

論文要旨

論文題目：The Lattice Approach to Five Dimensional Gauge Theories (格子の手法を用いた5次元ゲージ理論の研究)

氏名：米山 京子

素粒子物理学は物質の最も基本的な構成要素である素粒子が従う物理法則の探求を目的としている。現在までに提唱されている素粒子標準模型は粒子の相互作用を良く説明し、素粒子実験との矛盾もない。しかしながら、この素粒子標準模型はいくつかの問題を含んでおり、より根本的な素粒子理論が存在すると考えられている。より根本的な素粒子理論として、弦理論、超対称性理論、余剰次元理論など様々な理論が研究されているが、本研究では余剰次元理論である5次元ゲージ理論を扱った。本研究の目的はオービフォールド境界条件をもつ5次元純粋 $SU(2)$ 格子ゲージ理論の非摂動領域における自発的対称性の破れと次元低減の有無を平均場展開とモンテカルロシミュレーションを用いて調べることである。

5次元ゲージ理論は素粒子標準模型の拡張として広く研究されている。ここでの5次元理論とは時間1次元、空間4次元からなる5次元理論である。我々は通常時間1次元、空間3次元を認識するが、もう一つの空間次元が通常認識できない形で存在していると考えることができる。5次元理論を研究する動機としては主に、1) 標準模型にはヒッグスポテンシャルが2次発散してしまう問題があるが、5次元理論ではこの2次発散を回避できることと、2) 標準模型ではヒッグスの起源についての説明がないが、5次元理論ではゲージ場の第5次元成分をヒッグス場と見なすことができる(ゲージ・ヒッグス統一)ことが挙げられる。このヒッグス場によって自発的対称性の破れ(SSB)が起こるとゲージ場やフェルミオン(物質を構成する場)が質量を持つ。ゲージ・ヒッグス統一模型の摂動論的研究は数多く行われているが、摂動論的研究ではゲージ結合定数が非常に小さい場合、つまり相互作用が非常に小さい場合しか扱うことができない。そこで本研究では第5次元がオービフォールド境界条件をもつ場合について格子ゲージ理論を用いた非摂動論的研究を行った。平均場を用いた研究によってSSBがトーラス境界条件下では起こらず、オービフォールド条件下では起こりうることを示唆されている。このモデルのパラメータは第5次元の大きさ N 、格子結合定数 β 、非等方パラメータ γ の3つである。 γ は第5次元とその他の縮尺の違いを表し、 $\gamma > 1$ では第5次元がその他の次元より大きい場合を表す。

格子ゲージ理論とは格子状に離散化した時空で定義される理論であり、連続極限が存在する場合には、連続極限をとることで実際の連続空間における物理量などを求めることができる。また、連続極限が存在しない場合には有限格子間隔を持つ有効理論となることが期待される。格子ゲージ理論を用いることの利点としては、広いパラメータ領域を検証することが可能であることに加え、紫外カットオフをゲージ対称性を保った形で導入できることが挙げられる。

本研究では平均場を用いた研究により、オービフォールド境界上の4次元超平面に沿う静電ポテンシャルが4次元超平面上の静電ポテンシャルが4次元湯川型ポテンシャルであり、この静電ポテンシャルからゲージボソンの質量が導けることを示した。このことはSSBの存在を意味し、この結果はフェルミオンの存在無しにSSBが起こるという点で摂動論的研究結果と異なる。さらに、相転移付近でモデルが4次元ゲージスカラー理論に帰着する傾向があること、つまり4次元理論への次元低減を確認した。また、このモデルでは $\gamma < 1$ のパラメータ領域で実験結果に合うヒッグス質量を得ることができた。さらに、 $\gamma < 0.6$ で二次相転移線の存在を確認し、 $\gamma = 0.5$ 付近で連続極限をとると Z ボソンの一次励起状態が約1 TeVとなることを示した。平均場の収束性については保証されていないため、モンテカルロシミュレーションを用いた計算でSSBの存在を確認することにより平均場近似による結果の妥当性を確かめた。

このモデルの優れた点としては、パラメータが3つと少ないこと、少なくとも平均場ではくり込み可能な連続極限が存在し、実験に合うようなヒッグス質量が得られることが挙げられる。また、一次励起状態の Z ボソン質量が約1 TeVであることから実験による検証も期待できる。