

博士論文の要旨及び審査結果の要旨

氏名 角田 拓也
 学位 博士 (理学)
 学位記番号 新大院博 (理) 第 378 号
 学位授与の日付 平成 26 年 3 月 24 日
 学位授与の要件 学位規則第 4 条第 1 項該当
 博士論文名 Electroweak phenomenology in standard model and extra dimensions
 (標準模型を超える余剰次元模型における電弱現象論)

論文審査委員 主査 教授・谷本 盛光
 副査 教授・大原 謙一
 副査 教授・小池 裕司
 副査 准教授・中野 博章
 副査 准教授・浅賀 岳彦
 副査 准教授・尾田 欣也 (大阪大学理学研究科)

博士論文の要旨

100 GeV 程度以下の低エネルギー領域における素粒子現象は, $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ をゲージ群とする標準模型によって非常に精度良く記述できることが現在までに確立している。しかしながら, 電弱対称性の自発的破れを記述するヒッグス場のポテンシャルを理論的に制御する指導原理を欠いていること, 暗黒物質を説明できる候補を含まないことなどから, 標準模型の背後にはより基本的な理論が存在し, 標準模型をその基礎理論の低エネルギー有効理論とみなすのが自然である。普遍的余剰次元模型 (Universal Extra Dimensions, UED 模型) は, 余剰次元方向の振動モード (カルーツァ・クラインモード, KK モード) が暗黒物質の候補となりえることから注目されている。

本論文では, 標準模型を超える模型として六次元 UED 模型を取り上げ, 電弱相互作用の現象論に及ぼす効果を考察している。UED 模型は, 標準模型のすべての場が余剰次元内に局在化することなく伝播するもので, 標準模型のすべての粒子が KK モードを持ち, そのうち最も軽いものが暗黒物質の候補となる。本論文では, 電弱余剰次元模型の四次元有効理論の紫外切断スケールを真空安定性から決定し, その切断スケール以下の KK モードのみを取り入れて, 電弱現象論を展開している。電弱現象論としては, KK モードがヒッグス粒子の生成過程および崩壊過程に及ぼす影響, および, KK モードが電弱精密測定に関する物理量 (S および T パラメータ) に及ぼす影響を取り上げ, これを精査した結果を最新の実験データと比較することが本論文の主要な目的である。

一般に, ヒッグス自己結合定数に対するくりこみ群方程式を解くと, トップ湯川相互作用による量子効果のためヒッグスポテンシャルが高エネルギー領域で負になり, 標準模型の真空が不安定になる問題が知られている。本論文においては, 紫外切断スケール以下の KK モードを含む四次元有効理論において, 1 ループ近似のくりこみ群方程式の範囲で真空不安定性が起こらないための条件から, 切断スケールの上限を決定している。結果として, 余剰次元のコンパクト化のスケール (KK スケール) の数倍以内に切断スケールをとる必要があるとの結果を得ている。

本論文で取り扱っている余剰次元は、時空次元が6の場合、つまり、通常の3+1次元時空に加えてコンパクト化された余剰次元が2次元の場合である。余剰次元のトポロジーとしては、比較のため五次元の極小模型も扱っている他、二次元トーラスのオビフォルド空間 T^2/Z_2 , $T^2/Z_2 \times Z_2$, T^2/Z_4 , 二次元球面 S^2 およびそのオビフォルド S^2/Z_2 , および向き付け不可能な射影球面 PS^2 と実射影空間 RP^2 の合計7種にわたり、それらに対して系統的・網羅的解析を与えている。これら模型の違いはコンパクト化のスケールに現れるKKモードの質量スペクトルの違いとして現れるものである。

本論文の後半では、それらの各種UED模型のそれぞれに対して、真空安定性から得られた切断スケール以下のKKモードがヒッグス粒子の生成および崩壊過程に与える影響、および、電弱パラメータ(SおよびTパラメータ)に及ぼす影響を精査している。その結果、ヒッグスの信号強度から得られる質量スケールの下限として、五次元UED模型に対して650GeV、各種六次元模型に対して800GeVから1,400GeVを得ている。一方、電弱パラメータから得られる下限としては、五次元模型に対して700GeV、各種六次元模型に対して900GeVから1,500GeVを得ている。現状の実験データからは、後者が若干厳しい制限を与えることが判明したが、今後ヒッグス粒子の崩壊過程が精密に検証されていくについて前者の制限が重要になってくると考えられる。

審査結果の要旨

一昨年のヒッグス粒子の発見により、素粒子標準模型は一応の完成を見たが、暗黒物質など標準模型では説明の出来ない現象の存在により、標準模型を超える理論的試みが精力的に研究されてきた。中でも、普遍的余剰次元模型は、余剰次元方向の振動モード(カルーツァ・クラインモード)が暗黒物質の候補となりえることから注目されている。

本論文の前半では、くりこみ群方程式や有効ポテンシャルなどの解析方法を踏まえて、素粒子標準模型のヒッグスセクタを概観し、真空安定性の問題、ヒッグス粒子の生成・崩壊過程や信号強度、および電弱精密測定に関する物理量などが要領よく説明されている。

後半では、余剰次元模型、特に普遍的余剰次元(UED)模型の概要を簡潔にまとめた後、六次元UED模型の四次元有効理論とその電弱現象論の詳細を述べている。まずKKモードを取り入れたくりこみ群方程式を用いた真空安定性の解析から、四次元有効理論の紫外切断スケールを決定している。一般にKKモードは無数に存在するため、その物理的効果の定量的解析のためにはKKモードの和の取り扱い方法が重要になるが、本論文の着眼点は、ヒッグスポテンシャルの安定性(真空安定性)の要請からKKモード和の上限を決定するというものである。比較のために五次元UED模型、7種類の六次元UED模型が系統的に調べられ、結果として、ヒッグス粒子の質量126GeVに対応する初期条件を用いると、切断スケールがコンパクト化の質量スケールの数倍以内になければならないという結果を得ている。さらにその結果を踏まえて、切断スケール以下のKKモードがヒッグス粒子の信号強度や電弱パラメータに及ぼす影響を解析した結果がまとめられている。KKモードが軽い場合、ヒッグス粒子の二光子崩壊過程の信号強度が標準模型に比べて増幅されえること、電弱パラメータからの制限を考慮するとKKモードの質量スケールに比較的厳しい下限が得られることなどが主要な結論として与えられている。本論文で得られた知見、特に、ヒッグス粒子の生成崩壊過程に関する結果は、今後、測定精度が上がるにつれて検証が進むと考えられる。

以上によって、本論文は博士(理学)の博士論文として十分であると認定した。