

氏 名 伊藤 祐太

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1824 号

学位授与の日付 平成28年3月24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 Numerical studies on the matrix model and the expanding
universe

論文審査委員 主 査 教授 磯 暁
准教授 西村 淳
教授 北澤 良久
教授 橋本 省二
准教授 郡 和範
准教授 土屋 麻人 静岡大学

論文内容の要旨
Summary of thesis contents

Numerical studies on the matrix model and the expanding universe

The Standard Model is extremely successful in understanding quantum field theory of fundamental interactions perturbatively and it can explain the experimental observations except for a few important remaining problems. Also the lattice gauge theory has been established as a non-perturbative approach to the physics of strong interaction. Numerical studies based on the lattice gauge theory is actually a powerful approach to understand the physics in the strong coupling region where perturbative approaches are not applicable. On the other hand, describing the quantum gravity is not yet achieved although it is necessary in understanding the dynamics of the early universe in which macroscopic description of gravity by general relativity breaks down due to the cosmic singularity. As a most promising candidate for a quantum gravity theory, the string theory has been studied for a long time. However, superstring theory requires the space-time to have ten dimensions whereas our universe has only four dimensions. In order to obtain a four-dimensional low-energy effective theory from superstring theory, one has to consider compactification of six-dimensional space. However, it is known that there are too many vacua giving 4d effective field theories with various gauge symmetries. Therefore, as far as one considers string theory perturbatively, there is no principle to choose one vacuum. Thus, in order to understand how our universe can appear from string theory, one has to deal with it non-perturbatively. As a non-perturbative formulation of superstring theory or M theory, several matrix models were proposed, which are defined by dimensionally reducing the 10d N=1 SYM theory to $d=0$, $d=1$ and $d=2$. These models naturally describe the state of multi-strings and D-branes by embedding them into the matrix degrees of freedom. In this approach, the eigenvalue distribution of matrices represent a typical distribution of such objects in 10d space-time, which can be regarded as the dynamical extent of space-time. Especially, the type IIB matrix model, which was proposed by Ishibashi, Kawai, Kitazawa and Tsuchiya, corresponds to the $d=0$ case above, and it is expected to explain how the 4d space-time emerges from the compact 10d space-time because the model does not have any coordinates a priori.

The Euclidean type IIB matrix model obtained by the Wick rotation has a finite partition function, which enables us to study the model by a numerical approach without any further regularizations. A recent study on the Euclidean model using the Gaussian expansion method indicates that the $SO(10)$ rotational symmetry of space breaks down to $SO(3)$ instead of $SO(4)$. However, this result should be treated with care since the method is based on an approximation. The numerical difficulty in studying the Euclidean type IIB matrix model comes from the sign problem which

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

appears when the action has a complex phase. On the other hand, one can consider the Lorentzian type IIB matrix model which has been studied for the first time using the Monte Carlo simulation by Kim, Nishimura and Tsuchiya in 2011. The model is suitable for studying the real time dynamics since the time coordinate is treated as a real number. By studying the time evolution of 9d space, it has been shown that the $SO(9)$ rotational symmetry of the 9d space is spontaneously broken down to $SO(3)$, and only three out of nine spatial directions start to expand at some critical time in the model. This result indicates that the (3+1)d space-time emerges from the (9+1)d space-time predicted in string theory. It should be emphasized that the dimensionality of the space-time is determined uniquely by the non-perturbative dynamics of string theory in this model.

In this thesis, the dynamics of the space-time in the Lorentzian type IIB matrix models is studied using numerical simulations. In order to investigate what happens at late times, two simplified Lorentzian type IIB matrix models were studied. It was found that the emergent space expands exponentially at early times, and the expanding behavior changes into a power law $t^{1/2}$ with respect to time t at late times. This is reminiscent of the expanding behavior of the inflation and the Friedmann-Robertson-Walker universe in the radiation dominated era, respectively. The infrared cutoff dependence of the expanding behavior is also investigated in these models. For the simplified model, it turns out that the infrared cutoff effects disappear for a certain region of the cutoff parameter in the infinite volume limit. On the other hand, the dimensionality of the emergent space can be studied also by investigating the Euclidean type IIB matrix model. In this thesis a toy model of the Euclidean version of the model which has a rotational symmetry in the 4d space was studied using the complex Langevin approach, which can solve the sign problem. It is shown that the introduction of a deformation parameter in the Dirac operator extends the range of application of the method, which enable an observation of the spontaneous breaking of the $SO(4)$ symmetry. Moreover, it is shown that the result obtained by extrapolating the deformation parameter to zero is consistent with the one obtained by the Gaussian expansion method.

(別紙様式 3)
(Separate Form 3)

博士論文の審査結果の要旨
Summary of the results of the doctoral thesis screening

超弦理論は重力を含む統一理論として、1980年代より素粒子論の重要なテーマとして研究されてきた。特に重力の量子効果が重要となるブラックホールや宇宙の始まりに関する問題を解明するためには、超弦理論の研究が不可欠と考えられている。一方、従来の超弦理論の研究においては、弦の相互作用が弱い場合に有効な摂動論が用いられており、この範囲では時空の次元や宇宙の成り立ちについて無数の可能性がありうるということが知られている。こうした状況を打開すべく、1997年に超弦理論の非摂動的な定式化として提唱されたのが IKKT 行列模型である。

伊藤君は、IKKT 行列模型に関連した数値計算を行い、これまでに 2 編の論文を査読付きの雑誌で発表している。学位論文では、背景となる基礎的な事柄に関するレビューの後、上の 2 編の論文の詳しい内容がまとめられている。特にローレンツ型の模型に関しては、2011年に Kim・西村・土屋が行った数値計算により、(9+1)次元の微視的宇宙から(3+1)次元の膨張宇宙が現れることが知られていたが、伊藤君はこれをさらに発展させ、宇宙の膨張のしかたがどうなるか、という問題について様々な角度から研究を進めてきた。時間発展を長く追うには、行列サイズを大きくする必要があり決して容易ではないが、伊藤君は単純化した 2 つの模型に対して、理研の保有するスーパーコンピュータ「京」などを利用することにより計算を遂行した。その結果、IKKT 行列模型では、初めは宇宙が指数関数的に膨張するが、一定の時間後にベキ則的膨張に転じる可能性が示唆された。これは IKKT 行列模型ないしは超弦理論の研究において重要な成果と言える。

学位論文では上記に加え、国際会議や研究会などで発表された新しい結果についても、詳しく書かれている。上述のローレンツ型の IKKT 行列模型に関しては、模型を定義する際に赤外カットオフが必要となるが、その導入のしかたに関して新しい提案がなされた。これは、行列サイズを無限大にする極限において、人工的に導入された赤外カットオフの効果が消失するかどうか、という重要な問題に関連するものである。また、ユークリッド型の IKKT 行列模型における回転対称性の自発的破れの研究に関連して、モンテカルロ・シミュレーションにおける符号問題が議論された。符号問題は、有限密度 QCD の計算においても現れる重要な問題であるが、最近の研究により、複素ランジュバン法の有用性が明らかになっている。学位論文では、この方法を、単純化した行列模型に適用することによって、回転対称性の破れが自発的に起こることが示された。またこの計算で得られた結果は、改良平均場近似で得られたものとも良く一致しており、符号問題を解決する方法としての複素ランジュバン法に関する新しい知見が得られた。

このように、伊藤君の学位論文は独創的な内容を多く含んでおり、行列模型に基づく超弦理論の非摂動的な研究に関わる多岐の問題が議論されている。関連する 2 編の論文は既に査読付きの雑誌に掲載されているが、それ以外の新しい結果についても、近い将来、論文の形で発表される価値のある内容を含むものである。この学位論文は伊藤君の研究遂行能力の高さを明確に示すものであり、論文審査の結果、合格と判断した。