといった問題に取り組むには全く手掛かりが無い状況であった。

申請者は、申請論文において、行列模型であらゆる曲がった時空を統一的に扱うことが可能になる物理的解釈と、それを可能にするための全く新しい数学的手法を導入した。これにより、上述のような問題にも原理的に取り組めるようになった。もちろん、どのようなコンパクト化が実現されるかを調べるためには量子効果の解析が本質的に重要であり、完全な理解にはまだ乗り越えるべき障害が残されている。しかし、少なくとも古典的にはアインシュタイン方程式が再現され、さらにダイラトンや2階反对称場といった弦理論に不可欠な場が自然に理論に含まれることが指摘されている。行列模型からこのような結果を導き出したのは本申請論文が初めてである。また、本論文においては超行列模型についても考察されており、局所超対称性が超ユニタリ対称性の一部として実現できることや、四次元のモデルの場合には運動方程式がアインシュタイン方程式及びラリタ・シュヴィンガー方程式と矛盾しないことが示されている。

以上のように、本申請論文は、超弦理論の非摂動的定式化に向けたオリジナルかつ興味深い業績である。また、共著の形式を取った部分が含まれてはいるが、申請者独自の貢献が大きいことが確認されている。

よって、本申請論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。

また、本論文ならびに発表論文について、論文の内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。