HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Phenomenological study on classically scale invariant models towards natural realization of the Higgs mass [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	山口, 雄也
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(理学)
Dissertation Number	甲第12689号
Issue Date	2017-03-23
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/65397
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Yuya_Yamaguchi_abstract.pdf, 論文内容の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称　博士（理　学）　氏　名　　山口　雄也

学 位 論 文 題 名

Phenomenological study on classically scale invariant models

towards natural realization of the Higgs mass

（ヒッグス質量の自然な理解に向けた古典的スケール不変性を持つ模型の現象論的研究）

素粒子標準模型はヒッグス粒子の発見によって確立し、今までに得られた実験結果をほぼ無矛盾に説明することができている。そのため、標準模型は現在稼働している加速器実験で到達可能なエネルギーの上限である電弱スケール（～O(100)GeV）までは非常に有効であることが分かっている。一方で、標準模型の範囲内では説明できない問題もいくつか存在している。例えば、軽いニュートリノ質量、宇宙のバリオン数非対称性、ダークマター、ダークエネルギーなどである。しかし、これらの問題を解決するために、新たに電弱スケールと比較して大きい質量（例えば、大統一理論（GUT）のスケール～$O(10^{16})$GeV やプランクスケール～$O(10^{18})$GeV）を持つ粒子を導入すると、階層性問題が出てきてしまう。これは、ヒッグス粒子の質量が新たに導入した重い粒子の質量程度の量子補正を受けてしまうことによるファイン・チューニング（不自然な微調整）問題である。

近年、この問題の解決法として、古典的スケール不変性による拡張模型の研究が盛んに行われている。このアイディアは、標準模型の範囲内ではスケール不変性が近似的に成り立っているために階層性問題はないという議論を基にしている。つまり、標準模型では繰り込み群によって変化するヒッグスの質量パラメータは、模型のカットオフスケール（有効なエネルギースケールの上限）が GUT スケールやプランクスケールであっても、電弱スケールのままであり、その安定性は量子補正の小ささから保証されているという事実を拡張模型に応用している。具体的には、まず、拡張模型に古典的スケール不変性を課すことで、ヒッグスの質量パラメータをゼロにする。ここで、スケール不変性は量子効果によって破れてしまうので、“古典的”スケール不変性と呼んでいる。スケール不変性が保たれている間は、ヒッグスの質量パラメータは繰り込み群によって変化せず、ずっとゼロのままである。しかし、スケール不変性は量子効果によって拡張模型のカットオフスケールよりずっと低いエネルギースケールで破れることができる。このとき、ヒッグスの質量パラメータは典型的にその破れのスケール程度の大きさを持つようになり、それが電弱スケールと同程度であれば、階層性問題は起きないことになる。また、重要なこととして、このような拡張模型の場合には、標準模型で現れる電弱スケールはスケール不変性が破れるエネルギースケールに対応していて、それがカットオフスケールよりずっと小さいことはスケール不変性を破る機構によって保証されうる。

スケール不変性の破れには大きく分けて２種類の機構が知られている。１つはコールマン・ワインバーグ機構であり、摂動論的な量子効果を基にしている。もう１つは量子色力学（QCD）のような強い相互作用のダイナミクスであり、非摂動論的な量子効果を基にしている。筆者はこれら機構を使って自然にヒッグス粒子の質量を説明できる模型の構築・検証を行った。その際に、以下のような現象論的な問題を同時に説明することができるかを調べ

た：軽いニュートリノ質量、宇宙のバリオン数非対称性、真空の安定性、ヒッグス質量項の負符号、ダークマターの存在比。特に、ヒッグス質量項の負符号は標準模型では電弱対称性の破れを起こすための単なる仮定であるが、拡張模型ではその負符号を自然に導出できる可能性がある。

この博士論文では、筆者が研究した古典的スケール不変性による拡張模型を４つ紹介する。はじめの３つは標準模型に U(1)ゲージ対称性を加えた模型で、コールマン・ワインバーグ機構でスケール不変性を破る。あとの１つは SU(N)ゲージ対称性を加えた模型で、強い相互作用のダイナミクスでスケール不変性を破る。それらのうちボソニックシーソーという機構を用いた模型では、自然にヒッグス質量項の負符号を導出することができ、必然的に新粒子の質量が数 TeV（$=10^3$GeV）になるという非常に興味深い予言を与えることができた。これらの粒子は将来の加速器実験で検証可能であり、より一般的にボソニックシーソー機構の制限を与えることも可能かもしれない。また、SU(N)ゲージ対称性を加えた模型では２種類の全く異なるダークマターの候補が現れるが、それぞれ独立に解析し、どちらの場合でも宇宙のダークマターの存在比を説明できることを示した。本研究は、古典的スケール不変性の存在が標準模型に現れる電弱スケールの生成と電弱対称性の破れを自然に説明できる可能性を示した。