

氏 名 樋 垣 徹 太 郎
 学位(専攻分野) 博 士 (理 学)
 学位記番号 理 博 第 2987 号
 学位授与の日付 平 成 18 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 Moduli Stabilization and its Applications to Phenomenology
 (モジュライ場の安定化と現象論への応用)

論文調査委員 (主 査)
 教 授 川 合 光 教 授 植 松 恒 夫 教 授 畑 浩 之

論 文 内 容 の 要 旨

素粒子理論における標準模型は数々の実験的事実を精密に説明できるが、不満な点がある。例えば、ゲージ結合定数や湯川結合定数といったパラメータの存在である。標準模型の範囲内では、その起源や実験値(湯川結合定数の階層性等)を説明することは出来ない。一方で超弦理論は(連続)パラメータを持たず、この事を説明できる可能性がある。具体的には、超弦理論は我々の住む4次元時空部分だけでなく6次元の余剰次元空間の存在を示唆する。そしてその余剰次元の体積や形は、「モジュライ場」と呼ばれる場の期待値として与えられ、先に述べた結合定数を決める。即ち、モジュライ場の期待値を決定することが、標準模型の結合定数を決定する事になる。そしてもう1つ現象論的に重要な点は、モジュライ場の期待値はプランクスケールで測って1よりも大きい事が適当なので、超対称性の破れの主な起源になる事である。これらにより、本論文ではモジュライ場の関係する事に焦点を当てた。

モジュライ場は超弦理論の持つ高い対称性のために、ポテンシャルを持つ事が難しく、期待値を決められない。しかし近年の研究により、理論にD-braneを含むような場合(フラックスコンパクト化)、一部のモジュライが安定化されうることが知られている。しかしながら、すべてのモジュライ場が固定されるわけではなく、残りのモジュライ場は低エネルギーでのインスタントン効果(ゲージノ凝縮等)によって安定化されうる。

そこで申請者は、一部のモジュライ場はフラックスコンパクト化によって安定化されたことを仮定し、低エネルギーでのモジュライ場の安定化の機構に対して注目した。余剰次元に存在する特異点の曲率半径を表すようなモジュライ(ツイステッドモジュライ)の場合、そのケーラーポテンシャルのために安定化しやすいことを示した。また磁場の入ったD-braneが存在する場合、その上でのインスタントン効果が体積モジュライを固定するだけでなく、超対称性の破れの効果が、磁場のために豊富な構造を持つことを示した。またこの場合、体積モジュライの初期値によらずに安定化が起こり、高温でも不安定にならない事を示唆した。

次に、申請者は上記のツイステッドモジュライが超対称性の破れに与える影響について調べた。このモジュライの期待値は、アノマラスU(1)が存在する場合、Fayet-Iliopoulos項(D項)に寄与する。そして物質場のアノマラスU(1)電荷に比例したフレーバーを破る効果を、スカラーフェルミオンの質量に与える。しかし、このモジュライのケーラーポテンシャルの形のおかげで、その効果は小さくなりうることを示唆した。しかしながら、アノマラスU(1)ゲージノからスカラー質量への輻射補正の効果が存在する。それによるフレーバーを破る効果を抑制する事は、電荷が縮退していない限り難しい事を示した。

また申請者は、交差したD-braneモデルにおける結合選択則について議論した。(これは上記の磁場の入ったD-braneのT-双対な描像である。)このモデルでは交差点ごとに物質が局在し、余剰次元方向に対して離れている場合には、抑制された相互作用をする。このため、体積モジュライによった階層性のある(湯川)結合を実現することが可能である。論文では背景の余剰次元がトーラスの場合、選択則は離散的なフレーバー対称性として理解できることを示した。そして様々なパター

ンを調べることにより、モジュライの値によらず tree level では現実的な湯川結合を導くのは難しいことを示した。

このようにモジュライの安定化とそれが関係する現象論について超弦理論の立場（対称性）から議論した。特にフレーバー構造に注目した場合、世代構造は単純なコピーでない可能性を示した。

論文審査の結果の要旨

超弦理論におけるモジュライ場は、6次元の余剰次元空間の自由度（体積や形）を表す場である。この場は「標準模型の結合定数を決める」という現象論的に重要な意味を持つだけでなく、「超弦理論の真空を特徴付ける」ものである。即ち、それらの場の期待値を決めるということは、摂動論的には無数に縮退している超弦理論の真空の縮退を解く為に必要な作業である。しかしながら、現段階では超弦理論の真空（適当な模型）の選び方にはこれといった指導原理は無い。それゆえ申請論文では超弦理論を基にした超対称模型を用い、モジュライ場が関係する物理について、どのような予想や予言が得られるか取り組んだものである。

まず申請者は D-brane が存在する場合にモジュライの期待値の決定機構を議論し、標準模型のゲージ結合定数がどのような値をとりうるか示している。特に磁場の入った D-brane 上でゲージノ凝縮が起こる場合、磁場の効果のおかげで、モジュライの初期値や宇宙の再加熱温度によらず、現象論的に好ましい値に安定化しうることを示唆した。

またこの模型では、磁場の効果によって超対称性の破れの効果が豊富な構造を持つ。特に、モジュライメディエーションと同時に、アノマリーメディエーションを考慮すれば、興味深いパターンの超対称性の破れの効果を生む可能性がある。例えば超対称標準模型におけるゲージノの質量や、スカラーフェルミオンの質量がほぼ縮退する等の事が予想できる。これはフレーバー問題に対していい性質であり、興味深い模型となっている。

以上の模型はアノマラス U(1) 対称性が無い場合であるが、申請論文ではそれが存在する場合も考えている。この場合、新たに超対称性の破れの効果が加わる。その効果は一般的に物質場のアノマラス U(1) 電荷に比例しているので、スカラー粒子のフレーバー問題にとっては、物質場のアノマラス U(1) 電荷は縮退している方が良いことが帰結される。この意味で模型は制限されうることを示した。

また超対称性の破れの効果だけではなく、交差した D-brane 模型において、モジュライに依存した湯川結合定数について議論している。これは上記の磁場の入った D-brane 模型と等価なものである。この模型では交差点ごとに物質が局在するので、抑制された相互作用をする可能性がある。それゆえ、階層性のある湯川結合を実現することが可能な興味深い模型となっている。申請者はまず、一般的な n 点の結合選択則を調べた。結果としてその選択則は、局在化した位置に対応する離散的なフレーバー対称性として理解できることを示した。そこから具体的に、3世代の物質がコピーであることを仮定してフレーバー構造を種々の場合に調べた。この場合、tree level ではモジュライの値に関係なく、現実的な湯川3点結合を得ることが難しいことを示した。これは3世代の構造は単純なコピーとしては理解できない可能性を示唆している。

申請者はこのように超対称性の破れの効果や、フレーバー構造を手がかりに、現実的な弦模型を導き出す可能性を調べた。またそれだけではなく、将来の実験で観測されうる興味深い予想を与えている。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、論文内容とそれに関連した事項について口頭試問を行った結果、合格と認めた。