

氏 名 松本 良雄

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1823 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 Possibility for construction of realistic 6D gauge-Higgs
unification models

論文審査委員 主 査 教授 北野 龍一郎
助教 阪村 豊
教授 磯 暁
教授 野尻 美保子
准教授 丸 信人 大阪市立大学

論文内容の要旨
Summary of thesis contents

Gauge-Higgs unification models are studied as candidates for new physics beyond the standard model, which give interesting suggestions about the origin of the Higgs field. In these models, extra components of higher dimensional gauge fields are identified as Higgs fields so that higher dimensional gauge symmetry protects the Higgs mass against quantum corrections. In the thesis, 6-dimensional (6D) gauge-Higgs unification models especially are researched.

First, the gauge-Higgs unification models with the simplest SU(3) model in 5D flat metric or warped metric are reviewed, and the 4D effective gauge couplings and Yukawa couplings from the 5D gauge interaction are evaluated. The effective Higgs potential and the Higgs mass are also mentioned, which are induced by dynamical EW symmetry breaking with the Wilson line phase.

Second, the 6D gauge-Higgs unification models whose gauge groups have custodial symmetry (and Left-Right symmetry) are searched, in order to avoid the deviations of ρ parameter and $Zb_L b_L$ coupling from the standard model, caused by the mixing effect with the Kaluza-Klein modes, and that have at least one zero-mode Higgs (SU(2)_L × SU(2)_R) bi-doublet. Besides, restrictions are given on representations that the 3rd generation quarks are embedded into in such a way that bi-doublet Higgs VEVs are aligned to preserve custodial symmetry. An appropriate charge assignment and a group factor of a large representation give desired Yukawa couplings, and the top Yukawa coupling is estimated as about 160 GeV. It is found that the most realistic candidate is 6D SU(3)_C × U(4) gauge theory on T²/Z₃ and the 3rd generation quarks are embedded into SU(4) 20' bulk fermion. The Higgs mass is calculated at 113 GeV from the Higgs potential at one-loop level, and the result may be explained by quantum corrections.

Third, it is discussed whether we can realize the generations of matter fields and the hierarchical structure of Yukawa couplings in 6D gauge-Higgs unification models. In gauge-Higgs unification, the Yukawa couplings become flavor-universal with the flat profile of the zero-mode wave functions of the fields that are relevant to the Yukawa interactions. One concrete way to avoid such a situation is to change the values of the overlap integrals of the Yukawa couplings by localizing the zero-mode wave functions at the extra dimensions. Constant magnetic fluxes are introduced penetrating compact space as backgrounds of gauge field strengths. In this case, the zero-mode wavefunctions of fields feeling the magnetic fluxes become Jacobi-theta functions. Positions for each wavefunctions depend on the constant parts of background gauge fields, which is called the “Wilson-line phases”, and they can be absorbed into the “Scherk-Schwarz phases”. The possible values of them are discretized and restricted by orbifolds and values of magnetic fluxes. Zero-modes of fields feeling the magnetic fluxes degenerate depending on values of fluxes and Z_N twist phases of orbifold wavefunctions. This degeneration can be regarded as an

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

origin of matter generations.

The author focused on a $SU(3) \times U(1)$ model with two $3 + \bar{3}$ fermions of $SU(3)$ as a specific example. It is found that the top Yukawa coupling can be realized without a group factor of a large representation of the bulk fermion that the top quark is embedded into, and the three generation of fermions that appear in the standard model can be realized only when $N=3$. However, It is also found difficult to realize other Yukawa couplings because of the complicated structure of the wave- functions on T^2/Z_3 . Besides, at least 5 Higgs doublets appear in the three generation case. The Yukawa couplings are calculated in the case with one-Higgs doublet, and it is concluded that they are often too large to realize the Yukawa couplings except for the top Yukawa coupling.

Finally, a possibility of building realistic 6D gauge-Higgs unification models is summarized and future prospects are mentioned.

(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

LHC でヒッグス粒子が発見された現在、標準模型を超える新物理を特定することは素粒子物理学の最重要課題の1つである。新物理の候補としてはこれまでに様々な理論が提唱されている。松本氏の研究対象であるゲージヒッグス統合模型もその1つであり、ヒッグス場を高次元ゲージ場の余剰次元成分と同一し、理論にスカラー場を導入することなく電弱対称性を破ることのできる模型として興味深いものである。このような模型の内最も簡単なものは5次元ゲージ理論に基づくものであり、これまでに様々な模型が提唱されてそれらの定性的、定量的性質が詳細に調べられている。これに対して、余剰次元が2次元以上の場合についてはそこまで詳細には調べられておらず、十分な理解がなされていない点が多く残されている。この場合の特徴として、ヒッグス場がツリーレベルで4次の自己相互作用を持つ為、観測されているヒッグスの質量値を容易に実現することが可能という利点がある。また、時空が偶数次元の場合には余剰空間を貫く背景磁束を導入することが出来、これによりクォーク、レプトンの世代数を導出できる可能性があって興味深い。本学位論文で松本氏は6次元ゲージヒッグス統合模型に着目し、現実的な模型の構築可能性について調べた。解析は一般のゲージ群を扱えるように群論の手法を用いて行われ、現実的な模型を構成する為の必要条件を導出した。本研究で得られた結果は6次元ゲージヒッグス統合模型の模型構築に強い制限を与え、今後の新物理探索に有用な情報を与えるものである。

本論文の構成は次のようになっている。まず1章でヒッグスセクターの物理に関する簡単なレビューと共にゲージヒッグス統合模型の特徴を説明した後、2章で代表的なゲージヒッグス統合模型を紹介している。レビューは本研究の効率的な導入になっており、模型の特徴が要領よくまとめられている。3章ではカストディアル対称性を持った模型に着目して現実的な模型の満たすべき条件を抽出し、群論的手法を用いて可能なゲージ群、余剰次元空間及び物質場の表現を選別した。その結果、 T^2/Z_3 オービフォールド上にコンパクト化された $U(4)$ ゲージ理論が最も簡単な候補であり、第3世代のクォーク場は $SO(6)$ の2階対称テンソルで記述される20次元表現に属するべきであることが分かった。4章では余剰空間を貫く背景磁束を導入し、4次元有効理論に現れる湯川結合定数について議論した。特に具体的な模型として4つのワイルフェルミオンを持つ $U(3)$ ゲージ理論を考え、3世代のクォーク、レプトンがゼロモードとして現れるような磁束の取り方を同一し、その場合に有効湯川結合定数がとり得る値を数値的に求めた。更に、ヒッグス2重項が1つのみ有効理論に現れるような磁束の取り方に対しても、同様に可能な湯川結合定数の値を評価した。その結果、いずれの場合でも磁束の効果のみでは湯川結合の階層的構造を実現することはできないことが判明した。これは磁束を導入しない場合においても存在する問題で、6次元ゲージヒッグス統合模型が抱える共通の課題である。一方で磁束によって余剰次元方向の波動関数に変形を受ける効果により、クォークをゲージ群の大きい表現に埋め込むことなくトップクォーク質量を実現できることも示した。

3章で述べられた研究成果は既に *Journal of High Energy Physics* 誌に出版されており、4章の結果も出版に値するものと認められる。これらの成果を関連する先行研究と共に纏め上げた本論文は、博士論文として十分な学術的意義とオリジナリティーを持ったものと認められ、松本氏の学識と研究能力が博士の学位に相応なものであることを示している。よって、論文審査において合格と判定した。