

# 学位論文内容の要旨

学位論文題目 Theoretical Studies on Higgs Physics  
in Extra Dimension Models

(余剰次元モデルにおけるヒッグス物理の理論的研究)

新エネルギー科学専攻

氏名 鈴木 慎

素粒子標準理論 (SM) は電弱スケール以下の有効理論として確立したものの、宇宙のバリオン数非対称性、暗黒物質の存在、インフレーション、ニュートリノ振動など SM を超える諸現象もまた観測されている。また SM は階層性問題などの理論的問題も抱えている。これらの問題は SM がまだ完全な理論ではなく改善すべきであることを示している。一方で CERN の LHC 実験によって質量 125 GeV のヒッグス粒子が発見され、その結合が SM の予言と無矛盾であることが観測されたものの、ヒッグスセクターには指導原理の存在、ヒッグス粒子の数、ポテンシャルの形状など多くの謎が残されている。これらの謎はヒッグスセクターにはまだ拡張の余地があることを示唆している。そしてこれらの謎は計画中の加速器実験や重力は実験によって徐々に明かされていくと期待されている。そのため、ヒッグスセクターを拡張することで SM の様々な問題にアプローチする研究が盛んに行われている。

本論文では、ヒッグスセクターの拡張として、余剰次元に注目する。一般に私たちは、3次元空間+1次元時間からなる4次元の時空を認識している。余剰次元とはそうした4次元時空に加えて隠れた次元が存在するというアイデアである。この考え方は弦理論、Randall-Sundrum モデルおよびユニバーサル余剰次元模型など様々な理論で導入されている。このアイデアを導入することで、余剰次元の幾何という新しい構造が理論に加わり、私たちはその恩恵を様々な形で受けることができる。例えば、相互作用の強さを

制御したり、SMに現れる様々な階層性を解決したり、場や力を統一することができる。現象学的な観点から、私たちは実験的に検証可能な TeV スケールの余剰次元に興味がある。

まず、平坦な余剰次元を持つゲージ・ヒッグス統一モデル (GHU) について議論する。このモデルは SM を超える TeV スケールのパラダイムの一つであり、ヒッグスをゲージ場の余剰次元成分に埋め込むことで階層性問題を解決している。また高次元ゲージ対称性のために GHU のヒッグスポテンシャルはツリーレベルで平坦であり、量子効果によって形成される。私たちはこのヒッグスポテンシャルの SM との構造の違いに着目しヒッグス 3 点結合を解析した。具体的なモデルとして 5 次元ローレンツ対称性が緩和された SU(3)モデルを考える。この場合、コンパクト化スケールが実験的な下限である 5 TeV より大きいところでヒッグス 3 点結合の SM からのズレが 10%以下になることを示した。また、真空周りのヒッグスポテンシャルの形状は、コンパクトスケールの増加につれて SM ポテンシャルの形状に急速に近づくことも明らかにした。さらに、この挙動は平坦な余剰次元を持つ他の GHU モデルにも適用できることを指摘した。

次に、余剰次元を導入したヒッグス 2 重項が 2 つ存在するモデル (2HDM) についても議論する。2HDM は SM の単純な拡張の 1 つで、追加のヒッグス二重項を 1 つ加えるだけでありながら、SM にはない豊かな現象論的特徴を持っている。一般に、2 つ以上のヒッグス二重項を導入すると、湯川相互作用行列と質量行列が同時に対角化されず、実験的に許容できない程のフレーバーを変える中性カレント (FCNC) が現れる。これを避けるために、2HDM では通常、 $Z_2$ 対称性を課してフェルミオンをヒッグスの 2 重項のうち 1 つだけと結合させる。しかし、この $Z_2$ 対称性は、2HDM の枠組みでは正当化できず、その起源は何らかのパラダイムに委ねられている。そこで私たちは余剰次元を用いることで $Z_2$ 対称性を課すこと無く 2HDM のヒッグス結合を再現するようなモデルを提案した。キルク場との結合を導入することで、フェルミオンやスカラー場が余剰空間上に局在化することが先行研究によって知られている。この機構を用いて私たちは右巻きフェルミオンとヒッグス二重項を余剰空間上に局在させ、2 つのヒッグス二重項との結合のうち 1 つだけが余剰次元の積分によって抑制される配置を構築した。それによって $Z_2$ 対称性を課すこと無く危険な FCNC を回避可能であることを示した。この時  $Z_2$  パリティによる 2HDM の 4 つのタイプへの分類はキルク結合の割り当てに対応している。またこのモデルは通常の 2HDM と異なり  $Z_2$  対称性によってヒッグスポテンシャルが制限されないという特徴を持つことを提示した。

## 【審査結果の要旨】

本審査委員会の審査委員全員は学位申請論文を精査し、本審査会（兼学位論文公聴会）を2022年2月4日に開催した。公聴会では申請者は学位論文の内容に関して資料を用いたプレゼンテーションを行い、審査委員全員はこれに対し核心に迫る詳細な質疑を行った。申請者の学位論文には十分な独創性、新規性および学術的意義があることについて異議はなく、また、申請者には深い専門知識と十分なプレゼンテーション能力があることも認められた。以上のことに基づいて審査委員全員で審議した結果、申請者は博士（理学）として十分な主体性、発想力、専門知識、将来性を併せ持つとの判断に至り、博士學位論文審査および最終試験共に合格と判定した。

本博士論文の主題は、素粒子物理学分野における重要な未解明問題の一つであるヒッグス粒子の性質を、余剰次元モデルと呼ばれる理論モデルの枠組みで論じたものである。2012年に大型ハドロン衝突型加速器において素粒子に質量を与えるヒッグス粒子が発見され、素粒子物理学の標準理論は一応の完成を見た。しかしながら、ヒッグス粒子と標準理論粒子との結合定数の測定精度は向上しているものの、未だ誤差が大きく、発見されたヒッグス粒子が標準理論の予言する通りのヒッグス粒子なのか、拡張されたヒッグスセクターを持つモデルにある複数のヒッグス粒子の一つなのか解明できていない。また、ヒッグス粒子の3点結合定数に対しては意味のある制限が得られていない。このようなヒッグス粒子の性質は、今後の高輝度大型ハドロン衝突型加速器実験や、計画中の国際リニアコライダー実験(ILC)等のヒッグスファクトリーにおいて、詳細に検証可能であるため、申請者の研究は、標準理論を超える新物理理論の方向性の決定に欠かすことはできない。

本博士論文では、まず第1章で研究背景を説明した後、第2章で標準理論、第3章で拡張ヒッグスモデル、第4章で余剰次元モデルに関する先行研究についてまとめている。第5章で、余剰次元モデルの一つであるゲージヒッグス模型においてヒッグスポテンシャルとヒッグス3点結合定数の詳細な計算を行っている。ゲージヒッグス模型においてヒッグス3点結合定数の標準理論からのずれが極めて小さくなることを一般に示したのは申請者が初めてであり、ILCで測定可能な程度のずれが観測された場合には、さらなる模型の拡張が必要なことを示唆している。一般のヒッグス2重項モデルでは素粒子の種類（フレーバー）が変化する反応の起こる確率が大きくなり実験結果と整合させるのに調整が必要となるが、本論文で考察したモデルでは余剰次元における場の局在化の機構を用いて抑制可能であることを第6章で示している。このような素粒子反応を抑制するため通常は対称性を用いるが、場の局在化機構を用いたのも申請者が初めてである。対称性を用いた場合とは異なるヒッグスポテンシャルが実現されることも示されている。第7章で総括し、研究に用いた計算の詳細は3章にわたる補遺で紹介されている。このような余剰次元モデルにおけるヒッグス物理の研究は、今後のヒッグスファクトリー実現に向けて盛んに研究が行われている当該分野に大きな寄与を与えている。

申請者はこれらの成果をまとめて、1報の査読付き論文を欧州の一流の学術誌で発表している。また、国際会議で2回発表を行った。当該論文での全ての解析計算および数値計算は申請者が行ったもので、申請者の寄与が最も大きいのは言を俟たない。

以上により、慎重に審査を行った結果、審査委員全員の一致により、上記のように合格の判定となった。