



The Gauge Hierarchy Problem and Higher Dimensional Gauge Theories

幡中, 久樹

(Degree)

博士 (理学)

(Date of Degree)

1999-03-31

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲2003

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1002003>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏名・（本籍） はた なか ひさ き 幡 中 久 樹 （大阪府）
 博士の専攻分野の名称 博士（理学）
 学位記番号 博い第122号
 学位授与の要件 学位規則第4条第1項該当
 学位授与の日付 平成11年3月31日
 学位論文題目 The Gauge Hierarchy Problem and Higher Dimensional Gauge Theories
 （ゲージ階層性問題と高次元ゲージ論）

審査委員 主査 教授 林 青 司
 教授 森 井 俊 行 教授 武 田 廣
 教授 野 海 正 俊

論文内容の要旨

現在の素粒子物理学では、いわゆる「標準理論」が実験と非常によい一致を見ている。しかし、理論としては、まだ不十分な点があり、より高いエネルギー領域でこれを越えるより基本的な理論で置き換えられると考えられている。その典型的な例が「大統一理論」である。

標準理論の典型的なエネルギースケール、いわゆるウィークスケールが 10^2 ギガ電子ボルトであるのに対し、大統一理論での典型的なエネルギースケール（大統一スケール）は 10^{15} ギガ電子ボルトである。大統一理論の方が基本的な理論であると考えられているので、ウィークスケールの物理量、例えば標準理論でのヒッグススカラーの質量が大統一理論から導かなければならない。しかし、前述のエネルギースケールの違いは十兆倍に及び、それにともなうパラメータの非常な微調整が問題となる。このように、大統一理論は極端に異なる物理スケールを持っているが、このスケールの差を維持することにまつわる困難をゲージ階層性問題という。特に、ヒッグスの質量が非常に小さな値で現れるということに関して、ラグランジアン of 段階での微調整と、量子補正が2次発散することによるパラメータの微調整が大きな問題である。

本論文では、高次元のゲージ理論を考え、高次元の意味でのゲージ場をヒッグス場とみなす考え方に沿って、ゲージ階層性問題の解決の可能性を探った。

全体は四つの章で構成されており、補遺として三つ章を加えた。各章の内容は以下のようになっている。

第1章

まず、素粒子物理学におけるゲージ階層性問題についてまとめた。

次にゲージ階層性問題に対する解として、超対称性理論、テクニカラー理論などダイナミカルな対称性の破れに基づく模型、擬南部ゴールドストーンボゾンなどのこれまでに提案された解について紹介した。

次に、ゲージ階層性問題、特にヒッグス場の質量補正の発散の問題を高次元ゲージ場の導入によって解決する方法について基本的なアイデアを示した。

第2章

第2章では、高次元ゲージ理論の一般的側面と、具体的なモデルとして、可換ゲージ理論での模型を考えた。

第一の模型は、4次元の通常ミンコフスキー空間に円(S^1)にコンパクト化された1次元を加えた5次元空間($M^4 \times S^1$)での可換ゲージ理論を考えた。ラグランジアン段階でのヒッグスの質量が0であることを示し、さらに1ループの量子補正を行って、スカラー理論特有の2次発散が現れないことを確認した。

ところが、一般にはコンパクト化された空間の半径 L の逆数に比例する有限な質量補正が出てくる事が分かった。このような質量の2乗補正はまた、5次元目を回るフェルミオンの境界条件に符号と絶対値が大きく依存し、また、フェルミオンの質量が非常に大きいときには、質量補正の大きさは $\exp(-mL)$ という係数因子応じて抑制されることが判明した。さらに5次元目のゲージ場をコンスタントな背景場として有効ポテンシャルを評価し、フェルミオンの境界条件がダイナミカルに半周期的境界条件に選ばれること、そのときヒッグスの質量補正は最大に成る事が分かった。コンパクト化の半径が通常考えられているように非常に小さな大きさ(プランク長さなど)ではヒッグスがその大きさに応じた大きな質量補正を得てしまう事が問題となることが分かった。

この問題を解決する可能性を探る目的で、第二の模型として、球(S^2)にコンパクト化された空間での質量場としてスカラー場を用いた可換ゲージ理論について取り組み、質量補正が S^2 の大きさに関係なく0となるという結果を得た。

第3章

第3章は、モデルを非可換ゲージ理論に拡張した。

前章で議論した5次元のモデルを非可換ゲージ理論に拡張し、さらに物質場として基本表現と随伴表現の両方のフェルミオン場を含む系を考え、ゲージ対称性の破れを議論した。特に、 $SU(2)$ 群と、 $SU(3)$ 群について主に調べ、物質場の属する群の表現とそのフレーバー数の組合せが、ゲージ対称性の破れにおいて大きな影響を与える事を示した。

また、特殊な場合においては、有効ポテンシャルの2階微分という意味を持ったヒッグスの質量補正を消去しうる事を示した。

第4章

第4章では結論と展望をまとめた。

この研究でとりあつたシナリオは、他と比べて大きく3つの利点があることを指摘された。

一方で、今後解決すべき問題点もいくつかある。一つは、コンパクト化のスケールに比例した質量補正が出てきうる事である。もう一つとしては、このシナリオではヒッグス場としては随伴表現のものしか作る事ができず、どうやって基本表現のヒッグスを作るかという問題が残されている。これらの問題は今後解決されるべき問題として残った。

最後にこのシナリオは、もともと超対称性を必要としないシナリオとして考えられたが、超対称性を持った理論に拡張する事も可能であり、今後この方向での展望もある事を指摘した。

補章

補章として3つの章を加えた。

補章Aは、計算に必要な公式をまとめた。

補章Bでは、第3章において重要な細谷メカニズムにおけるゲージ対称性の破れのメカニズムについてまとめた。

補章 C では、同じく細谷メカニズムを論じる際に重要となる高次元ゲージ理論での有効ポテンシャルの計算の方法についてまとめた。

論文審査の結果の要旨

素粒子の基準理論は、いずれそれを含むより基本的な理論によって取って代わられるものと期待されている。そうした理論の典型的な例として大統一理論を採ると、特有のスケール (GUT scale) は 10^{15}GeV 程度であり、標準理論の典型的なエネルギースケールである weak scale ($\sim 10^2\text{GeV}$) に比べ非常に大きい。こうしたふたつの極端に異なるエネルギースケールの差を自然に維持する事は通常の大統一理論では困難である。これがゲージ階層性問題である。この問題を解決する試みから超対称性 (su-persymmetry) 理論のような“新しい物理”の理論が考案されて来ており、素粒子物理学の発展にとって重要な問題といえる。

この論文の主目的は、いままで提案されて来た解法とは独立なゲージ階層性問題の解法として、高次元ゲージ理論の枠内で階層性問題が解決し得る事を論じ、また関連する論点としてゲージ対称性をこうした元々は Higgs の存在しない理論でどのように dynamical に破るか、という問題について具体的計算にもとづいて議論する事である。

1 章での序論に続いて、2 章では、雛形として高次元 QED を採用して階層性問題を論じている。tree level での Higgs 質量が 0 である事を確認した後、量子補正を計算し、2 次発散が現れない事、従って二種類のゲージ階層性問題が同時に解決する事を示している。しかし、一般にはコンパクト化した空間のサイズの逆数に比例する有限の質量が残る事がわかり、これを小さくする可能性がいくつか論じられている。即ち、コンパクト化した空間のサイズを比較的大きくとる、コンパクト化する空間を 2 次元球面のような単連結空間にする、といった可能性である。また、Higgs 質量は物質場の境界条件に依存するが、この境界条件を有効ポテンシャルを用いてダイナミカルに決定し得る事も議論されている。

第 3 章では、高次元ゲージ理論を現実的な大統一理論にしようとする時に特に重要となる、Yang-Mills ゲージ対称性をどのように dynamical に破るかという論点について議論している。雛形の理論として $SU(2)$, $SU(3)$ ゲージ理論を採用し、コンパクト空間の方向のゲージ場に関する有効ポテンシャルの最小化によってゲージ対称性の破れのパターンを決定している。従来の計算と違い、基本表現と随伴表現の両方の物質場を含む系において対称性の破れが議論されており、物質場の表現とそれに属する物質場の数により破れパターンが大きく変わり、望ましい破れのパターンも実現する事が示された。更に、特殊な場合には Higgs 質量が (コンパクト空間の大きさに依らず) 正確に消える、という大変興味深い結果も得られている。

第 4 章はまとめの議論にあてられている。

以上みてきたように、本研究は素粒子物理学の重要な問題であるゲージ階層性問題について、その新しい可能な解として高次元ゲージ理論を研究したものであり、また元々 Higgs 粒子の無い理論でいかにしてゲージ対称性を破るか、等について重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。

よって学位申請者 幡中久樹は、博士 (理学) の学位を得る資格があると認める。