

博士論文の要旨及び審査結果の要旨	
氏名	佐藤 優成
学位	博士 (理学)
学位記番号	新大院博 (理) 第 473 号
学位授与の日付	令和 4 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
博士論文名	グランドゲージ・ヒッグス統一模型に基づくディラック型ゲージノの実現
論文審査委員	主査 教授・浅賀 岳彦 副査 准教授・江尻 信司 副査 教授・早坂 圭司 副査 教授・伊藤 克美 副査 准教授・中野 博章
<p>博士論文の要旨</p> <p>素粒子標準模型は、現在までの実験結果を精度よく説明する模型であるが、さまざまな理論的動機から、標準模型を超える素粒子模型が探求されてきた：電荷の量子化や相互作用の大統一などの理論的課題の解決、さらには、正体が明らかでない暗黒物質の解明などである。さらに近年、2012年のヒッグス粒子の発見により、標準模型を高エネルギーまで適用すると、10^{11} GeV 程度の中間スケールでヒッグス場のポテンシャルが不安定になることが判明し、標準模型を超えた理論の存在が強く示唆されている。</p> <p>本研究では、以上の事柄を動機として、ディラック・ゲージノ模型を取り上げている。この模型は超対称模型の一種であり、ゲージノとは、ゲージボソンの超対称パートナーの随伴表現フェルミオンである。通常、ゲージノはマヨラナ型質量を持つと仮定することが多いが、ディラック・ゲージノ模型では文字通りディラック質量を仮定する。この模型は、論文の前半で手短かにレビューされたように、従来の超対称模型にはない理論的・現象論的利点を示すことが知られており、さまざまな文脈で興味を持たれてきた。さらに、ヒッグス場を含むスカラー場の4点結合がゼロになることを予言する模型でもある。</p> <p>しかし、ディラック・ゲージノ模型を実現するためには、三つの仮定が必要である：</p> <ol style="list-style-type: none"> 0) いわゆる D タイプの超対称性の破れ、 1) ゲージノと質量項を組む随伴表現フェルミオン場および随伴スカラー場の存在、 2) 仮定 0) の下で、ディラック質量項を生成する相互作用項 (supersoft 項) の存在。 <p>これらの性質は、多くの先行研究では単に仮定されてきたが、そのいくつかを自然に実現する枠組みを提案するのが、本研究の目的である。</p> <p>本研究は、グランドゲージ・ヒッグス統一模型 (gGHU 模型) がこれらの仮定のうち 1) と 2) を自然に実現できる理論的枠組みであることを指摘したものである。gGHU 模型は、$SU(5) \times SU(5)$ ゲージ群に基づく 5 次元大統一模型であり、5 次元目を S^1/Z_2 コンパクト化する際に二つの $SU(5)$ 群の入れ替え Z_2 対称性を課すことで、$SU(5)$ ゲージ対称性を破るヒッグス場とゲージ場が統一的に記述される。その結果、Z_2 対称部分から標準模型ゲージ群が得られると同時に、Z_2 反対称部分から標準模型の随伴表現場が得られる。この事実を仮定 1) の実現に用いるのが本研究の第一段階である。</p>	

本論文の後半では、仮定 2) を実現すべく、もともとの gGHU 模型をいくつかの点で拡張している。一つは超対称性の破れ (の伝達) を表現する U(1)対称性の追加であり、この点は従来のディラック・ゲージノ模型を踏襲している。非自明な点は、2) の supersoft 項が gGHU 模型では 5 次元チャーン・サイモン項 (CS 項) の Z_2 反対称部分に含まれることを指摘し、それを実現する拡張 gGHU 模型を提案したことである。具体的には、 Z_2 反対称な質量項を持つ 5 次元フェルミオン場および境界フェルミオン場を追加することで、望みの CS 項が生成されることを二通りの計算で示している。一つ目の方法 (参考論文の結果) では、フェルミオンのゼロモードがバルクに生成する (混合) 量子異常に着目し、それを相殺する要請から CS 項の係数を決定している。これは量子異常流入 (anomaly inflow) として知られる機構に相当する。二つ目の方法 (論文準備中) では、非ゼロモード (カルーザ・クラインモード) の寄与を足しあげるものであり、両者の結果が一致することを確かめている。なお、計算の詳細や結果の解釈が付録に付け足されている。

論文の最後では、本研究の結果得られるゲージノ質量の大きさを見積もり、その現象論的性質を手短に議論している。特に、ゼロモード波動関数が簡単に求められる極限では、ゲージノ質量が普遍性を満たすが、より一般的状況では、大統一ゲージ対称性の破れの効果で普遍性が補正されることを指摘している。その結果を踏まえて、大統一スケールの詳細な決定や、それに続く陽子崩壊過程の予言に向けての課題を展望している。

審査結果の要旨

2012 年にヒッグス粒子が発見されて以来、その背後にある理論や指導原理を探る研究が活発に行われている。特に観測されたヒッグス質量を素粒子標準模型のくりこみ群で高エネルギーに外挿すると、 10^{11} GeV 程度の中間スケールでヒッグス四点結合定数がゼロになる。このことを説明できる数少ない理論の一つが、本研究で取り上げられているディラック型ゲージノ模型である。

ディラック型ゲージノ模型は、さまざまな文脈で取り上げられてきたが、従来の大きな課題は、そもそものディラック質量項の起源が明確でないことであった。

本論文の前半では、ディラック型ゲージノ模型を取り上げる理論的動機が説明された後、ディラック質量項を導くために必要な軽い随伴表現場を得る枠組みとして、グランドゲージ・ヒッグス統一模型 (gGHU 模型) に関する先行研究、およびその前提となる 5 次元ゲージ理論の S^1/Z_2 コンパクト化が要領よくレビューされている。その上で、ゲージノ質量項を含む相互作用 (supersoft 項) を gGHU 模型から生成するアイデアが述べられている：つまり、そのボソン部分が 5 次元チャーン・サイモン項 (CS 項) を含むこと、それが gGHU における入れ替え Z_2 対称性を破ることである。その考察を踏まえ、 Z_2 反対称な CS 項を生成するための拡張 gGHU 模型として、 Z_2 反対称な質量項をもつ 5 次元フェルミオンおよび境界フェルミオンを含む (超対称) 模型が提案されている。

本論文の後半では、拡張模型から望みの CS 項が生成されることを二通りの方法で示している。量子異常流入に基づく計算では、CS 項の生成にはフェルミオンゼロモードの寄与を取り込めば十分なことが利用されており、最短の手順で結果を得ている。もう一つの方法は、非ゼロモードの寄与を積分した有効作用を直接計算するものであり、最初の方法が使える場合に両者の一致を確認することで、結果の確実性を担保している。

本研究の結果、ディラック型ゲージノ模型を実現する自然な枠組みが提示されたことになる。しかもそれがゲージ大統一を実現していることは、今後の模型構築の方向性を示すものと考えられる。特に、三世代の物質場の配置を具体化することで、陽子崩壊の計算を遂行することは、模型の検証可能性との関連で重要な課題である。

以上によって、本論文は博士 (理学) の博士論文として十分であると認定した。