

博士學位論文

内容の要旨及び審査の結果の要旨

第 11 号

1994年3月

京都産業大学

は し が き

本号は、学位規則（昭和28年4月1日文部省令第9号）第8条の規定による公表を目的とし、平成6年3月22日に本学において博士の学位を授与した者の論文内容の要旨及び論文審査の結果の要旨を収録したものである。

学位記番号に付した甲は、学位規則第4条第1項（いわゆる課程博士）によるものであることを示す。

目 次

1 篠原 忠臣

論文内容の要旨	1
論文審査の結果の要旨	5

氏名(本籍)	しの はら ただ とみ (京都府) 篠原忠臣
博士の専攻分野の名称	博士(物理学)
報告番号	甲第6号(学位記番号 甲理第4号)
学位授与年月日	平成6年3月22日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
論文題目	Flavor Changing Neutral Currents in Universal Seesaw Model (普遍シーソー模型に於けるフレーバー の変化を伴う中性流)
審査委員	主査 教授 曾我見 郁夫 副査 教授 坂本 吉之 // 教授 櫻井 明夫

論文内容の要旨

大統一モデルは量子電気力学から標準モデルへと発展を遂げた場の理論の系譜の先端に位置する。この発展の系譜の最も重要な指導原理は局所ゲージ不変性であり、ゲージ群を $U(1)_c$ から $SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ を経て $SU(5)$ や $SO(10)$ 等へと拡大することによって、素粒子の基本相互作用の統一に段階的に成功を収めて来た。ゲージ群の保証する高い対称性はくりこみ処方適用を可能にし、素粒子の反応過程は発散の困難を回避して原理的には任意の次数まで摂動計算することが出来るようになった。ゲージ対称性のもう一つの利点は、素粒子の分類にある。即ち、相互作用を媒介する実体は対称群の随伴表現に属するベクトル粒子と同定され、物体を構成する基本粒子は群の基本表現または低次の表現によって分類される。しかし、この方法は同じ世代に属する素粒子の分類には威力を発揮するが、異なる世代に属する素粒子をも統一するまでには至っていない。ここに、局所ゲージ不変性を指導原理として発展してきた場の理論の現在に於ける限界がある。世代内の対称性(垂直対称性)と世代間の対称性(水平対称性)の乖離を如何に超越するかが、素粒子

現象を記述する局所場の量子論が現在抱える重要な課題の一つとなっている。

申請者は、このような視点に立ち標準モデルを越える理論を構築するための試みとして、参考文献に於いて素粒子の「中統一モデル」または「段階的統一モデル」と名付けるべき一連の研究を行ってきた。そこでは、左右対称なゲージ理論の枠内で普遍シーソー機構を定式化することにより、クォーク族とレプトン族の質量スペクトルが統一的に記述された。その際、垂直対称性としてゲージ群

$$G = SU(4)_{cL} \times SU(4)_{cR} \times SU(2)_L \times SU(2)_R \times U(1)_X$$

が選ばれ、水平対称性として大域的カイラル $U(1)$ 群が仮定されている。このように対称群を拡大すると多くの場合、フレーバーの変化（異なる世代に属する素粒子の変化）を伴う中性流 (FCNC) 相互作用が生じるようになる。しかし、実験的には FCNC は存在しないか、存在する場合にも極めて小さい値しか取らないことが確認されている。また、標準モデルでは、FCNC は最低次の近似では出現しない。従って、標準モデルを越える統一理論の条件として、FCNC は実験データの許容する範囲内に押さえなければならない。申請論文の目的は、普遍シーソー機構を持ち局所ゲージ群 G と大域的カイラル $U(1)$ 群の下で不変な統一モデルに於いて FCNC を詳細に分析することにある。

基本ゲージ群 G を持つ統一モデルは部分群 $SU(4)_{cL} \times SU(4)_{cR}$ を含み、レプトンは第 4 番目のカラーフェルミオンとして記述される。また、基本群 G の対称性を自発的に降下させ素粒子の質量を生成させるために、カラー 4 重項と電弱 2 重項の左右対称なヒッグス場の対が導入され、カラー双 4 重項のヒッグス場の存在が仮定された。即ち、群 G の対称性が成り立つ高エネルギー領域ではクォークとレプトンは対等の振る舞いをするのに対し、対称性が自発的に破れるとレプトンはクォークから分離してレプトンのカラー相互作用は微弱になる。また、普遍シーソー機構は、新たに導入された大きなディラック質量を持つ電弱 1 重項フェルミオンと通常のクォークおよびレプトンの間に働く。このため、 $SU(4)_{cL} \times SU(4)_{cR}$ の基本 4 重項に属する通常のフェルミオンとそのシーソーパートナーとしての電弱 1 重項のフェルミオンとは電弱 2 重項のヒッグス場を通して結合し、クォークと荷電レプトンの質量は電弱エネルギースケール以下であることが説明可能となる。

注目すべきは、ニュートリノセクターでは普遍シーソー機構がカラーを持たない電弱 1 重項の中性フェルミオンを介して二重に作用することである。そのため、 $SU(4)_{cL} \times SU(4)_{cR}$ 対称性を破るカラー 4 重項ヒッグス場の効果と、カラーを持つ電弱 1 重項のフェ

ルミオンとカラーを持たない中性フェルミオンの効果が重複して作用することになり、ニュートリノの微小な質量を自然に説明することが可能となる。この普遍シーソー機構を二重に適用してニュートリノに微小なディラック質量を付与する方法は、他にはない独創的な着想である。dタイプのクォークと荷電レプトンの質量差は、カイラル対称なカラー相互作用を通常のベクトル的な相互作用に降下させるカラー双4重項のヒッグス場の真空期待値から生じる。このヒッグス場を三重にすることによって、拡張されたフリッチュ型の質量行列を得て、フェルミオンの変化に富む質量スペクトルや弱い相互作用のクォーク混合の特性が再現されている。また、物質中でのニュートリノ振動の分析を行い、ガリウム実験による太陽ニュートリノの捕獲率として 74 ± 12 SNU の値を得ている。この値は最新の観測値 87 ± 21 SNU と良く一致している。

標準モデルでは、FCNC は1ループ以上の補正としてのみ小さな寄与を持つ。ゲージ群 $SU(3)_c \times SU(2)_L \times SU(2)_R \times U(1)$ に基づく普遍シーソーモデルでは、通常フェルミオンと電弱1重項フェルミオンとの混合を通してFCNCがツリーレベルで生じるが、そのようなFCNCは第一シーソー近似の下で十分に抑制されることが既に示されている。申請論文で考察されたモデルでは、カラー対称性が $SU(4)_{cL} \times SU(4)_{cR}$ に拡張されたため、カラーゲージボゾンによって新たなFCNCが誘起されることになり、その構造を分析しなければならない。さらに、ニュートリノセクターに対しては、二重に普遍シーソー機構を作用させるため、FCNCの構造にも変化が現れる。

FCNCに最も厳しい制限を与える現象は、 $K_L \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 崩壊と $K^0-\bar{K}^0 (B^0-\bar{B}^0)$ 混合である。特に、 $K^0-\bar{K}^0 (B^0-\bar{B}^0)$ 混合の解析はCP問題を解決するためにも重要である。CP保存を破る崩壊 $K_L \rightarrow 2\pi$, $K_S \rightarrow 3\pi$ は、 K_L と K_S が $K^0-\bar{K}^0$ 系で定義されるCP-正の固有状態とCP-負の固有状態の混合した状態と仮定することによって説明できる。つまり、 $K^0-\bar{K}^0$ 混合の大きさを決定することで間接的にCPの破れを測定することになる。さらに最近、 B^0 と \bar{B}^0 の間に生じる混合が観測され、新しい物理を探る重要な役割を果たしている。標準モデルでは、 $K_L \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 崩壊と $K^0-\bar{K}^0 (B^0-\bar{B}^0)$ 混合に対して弱い相互作用の1ループレベルで計算された予言値は、誤差の範囲内で実験結果と良く一致する。普遍シーソーモデルでは、そのような過程は中性ゲージボゾンが媒介するFCNCのツリーレベルの効果として起こる。

申請論文では、まずフェルミオンのゲージ相互作用を質量固有状態の場を使って具体的

に表現し、質量固有状態にある各中性ゲージボゾンに対して FCNC の強さを求めている。この強さはフェルミオンの質量行列の形に密接に係っており、質量行列の形が重要な役割を演じる。論文では、湯川結合定数がエルミート ($Y_{ij} = Y_{ji}^*$) であるという要請の下で参考論文で発展させた手法に従ってシーソー近似を適用し、エルミートな拡張されたフリッチュ型の質量行列を得ている。この形の質量行列の利点は、フェルミオン場に位相変換を施すことで実になる質量行列が、フェルミオンの質量固有値と質量行列に含まれる一つのパラメータ ω を用いて対角化できる点にある。このように質量行列の型が特定される成果として、FCNC の強さとフェルミオン質量が満たす条件式を求めることが可能となる。 K^0 - \bar{K}^0 混合を記述するパラメータ ε_K は、FCNC の強さが実になるためにツリーレベルでは 0 となる。また、 $K_L \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 崩壊と B^0 - \bar{B}^0 混合の解析から FCNC の強さに制限を与えることが出来る。その結果として、右巻き W ボゾンの質量と湯川結合定数に対する制限が導出された。参考論文では、湯川結合定数の間の比に極端に大きな値を持ち込むことなく、普遍シーソー機構によってヒッグス場の真空期待値の大小関係のみからクォーク・レプトン族の質量スペクトルの特性が再現された。申請論文の解析から新たに、このモデルで FCNC が観測値以下に押さえられるための条件として湯川結合定数の値に下限が求められている。また、注目すべき成果として、ツリーレベルで FCNC が完全にゼロとなる湯川結合定数間との関係が存在することを見出している。申請論文の議論の部分では、今後の課題として、このモデルにおけるヒッグス場の性質や崩壊 $K_L \rightarrow 2\pi, 3\pi$ 過程の評価による直接的な CP の破れの研究に関する展望が述べられている。

このように、申請論文は、基本ゲージ群 G と大域的なカイラル U(1) 対称性に基づく統一モデルに於いて FCNC 相互作用が実験値と矛盾することなく抑制されるための条件として、湯川結合定数が満たすべき関係式を明確に導出した。その結果、群 G とカイラル対称性に基づく普遍シーソーモデルは、左右対称性が破れるエネルギースケールに於いて矛盾なく標準モデルへと移行し、電弱エネルギースケール以上の物理現象を記述する一つの有力な候補となることが明らかにされた。

論文審査の結果の要旨

素粒子の標準モデルは、現時点に於ける高エネルギー加速機実験のすべての結果を矛盾なく説明する優れた理論体系である。しかし他方で、太陽ニュートリノ問題や大気ニュートリノ問題のように、非加速機実験の領域に於いて標準モデルの基本要請と矛盾する現象も発見されつつある。しかも、このモデルは物質の基本構成要素と見なされるクォーク族とレプトン族の質量スペクトルに関しては、一切の予言能力を持たない。このため、標準モデルを越えんとする種々の試みが提起され、素粒子物理学は現在大きな変化を予感させる状況にある。申請者は、そのような試みとして参考文献に示されているように、素粒子の「中統一モデル」と名付けるべき一連の優れた研究を行って来た。

それらのモデルでは、高エネルギーでの基本ゲージ群がワインバーグ・サラム群から左右対称性を保持する

$$G = \text{SU}(4)_{\text{CL}} \times \text{SU}(4)_{\text{CR}} \times \text{SU}(2)_L \times \text{SU}(2)_R \times \text{U}(1)_X$$

へと拡大され、且つ標準モデルでは考慮されなかったクォーク・レプトンの世代に関する対称性として大域的なカイラル $\text{U}(1)$ 群が導入された。エネルギーの低下に伴いゲージ群 G の対称性が4段階に互って自発的に降下するが、その過程で、普遍シーソー機構が独特な形で発現する。その結果、通常の荷電フェルミオンの質量は、シーソー機構が一重に作用して電弱エネルギースケール以下の値を取る。他方、中性フェルミオン族にはシーソー機構が二重に作用する結果、ニュートリノの質量は微小な値に押さえられる。また、世代を識別するカイラル荷は質量行列がフリッチュ型になるように選ばれ、クォーク族とレプトン族の多様な質量スペクトルの特徴が再現される。このように対称群を拡大すると多くの場合、異なる世代に属する素粒子の変化を伴う中性流 (FCNC) 相互作用が生じるが、実験的には FCNC の効果は極めて小さいことが確認されている。従って、標準モデルを越える統一理論の条件として、FCNC は実験データの許容する範囲内に押さえなければならない。

申請論文の目的は、普遍シーソー機構を持ち局所ゲージ群 G と大域的カイラル $\text{U}(1)$ 群の下で不変な統一モデルに於いて、FCNC が実験結果の許容する範囲に抑制される条件を導出することにあつた。FCNC に最も厳しい制限を与える現象は、 $K_L \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 崩壊と $B^0 \cdot \bar{B}^0$ 混合過程である。それらの過程の確率振幅をツリーレベルで計算し FCNC の強さ

に対する実験データと対比することによって、右巻き W ボゾンの質量値と湯川結合定数の間に成り立つ関係式が求められた。その結果、普遍シーソーモデルで FCNC が観測値以下に押さえられるための条件として、湯川結合定数の下限値が決定された。その条件の中に FCNC がツリーレベルで完全に消滅する関係式を見出した点は特筆されるべきである。

このように、申請論文は FCNC の解析によって、「群 G とカイラル U(1) 対称性に基づく普遍シーソーモデルが、標準モデルの自然な拡張として、電弱エネルギースケール以上の物理現象を記述する理論である」ために湯川結合定数が満たすべき必要条件を決定した。

また、申請者は、平成 5 年 11 月 12 日(金)に開催された博士学位論文の公聴会に於いて良く準備した優れた発表を行い、その後の調査委員による試問に対しても的確な応答を行った。

以上の調査の結果、本調査委員会は全員一致により、申請論文を博士学位論文として十分に価値あるものと判定する。