

氏 名	まちだ なおき 町田 尚基
学 位 の 種 類	博 士 (理学)
学 位 記 番 号	富理工博甲第 100 号
学位授与年月日	平成 28 年 3 月 23 日
専 攻 名	理工学教育部 (新エネルギー科学専攻)
学位授与の要件	富山大学学位規則第 3 条第 3 項該当
学位論文題目	Theoretical Studies on New Physics behind the Higgs Sector (ヒッグスセクター背後の新物理学に関する理論的研究)
論文審査委員 (主査)	松島 房和 兼村 晋哉 栗本 猛 小林 かおり 飯田 敏

## 博士論文要旨

富山大学大学院 理工学教育部 新エネルギー科学専攻

町田 尚基

2012 年、欧州原子核研究機構（CERN）の大型ハドロン衝突型加速器（LHC）において新しいボソン粒子が発見された。この新粒子の質量は  $126\text{GeV}$  かつスピンが 0 であることから、スカラー粒子であると確認された。さらに、標準模型の粒子との結合定数も測定され、それらは標準模型ヒッグス粒子の予言と非常によく一致していた。これらの結果から、標準模型は確立されたといえる。現在までのところ LHC などの加速器実験において、さらなる新粒子はいまだ発見されていない。

一方、宇宙観測実験などから標準模型の枠組みでは説明できない現象が観測されている。暗黒物質の存在、ニュートリノ振動、宇宙の物質反物質非対称問題などである。これらの現象を説明するためには、標準模型は拡張されなければならない。

また、理論的な問題として階層性問題が知られている。ヒッグス粒子はスカラー粒子であるために、その質量に対する輻射補正を計算すると二次発散が現れる。この問題を解決する非常に有望なシナリオとして考えられているものの一つが超対称理論である。この類のシナリオでは新たに導入される超対称粒子の効果で二次発散が打ち消された結果、階層性問題は解決される。別の可能性として、ヒッグス粒子が複合粒子として現れる複合ヒッグス理論がある。これらのシナリオにおいて、高エネルギーでスカラー粒子が存在しないため、階層性問題は消え去る。

本博士論文では、ヒッグス粒子が複合粒子であるという理論に基づいた二つのシナリオ、閉じ込めを超対称性拡張ヒッグス理論と複合ヒッグス理論について研究を行い、これらの将来加速器実験での検証可能性を議論した。

第一に、我々は閉じ込めを伴う超対称拡張ヒッグス理論について研究を行った。この理論では電弱エネルギースケールより高いエネルギースケールに存在する新たなゲージ理論が存在する。低エネルギー側で結合定数が増大し、基本的な場が閉じ込めを起こした結果として拡張されたヒッグスセクターが現れる。付加的なスカラーボソンの寄与によって、宇宙の物質反物質非対称問題を解決する必要条件である、電弱 1 次相転移を実現することが出来る。さらに、破れない離散対称性を課すことによって、暗黒物質・ニュートリノ振動の問題をも同時に解決することが出来る。これらの問題を解決しつつ、既存の加速器実験の結果を満たすこともできる。また、将来実験での検証可能性を議論した。

第二に、ヒッグス粒子が複合粒子となるシナリオを研究した。特に我々はヒッグス粒子が擬南部ゴールドストーン粒子である模型、複合ヒッグス模型に着目した。これらの模型では、ヒッグス粒子は高いエネルギースケールで大局的対称性が破れることに伴って現れる南部ゴールドストーン粒子である。これらの粒子は Coleman-Weinberg 機構によって質量を得るので、擬南部ゴールドストーン粒子となる。

この種の模型では、大局的対称性の破れのパターンによって、様々な拡張ヒッグスセクターを持つ模型が考えられる。最も単純な模型として最小複合ヒッグス模型 (MCHM) が知られている。この模型では大局的対称性  $SO(5)$  が  $SO(4)$  に破れることで 4 個の南部ゴールドストーン粒子が現れ、ちょうど標準模型のヒッグス二重項の自由度に対応している。

擬南部ゴールドストーン粒子の実例として、量子色力学に現れるパイ中間子が良く知られている。パイ中間子はカイラル対称性の自発的破れに伴って現れる。パイ中間子の散乱振幅は高エネルギーで増大するが、新しい粒子 (ロー中間子) の寄与によって、振幅は発散せず、ユニタリティーが保たれることが実験的に観測されている。このパイ中間子は MCHM の弱ゲージ粒子の縦波成分と同一視されるため、この現象と同様のことが、W ボソンの散乱過程においても発生することを考える。ヒッグス粒子と W ボソンとの結合定数は標準模型の値からずれるために、散乱振幅が増大しユニタリティーが破られる。そこで、我々は MCHM に量子色力学のロー中間子的な新粒子を導入し、散乱振幅のフェイズシフトの情報からこの新粒子の質量スケールを間接的に抜き出す方法について議論した。

また、MCHM ではヒッグス粒子と標準模型粒子との結合定数が物質場の表現次元に依存して様々なズレのパターンを見せる。これらの情報を用いて、LHC Run-I における実験データからくる MCHM の模型のパラメーターの制限、LHC Run-II と将来線型加速器実験、国際線型加速器 (ILC) と Compact Linear Collider (CLIC)、での対ヒッグス粒子生成過程を用いた検証可能性について議論した。これらの過程は非常に特徴的な振る舞いをするため、複合ヒッグス模型以外の新物理模型と区別できる可能性を示した。同様の議論を拡張されたヒッグスセクターを持つ、複合 1 重項模型についても行った。

最後に、2015 年末に LHC 実験で 2 光子過剰信号が報告された。これは現在最新の新粒子の兆候であり、多くの理論物理学者の興味を集めている非常に面白い現象である。我々は、この現象を複合ヒッグス模型の枠組みを用いて説明し、実験結果を満たす模型のパラメーター領域を示した。

学位申請者： 町田 尚基

論文題目： (英文) Theoretical Studies on New Physics behind the Higgs sector  
(和文) ヒッグスセクター背後の新物理学に関する理論的研究

【学位審査結果の要旨】

本審査委員会の審査委員全員は申請者から提出された論文を査読し、かつ 2016 年 1 月 29 日に催した本審査会（学位論文公聴会を兼ねる）では申請者によるプレゼンテーションに対して突っ込んだ質疑応答を行った。論文の内容に関して審査委員から専門性と独創性、新規性に関して特に異論は出ず、また公聴会で申請者は高度な専門知識に基づいた内容と高いプレゼンテーション能力を示した。これらを受けて審査した結果、申請者には博士（理学）として十分な学識と業績があることを認め、本審査及び最終試験共に合格と判定した。

本博士論文では、申請者が博士課程在学中に研究したいくつかのテーマを集大成したものである。それらのテーマは 2012 年に発見されたヒッグス粒子の正体がより根本的な素粒子の複合粒子であるという仮説に基づいたモデル構築の研究とその実験での検証可能性の研究である。素粒子標準理論は 100 ギガ電子ボルト付近までの自然現象を記述する優れた理論として知られるが、質量の起源としての役割をもつ素粒子「ヒッグス粒子」は階層性問題を引き起こすなどいくつかの理論的困難がある。また近年は暗黒物質の存在やニュートリノ振動現象、物質反物質の非対称性問題など、標準理論の枠内では説明できない実験事実も知られてきた。こうして標準理論はあくまで暫定的なものであり、より高エネルギーでは標準理論を超えた新物理学があつて上の諸問題を解決すると期待されている。

この状況の元で、申請者はヒッグス粒子が複合粒子であるという仮説に基づいて、1) 紫外領域に超対称ゲージ理論に基づく新理論があり、その低エネルギー有効理論として発見されたヒッグス粒子の性質や、暗黒物質、物質反物質費対称性、ニュートリノ振動を同時に説明できる理論を構築した。2) ついで QCD に現れるパイ中間子の正体がカイラル対称性の破れの結果として出てくる擬南部ゴールドストーン粒子でありクォークの複合粒子であるという考えを、電弱スケールのヒッグス粒子に応用し、紫外領域に未知の強結合ダイナミクスが存在し、その大局的対称性の破れの結果として現れる擬南部ゴールドストーン粒子がヒッグス粒子であるという複合ヒッグス模型を考えて、そのコライダー現象論を研究した。現在稼働中の LHC 実験や計画中の国際リニアコライダー実験を想定し、この模型がどのように標準理論の予言と異なるかを系統的に研究した。特にヒッグス粒子の対生成過程に現れる標準理論からのずれ、及びヒッグス結合定数に現れるずれを研究し、将来実験での模型の直接及び間接検証可能性を世界で初めて明らかにした。

これらの成果は、すでに 3 報の論文として欧米の一流誌に掲載されている。共著であるが、主要な解析は申請者が最初に導いたものでありその貢献度は高い。以上を踏まえて、本審査委員会における厳正な審査を行った結果、全員一致で上の審査結果となった。