

氏 名	やま した とし ふみ 山 下 敏 史
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 2872 号
学位授与の日付	平 成 17 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	理 学 研 究 科 物 理 学 ・ 宇 宙 物 理 学 専 攻
学位論文題目	Anomalous U(1) GUT (アノマラス U(1)大統一理論)

論文調査委員	(主 査) 教 授 川 合 光 教 授 中 村 卓 史 教 授 二 宮 正 夫
--------	--

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は「アノマラス U(1)大統一理論」について解説したものである。

このシナリオは、異常性のある U(1)対称性を用いた超対称大統一理論の一種であり、特徴は、モデルの対称性で許される項は全て、繰り込み不可能な項まで含めて導入することである。さらにその結合定数には不自然な階層性は仮定していない。クォーク・レプトンの質量階層性を説明するために Froggatt-Nielsen 機構を用いるため精度の高い予言をすることは困難であるが、オーダー評価に限れば無限個の相互作用項を導入しているにも拘わらず解析が可能となる。また、モデルのパラメータは本質的に異常性のある U(1)対称性の電荷であり、その数は導入する超場の数(～十数個)程度である。

このような仮定の下で、超対称大統一理論のいくつかの問題が一挙に解かれるモデルを構成している。すなわち、2重項のヒグス粒子が3重項のヒグス粒子よりも14桁も軽いという問題を自然に解決し、ニュートリノの bi-large 混合を含む、実験事実と矛盾しないクォーク・レプトンの質量行列を導いている。さらに、最小 SU(5)超対称大統一理論におけるゲージ結合定数の統一の成功が完全に再現されている。その一方で、通常の超対称大統一理論では問題となる核子崩壊は観測からの制限を満たすレベル以下に抑制することができている。具体的なモデルとして SO(10)型と E6 型の2つの型のモデルを考察しているが、共に、大きな表現に属する超場は導入しておらず、数は十数個である。

上述のゲージ結合定数の統一の解析から、このシナリオではカットオフスケールは通常の大統一スケール程度であるべきであることが導かれている。このシナリオでの SU(5)の破れのスケールはカットオフスケールよりも小さいため、X ボソンの質量もそのスケールより軽く、ゲージ粒子交換による核子崩壊 ($p \rightarrow e\pi$) が通常の大統一理論よりも促進されることが予言される。そのため、近い将来にこの陽子崩壊が観測されることが期待される。この他にも、このシナリオの予言として、中程度の $\tan\beta$ (～10)、比較的大きなニュートリノ1-3混合 ($U_{e3} \sim 0.2$)、ニュートリノ質量の normal hierarchy が挙げられる。

本論文では、クォーク・レプトンの世代間を混ぜるゲージ対称性 (horizontal 対称性) の役割についても議論している。horizontal 対称性を導入する理由は幾つかあるが、そのうちの一つに SUSY-flavor 問題の解決がある。超対称理論では一般に、クォーク・レプトンの超対称パートナーの存在によってフレーバー間の混合が起こり、中性カレントによってフレーバーが変わる過程を引き起こしてしまう。そのような過程は標準模型では非常に稀にしか起こらないため、超対称性の破れのパラメータには実験的に強い制限がつけられている。この制限を満たすような超対称性の破れの機構を実現することは難しく、この問題を SUSY-flavor 問題と言う。horizontal 対称性によりこの問題は解決されるのだが、horizontal 対称性は破れていなければならない、その破れの効果によりフレーバー混合が誘起されるため、実際にうまく解決できるかどうかは非自明である。このシナリオでは、E6 型のモデルではうまく解決できることを具体的なモデルを例に示している。また、horizontal 対称性にはさらなるクォーク・レプトンの統一という動機もあるが、この観点からの考察もなされている。

論文審査の結果の要旨

本論文は超対称大統一理論がもついくつかの問題点を、ゲージ群に異常性のある $U(1)$ を付け加えることによって、一挙に解決しようという野心的なものである。もとなるアイデアは数年前に前川展祐氏によって提唱されたものであるが、山下氏は前川氏との共同研究を通じて理論を系統的に一般化し、さまざまな新しい結果を得ている。それらの結果は5編の論文として公表されているが、それらを総括し、この理論の全体像を与えているのが本論文である。

本論文は、6つの章と2つの appendix からなる。第1章は序章であり、超対称大統一理論のもつ問題点がまとめられており、異常性のある $U(1)$ を導入することによってそれらがどのように解消できるかが簡潔に述べられている。第2章では異常性のある $U(1)$ ゲージ群の性質が詳しく分析され、その導入がゲージ結合定数の統一を壊さないのみならず、通常の超対称大統一理論では核子の寿命の理論値が短くなりすぎるという問題をうまく解決している事を示している。また、異常性のある $U(1)$ ゲージ群を導入すれば、Froggatt-Nielsen 機構として知られている構造を超対称大統一理論にも導入でき、その結果、クォークやレプトンの質量や混合角に現れる階層性が自然に理解できる事を示している。第3章では、具体的に $SO(10)$ 型と E_6 型の2つの型の大統一理論に対して異常性のある $U(1)$ ゲージ群を導入し、その真空の構造を詳しく調べ、通常の超対称大統一理論では簡単に説明できなかった、2重項のヒグス粒子が3重項のヒグス粒子より14桁も軽いという問題が、自然に説明できる事を示した。またこれらの場合について、クォークやレプトンの質量や混合角の階層性を詳しく調べ、実験的に知られているものと矛盾しない結果が得られる事を論じている。第5章では、上記の異常性のある $U(1)$ ゲージ群に加えて、クォーク・レプトンの世代間を混ぜるゲージ対称性を導入する可能性を議論している。通常の超対称大統一理論では、クォーク・レプトンの超対称パートナーの存在によってフレーバー間の大きな混合が起こり、中性カレントによってフレーバーが変わることになり実験と矛盾してしまうが、この問題も拡張されたモデルではうまく解消される可能性がある事を示している。第6章はまとめにあてられており、超対称大統一理論の今後の展望を述べている。

以上に述べたように、本論文は超対称大統一理論がもついくつかの問題点を新しいアイデアによって一挙に解決しようという野心的なものであり、いくつかの興味深い結果を得ている。また、現在は実験の分野においても超対称性が検証される段階に近づいており、本論文に述べられている内容は時宜を得たものである。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認められる。また、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。