

氏 名 折笠 雄太

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大甲第 1496 号

学位授与の日付 平成 24 年 3 月 23 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 The classically conformal B-L extended standard model

論文審査委員 主 査 教授 岡田 安弘  
教授 磯 暁  
教授 北澤 良久  
教授 野尻 美保子  
教授 萩原 薫

Asistant Professor 岡田 宣親

The University of Alabama

To understand the dynamics of the electroweak symmetry breaking is one of the most important issues in particle physics. In particular, the hierarchy problem, i.e. the stability of the electroweak scale against a higher energy scale (e.g. GUT scale or Planck scale) is the most mysterious. Low energy supersymmetry provides a natural solution, and predicts new particles around the TeV scale. We pay a special attention to the (almost) classical conformal invariance of the SM. Because of the chiral nature, the SM Lagrangian at the classical level cannot possess dimensionful parameters except for the Higgs mass term closely related to the gauge hierarchy problem.

Even if the SM Lagrangian possesses the classical conformal invariance, the Higgs mass term is radiatively induced by matter fields with quadratically divergent coefficients, and hence we cannot be free from the gauge hierarchy problem. Bardeen has argued that once the classical conformal invariance and its minimal violation by quantum anomalies are imposed on the SM, it may be free from the quadratic divergences and hence the gauge hierarchy problem.

It seems difficult to realize such a mechanism in ordinary field theories based on the Wilsonian renormalization group, but we cannot either deny a possibility of an yet unknown mechanism to forbid the quadratic (and possibly the quartic) divergences in field theories based on the Planck scale physics. Such a mechanism inevitably requires the absence of intermediate mass scales between the electroweak and the Planck scales. In other words, physics at the Planck scale is directly connected with the electroweak physics.

In this thesis, we do not discuss the mechanism itself, but investigate its phenomenological implications. If the quadratic divergences are absent in classically conformal theories, the conformal symmetry is broken only by the logarithmic running of the coupling constants. As a result, the electroweak symmetry breaking is realized not by the negative mass squared term of the Higgs doublet, but the radiative breaking, called Coleman-Weinberg (CW) mechanism. However it is well-recognized that the CW scenario is already excluded for the SM because of the large top-Yukawa coupling. In the original paper by Coleman and Weinberg, they predicted the Higgs boson mass at 10 GeV assuming a small top-quark mass, but at present, the heavy top-quark is known to destabilize the Higgs potential, and the CW mechanism does not work. Hence we should extend the SM so that the CW mechanism works with phenomenologically viable parameters.

We have proposed a minimal phenomenologically viable model that the electroweak symmetry can be radiatively broken. It is the minimal B-L model. The electroweak as well as the B-L symmetries should be broken radiatively by the CW mechanism because of the classical conformal invariance. The condition that the theory is stable up to the Planck scale gives a strong constraint on the parameter space

of the model. The stability of the electroweak scale against radiative corrections gives upper bounds for the masses of the B-L gauge boson and the right-handed neutrinos, and in this way we are led to the minimal B-L gauged model naturally realized at the TeV scale. In this thesis, we further study the theoretical and phenomenological properties of the model. Because of the theoretical requirements,  $Z'$  gauge boson mass is predicted to be around a few TeV, and will be soon discovered at the LHC.

Our model can generate baryon asymmetry and dark matter density in the universe.

First, the baryogenesis is realized through the resonant leptogenesis. In this thesis we investigate the resonant leptogenesis scenario in the minimal B-L extended SM with the B-L symmetry breaking at the TeV scale.

Through detailed analysis of the Boltzmann equations, we show how much the resultant baryon asymmetry via leptogenesis is enhanced or suppressed, depending on the model parameters, in particular, the neutrino Dirac Yukawa couplings and the TeV-scale Majorana masses of heavy degenerate neutrinos. In order to consider a realistic case, we impose a simple ansatz for the model parameters and analyze the neutrino oscillation parameters and the baryon asymmetry via leptogenesis as a function of only a single CP-phase. We find that for a fixed CP-phase all neutrino oscillation data and the observed baryon asymmetry of the present universe can be simultaneously reproduced.

We propose a very simple idea to introduce the DM candidate in our model. We introduce the  $Z_2$  parity into the model and impose one of three right-handed neutrinos to be odd, while the others even. In this way, the parity odd right-handed neutrino becomes stable and the DM candidate. We demonstrated that the dark matter relic abundance with an enhanced annihilation cross section by the Higgs bosons and the B-L gauge boson resonances is in accord with the current observations.

## 博士論文の審査結果の要旨

折笠雄太さんの博士論文は、古典的な共形不変性をもつB-Lゲージ理論に関する理論的、および現象論的な研究である。

素粒子の標準模型は大変よい精度で実験的に検証されてきたが、現状ではいくつか不満足な点があることが指摘されている。特に重要な点としては次のようなことがあげられる。1. 宇宙のバリオン数非保存を正しく説明できない。2. ニュートリノ振動を説明できない。3. 暗黒物質の自然な候補を含まない。4. 電弱相互作用の対称性の破れに関して理論的な不自然さを持つ。これらの点を解決する目的で、標準模型を超える物理模型が提案されてきた。

折笠さんは、これらの点を説明する最小の模型として、バリオン数(B)-レプトン数(L)をゲージ化した古典的共形不変性をもつ模型を提案した。この模型は古典的なポテンシャルは質量スケールを持たないが、輻射補正により電弱相互作用を自発的に破ることができ、B-L対称性の破れがTeVスケールでなければならないことが要請される。このような低いエネルギースケールでB-L対称性が破れる模型は、これまでバリオン数生成の面からはあまり考察されてこなかったが、折笠さんは、右巻きニュートリノ質量に縮退がある時におこるResonant leptogenesisを使うことで宇宙のバリオン数非保存が説明できることを明らかにした。またその時のパラメータがニュートリノ振動実験の結果と矛盾なく実現できることも示している。さらにある種のZ2対称性を課すことで、右巻きニュートリノの一部が暗黒物質となり得る事を示した。

博士論文では、標準模型やその問題点のレビューからはじめ、3本の学術論文にまとめられた上記のオリジナル研究に基づく詳細な議論が展開されている。特に、この模型のパラメータについて、理論的およびこれまでの実験からの制限を導き、可能なパラメータ領域についての、アップグレードされたLHCやILCにおける検証可能性を議論した。

本研究は、これまでにレフェリー付専門雑誌に発表した3本の論文に基づく研究であり、高い学問的な知見を含んでいる。学位論文は、これらの背景となる基礎事項から始まり、これまでの研究成果を集大成してまとめたものである。またこの博士論文は英語で書かれており、折笠氏が研究者として十分な語学能力をもっていることがわかる。

以上のように、折笠さんの提出した論文は、高い完成度で当該分野における新しい学問的な知見を切り開いており、学位論文としてふさわしいものであると認め、論文審査結果を合格と判定した。