

氏 名 久保田 浩永

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1751 号

学位授与の日付 平成27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 Phenomenology of Higgs sector of BSM theories at the LHC
and ILC

論文審査委員 主 査 教授 橋本 省二
教授 野尻 美保子
教授 北野 龍一郎
教授 磯 暁
准教授 郡 和範
助教 遠藤 基 東京大学大学院

論文内容の要旨
Summary of thesis contents

素粒子の標準模型は非常に精密にテストされ、これまでのところ実験データとの深刻な不一致は見つかっていない。一方で、標準模型にはいくつかの問題点がある。その一つはヒッグスセクターの微調整問題であり、もう一つはフェルミオンの質量階層性の問題である。これらの問題は TeV スケールに新しい相互作用と新粒子が存在することを示唆しており、このことが標準模型を超える物理 (BSM) を探る動機になっている。

多くの場合、BSM は新粒子を预言する。超対称粒子や余次元模型の KK 粒子、強結合理論における共鳴状態などがその例である。これらが見つかれば新物理の証拠となるが、見つからない場合でもヒッグスセクターの標準模型の预言からのずれも新物理を探るプローブとなりうる。HL-LHC, ILC, TLEP などの将来の加速器実験ではヒッグス粒子の結合定数は 1% 以下の精度で測られると期待される。これらの背景から、この論文では、ヒッグスセクターの加速器実験での現象論を検討する。

いくつかある BSM のシナリオのうち、この研究では Randall-Sundrum (RS) 模型と複合ヒッグス模型を取り上げる。RS 模型は AdS 幾何学に従う 5 次元目の次元を仮定する。ヒッグスセクターの微調整問題は、プランクスケールから TeV スケールに至るワープ係数による抑制効果で説明される。フェルミオンとゲージ場は 5 次元方向に伝搬するが、そのうち 5 次元方向のゼロモードが標準模型の粒子に対応し、その他は KK 粒子に対応する。質量階層性は 5 次元方向の波動関数の形で決まることになる。RS 模型のヒッグスセクターでは、5 次元方向のサイズの揺らぎがラディオと呼ばれる新たなスカラー粒子をもたらす。この粒子はヒッグス粒子と混合し、さらに KK 粒子の寄与もヒッグス粒子の結合定数に影響を与える。

複合ヒッグス系においては、新しい大域的対称性を持つ強結合場が導入される。それらをもたらすフェルミオンおよびボソンの共鳴状態が期待されるが、その性質は大域的対称性の表現による。標準模型のフェルミオン質量はこれらの強結合場との混合によって与えられる。ヒッグス粒子は大域的対称性の破れにともなう疑似ゴールドストーンボソンと解釈され、ヒッグスセクターの微調整問題は解決される。この模型でもヒッグスセクターの結合定数に顕著な影響が見られる。

この研究では、これらの模型がヒッグス粒子の結合定数に与える影響を評価し、将来の精密加速器実験で測定可能かどうか検討した。その結果、ILC では 10 TeV よりも高い KK スケールでも検証可能であることがわかった。また、模型の分別の可能性についても議論した。

Summary of the results of the doctoral thesis screening

久保田氏の学位論文は、標準模型を越える物理として、ヒッグス粒子の階層性問題の解として特に真剣に検討されている **Randall-Sundrum (RS)** 模型と **Minimal Composite Higgs (MCH)** 模型を取りあげ、それらが予言するヒッグス粒子の崩壊振幅の標準模型からのずれを解析したものである。ヒッグスセクターにおけるずれは、**ILC** などの将来の電子陽電子衝突実験において極めて精密に測定することが可能である一方、電弱相互作用の精密測定や **13 TeV LHC**、**HL-LHC** における新粒子の探索によって、模型そのものが大きく制限されると期待される。本論文においては、これらの制限を考慮した上で、**ILC** の他の測定に対する優位性がどの程度あるかを検討している。

RS 模型において特徴的なのは、余剰次元の 5 次元方向の振動に対応する **radion** とよばれる粒子の存在である。この粒子の相互作用はヒッグス粒子と似ているが、グルーオンや光子と直接結合するため、これらの粒子に崩壊しやすい。また、ヒッグス粒子と同じスピンをもつため、ヒッグス粒子と混合する。ゲージ粒子や物質粒子は 5 次元空間に広がり、ヒッグス粒子は赤外(**IR**)プレーンに局在する。質量の重いトップ・クォーク、重い **Kaluza-Klein (KK)** モードも **IR** プレーンに偏った波動関数を持ち、ヒッグス粒子との結合が大きい傾向にあるため、ヒッグス粒子が 2 つのグルーオンや光子に崩壊するプロセスは大きな補正を受ける。**KK** モードの質量はフレーバー物理の制限から **10 TeV** 以上に制限されて **LHC** での直接探索は不可能だが、**radion** 粒子の質量は低いままであってもよい。久保田氏はヒッグス粒子崩壊に対する **radion** 混合と **KK** の輻射補正の寄与から **RS** 模型の兆候を探知できるのではないかと着想し、詳細な計算を行った。その結果、**KK** モードの質量が **50 TeV** 程度であってもヒッグス粒子の崩壊に測定可能な兆候が現れ、**10 TeV** 程度であれば、**radion-higgs** 混合と **KK** の寄与を独立に決定できることを明らかにした。

MCH 模型は、高いスケールでグローバル対称性が **SO(5)** から **SO(4)** に壊れる際にあらわれる **PNG (Pseudo-Nambu-Goldstone boson)** をヒッグス粒子と解釈する模型である。この模型は、**AdS/CFT** 対応においては 5 次元の理論(**RS** 模型)とある極限で対応している。トップやボトム・クォークなどの重い粒子は直接 **PNG** とは結合せず、**composite sector** にあるトップ・クォークのパートナーとの結合を通してのみヒッグス粒子と結合するため、ヒッグス粒子の崩壊には、ヒッグス粒子が **PNG** 粒子であることからくる波動関数の補正以外に、クォークと混合する複合粒子による輻射補正や混合効果があらわれる。久保田氏は、**composite sector** が **SO(5)** の 5 表現あるいは 10 表現に属し、ボトム・クォークの質量も **composite** との混合によって説明する模型を新たに構築し、複合粒子が **4 TeV** 程度にあればその補正が **ILC** で測定可能であること、また、**HL-LHC** にくらべて、将来の **ILC** が多くのパラメータを探索できることを明らかにした。

久保田氏の博士論文は、過去の文献や理論の背景についての詳細なレビューの後に、オリジナルな結果を報告している。**RS** 模型についての結果はすでに **Physical Review D** 誌に 2 報出版されており、**MCH** 模型に関する結果も出版に値するものと認められる。関係するこれらの模型を取り上げて解析した本論文は、博士論文として新たな知見を十分に含むものと認め、論文審査において合格と判定した。