

博士論文審査の結果の要旨

氏名	西川 侃成
学位名	博士（理学）
学位番号	甲 第131号
論文題目	余剰次元が有効理論に与える影響とその評価
論文審査委員	主査 川村 嘉春 小竹 悟 奥山 和美 長谷川 庸司 丸 信人（大阪市立大学大学院）

（博士論文審査の結果の要旨）

素粒子の標準模型は電弱スケールまでの素粒子現象を極めてよく記述する場の量子論に基づく模型として、ニュートリノ質量に絡んだ修正を加えた形で確立している。ただし、この模型にはいくつかの謎が存在し、素粒子の基礎理論とは言い難い。主な謎として、「模型の枠組みの存在理由が不明である。多くの基本粒子やパラメータを含んでいる。ヒッグス粒子に関する自然さの問題が存在する。重力を含んでいない。宇宙に関する未知の実体が説明できない。」などがある。標準模型を超える物理として、「力の大統一」、「超対称性」、「余剰次元」などに基づく模型が盛んに研究されている。ここで、力の大統一とは標準模型に現れる3つのゲージ相互作用の統一を意味する。超対称性とはボソンとフェルミオンの入れ替えに関する不変性のことである。また、余剰次元は4次元時空以外の余剰な空間次元のことである。今のところ、余剰次元は実験で確認されていないので、存在する場合、余剰な空間のサイズは極めて小さいと考えられている。

西川君の学位論文に関する研究の動機は「標準模型の謎の1つである自然さの問題に関する余剰次元に基づく解決法が量子補正のもとでどこまで有効に機能するのか？」という疑問に基づくものである。ここで、自然さの問題とは「なぜ、電弱スケールはプランクスケールに比べて、はるかに小さいのか？電弱スケールは量子補正のもとで安定に保たれるのか？」という問題である。余剰次元に基づく解決法はいくつか提案されている。西川君が着目したのは、細谷機構とよばれる余剰次元に関する動力学的な対称性の破れの機構に基づく解決法である。具体的には、高次元ゲージ場の余剰次元成分であるウィルソン位相 θ_w にヒッグス粒子の役割を担わせる、「ゲージ・ヒッグス統一理論」と総称される理論を出発点に取る。このような理論に基づく模型では高次元時空に関するゲージ対称性のおかげで、古典論レベルでヒッグス粒子の質量は0で、量子補正により θ_w のポテンシャルが生成されヒッグス粒子が質量を得る。問題はその寄与が様々な量子補正のもとで有限に留まるかどうかである。実際、先行研究により、 θ_w のポテンシャルに関して次のような特徴が知られていた。

- ① 古典論レベルでは、 θ_w のポテンシャルは0で θ_w の値は決まらない。
- ② ゲージボソンやフェルミオンに関する量子補正により、 θ_w のポテンシャルが生成され、その最小により θ_w の値が決定される。
- ③ 重力子を含まない2ループまでの摂動計算により、 θ_w のポテンシャルに含まれるパラメータの値は有限である。

これらの結果から、ゲージ・ヒッグス統一理論は自然さの問題を解決する有力な候補の1つとなる。ただし、あらゆる量子補正のもとで有限性が保たれるという証明が困難で、それゆえ、現時点で摂動計算により高次の補正や別の粒子が寄与する補正を加えてポテンシャルの安定性を探究し、理論的な状況証拠を得ることが最善策である。

上記のような研究背景のもとで、西川君は余剰次元として S^1 を含む5次元時空上の量子重力と結合した $U(1)$ ゲージ理論に基づいて、重力子による量子補正が加わった場合の θ_w のポテンシャルの安定性に関する考察を行い、「2ループまでの摂動計算に、重力子の寄与を加えても θ_w のポテンシャルに含まれるパラメータの値は有限に留まる」という結果を得た。このことから、標準模型における「自然さの問題」やインフレーション模型に内在する「微調整問題」に対して、量子重力による補正を加えてもゲージ・ヒッグス統一理論は依然有効であると結論付けられる。

これらの成果は公表主要論文（下記公表主要論文名参照）としてすでに出版されている。さら

に、学会発表等も行っている。学位論文には余剰次元に関するわかりやすい解説や誌面の都合上
学術雑誌に掲載できなかった解析に関する詳細な記述も含まれている。さらに、重力子が寄与す
る量子補正に関する非常に複雑な計算を独力で丹念に遂行にした点も十分評価できる。これら
様々な要素を総合して、学位論文に値し「合格」と判断した。

(公表主要論文名)

1. Yoshiharu Kawamura, Yasunari Nishikawa, “On diagonal representatives in boundary condition matrices on orbifolds”, *International Journal of Modern Physics A*, Volume No. 35, Issue No. 31, Article No. 2050206, Year 2020, DOI: 10.1142/S0217751X20502061.
2. Yasunari Nishikawa, “Graviton loop contribution to Higgs potential in gauge-Higgs unification”, *Progress of Theoretical Experimental Physics*, Issue No. 2021, Article No. 013B07, Year 2021, DOI: 10.1093/ptep/ptaa179.