

学 位 論 文 題 名

Supersymmetric Action of $SL(2;Z)$ -covariant D3-brane
and its k -symmetry($SL(2;Z)$ 共変 D3-ブレーンの超対称な作用と、その k 対称性)

学位論文内容の要旨

超弦理論は自然界の基本的相互作用を統一し、重力の無矛盾な量子論を与えるものと期待されている理論である。超弦理論によって現実的なエネルギー・スケールの世界の現象を説明するには、非摂動的な効果を理解する必要があるのだが、超弦理論は摂動的な定式化しか知られていないため、非摂動的効果を調べることは難しかった。しかし最近になって超弦理論が双対性と呼ばれる性質を持つことが認識されるようになると、非摂動的側面に対する研究は進み始めた。双対性とは、ある力学変数で書き表されている強結合の理論を、別の変数を用いて弱結合の理論に書き換えることができるという性質であり、このような性質を持つ理論では、非摂動的効果が効いてくる強結合理論の振る舞いを摂動的に扱うことのできる弱結合理論の振る舞いから知ることができる。

数学的に無矛盾な超弦理論には 5 つの型が存在する。それらはすべて 10 次元時空で定式化されているもので、摂動的には独立なものと考えられていた。しかし今日ではこれらは互いに双対性で関係していることが分かっている。さらに M 理論と呼ばれる 11 次元の理論が存在し、超弦理論はこの M 理論とも双対性で結び付いている。今やこれらの理論はそれぞれ、より大きな理論の真空の異なる安定点の周りの振る舞いを記述する有効理論であるとみなされるようになるなど、我々の理論全体の枠組みに対する理解は飛躍的に進歩した。

この発展において重要な役割を演じたのが、D-ブレーンと呼ばれる超弦理論のソリトン（非摂動的励起）である。D-ブレーンは様々な次元の広がりを持った（高次元の）膜であり、空間方向の広がりを明示するときは Dp -ブレーンとも記される。D-ブレーンは超対称性の一部について不変であるという、BPS 飽和性と呼ばれる性質を持つ。BPS 飽和であることにより、D-ブレーンの安定性が量子論的にも保証されている。またこのことを用いて、双対性の検証が行われた。

様々な双対性の中でも特に重要なものが、IIB 型の超弦理論の持つ $SL(2;Z)$ 双対性である。これは双対変換により自分自身に移される自己双対性であり、基本弦や D-ブレーンといった IIB 型理論の励起スペクトルに現れる物体は、 $SL(2;Z)$ の何らかの表現に属している。この $SL(2;Z)$ 双対性の起源は、興味

深い問題である。一つの有力な説が、F 理論と呼ばれる 12 次元時空の理論であり、 $SL(2; \mathbf{Z})$ 双対性を幾何学的に説明する。実は現時点において F 理論の満足な定式化といえるものはないのだが、F 理論の基本的な自由度は 3 次元の膜 (3- ブレーン) ではないかというアイデアが提唱されている。このアイデアが妥当であるならば、明白な $SL(2; \mathbf{Z})$ 共変性をもつ D3- ブレーンの作用は F 理論の定式化において重要な役割を果たすことが期待される。

明白な $SL(2; \mathbf{Z})$ 共変性を持つ IIB 型ブレーンの作用は、幾つかのグループによって考えられているが、3- ブレーンより高い次元になると物理的自由度が多くなりすぎるという困難が生ずる。Nurmagambetov は M5- ブレーン (M 理論に現れるソリトン) の作用を手本にして、この困難を解決した。この作用は $SL(2; \mathbf{Z})$ 共変性のほかにも、D3-ブレーンの世界体積上の一般座標変換共変性が明白なことや、(上述の) 必要な自由度の削減を作用原理にもとづいて行っていることなど、望ましい性質を持っているものである。しかしながらこの作用はボソンの作用であり、D- ブレーンの重要な性質である超対称性を持っていないものであった。

本論文で学位申請者は、Nurmagambetov による明白に $SL(2; \mathbf{Z})$ 共変な D3-ブレーンの作用を超対称な作用へ拡張し、この作用が κ 対称性として知られる局所的なフェルミオンの対称性を持つことを示した。 κ 対称性は、ブレーン (広がった物体) の作用が望ましい物理的自由度を持ち、場の理論としても超対称な理論であるために必要な対称性である。

超対称化する際、D3- ブレーンの背景場である IIB 型の 10 次元超重力理論のゲージ対称性: $U(1)$ 対称性が明白になるように、作用の書き換えを行った (Nurmagambetov による元々の作用は、ゲージ固定された作用とみなすことができる)。 κ 対称性の証明では、この $U(1)$ 対称性を利用した。

他の κ 対称性を持つブレーンの作用の場合と同様、背景超重力場の運動方程式は、 κ 対称性が成り立つための十分条件であることが分かった。超弦理論は模型にたいする制限が強く、全体の整合性を破ることなく勝手な自由度を持ち込むことができない理論である。 κ 対称性の証明は、その副産物として、この作用で記述される D3- ブレーンが、矛盾なく理論の枠組みに収まることの一つの非自明な検証を与えるものにもなっている。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	石 川 健 三
副 査	教 授	河 本 昇
副 査	助教授	加 藤 幾 芳
副 査	助教授	中 山 隆 一
副 査	助教授	鈴 木 久 男

学位論文題名

Supersymmetric Action of $SL(2;\mathbb{Z})$ -covariant D3-brane and its k -symmetry

($SL(2;\mathbb{Z})$ 共変 D3-ブレーンの超対称な作用と、その k 対称性)

重力を含む力の統一理論の有力候補として超弦理論が有望視されている。超弦理論は摂動論として取り扱われた時繰り込み可能な理論となっており、その性質は良く理解されてきた。しかしながら、時空の次元が高く、可能な基底状態が多くあり一意でないため現実の世界とどのように対応しているのかについては、未だ未解決のままである。この解決のためには、超弦理論の非摂動論的な性質解明が不可欠である。非摂動論的状态としてソリトン状態である各種のブレーンが超弦理論に存在することが近年わかり、ブレーンについての研究やブレーンを通した非摂動的性質の解明の研究が盛んになってきた。高次元の各種のブレーンのダイナミックスの解析より双対性を初めとする超弦理論の非摂動的性質に関する新しい知見が得られてきた。双対性は様々な一見異なる超弦理論の間の相互の関連を与え、理論の全体像を与えるのに役立ち、また力の統一理論の構成に有益である。しかしながら、ブレーンの力学的性質のすべてがわかっているわけではない。ブレーンが従う作用に基づく記述並びに解析ではじめてこれが可能になる。

本論文で申請者は、Nurmagambetovにより与えられた D3-ブレーンの作用を双対性の一つである $SL(2;\mathbb{Z})$ 変換に対して共変な超対称なものに拡張することに成功した。この作用は非線形の形をし電場や磁場が極めて強い時マクスウエル方程式に代わり運動を決めるボルン-インフェルト型をしている。また $SL(2;\mathbb{Z})$ 変換に対する共変性は超重力理論が持っているものである。引き続き拡張されたこの作用が k 対称性と知られる局所的なフェルミオンの対称性を持つことをしめた。この結果、フェルミオン場の半分が物理的自由度でなくなり、場の理論としての超対称性を持つ性質の良い理論にこの理論がなっていることを意味する。非線型の形をした作用であるため、証明は自明でないいくつかの段階を経ておこなわれた。理論が持つ $U(1)$ 対称性が使われ、また極めて複雑な射影演算子の存在証明がまずなされた。ここでとりあげた演算子が射影演算子であることは全く自明ではなく、長い演算を経て申請者はこの証明に達したものであり、この証明自身意義がある。さらに射影演算子の固有値の値から状態が分類され、状態の半分が物理状態ではなく、その結果理論の k 不変性が成立することが示された。よって得られた理論は k 不変性のため物理的要請を満たすことが明らかになった。これらの成果が、D3-ブレーンの様々な力学的性質の解明や超弦理論並びに力の統一理論に対する新しい理解への道を開くものと期待される。

これを要するに、著者は重力を含む力の統一理論として有望視されている超弦理論の非摂動論的状态であるブレーンの一つである D3-ブレーンの超対称な作用を構成すると共に作用が k 対称性を持つことを証明した。これは、超弦理論の非摂動論的性質の理解に貢献すると共に素粒子物理学の理解に貢献するものである。

よって著者が北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格あるものと認める。