

京都大学	博士 (工学)	氏名	樋口 勝一
論文題目	Electroweak Interaction with Singlet Quarks (電弱相互作用とシングレットクォーク)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、素粒子の電弱相互作用において、E_6 大統一理論などから存在が示唆されている新奇のシングレットクォークがもたらす素粒子物理現象について研究した結果をまとめたものであって、6章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、クォーク、レプトン、ヒッグス粒子、電磁相互作用と弱い相互作用（電弱相互作用として統合される）および強い相互作用とそれらを媒介するゲージ粒子など、素粒子物理について概観し、現在の標準模型からさらに統一理論をめざす動機について述べている。そして、本論文の主題である、電弱相互作用においてシングレットクォークが関与する物理を研究するねらいと目的を述べている。</p> <p>第2章では、素粒子の相互作用をゲージ理論により記述する標準模型について紹介している。特に、電弱相互作用においてヒッグス場による対称性の自発的破れからクォークやレプトンの質量や混合が生成されるしくみについて説明している。また、クォークの混合によってフレーバー変換荷電カレントが存在してCKM(Cabibbo-Kobayashi-Maskawa)行列で表され、ベータ崩壊などに寄与するが、フレーバー変換中性カレントは現われないことを述べている。さらに、E_6 大統一理論などでは新奇のクォークやレプトンが存在することを示し、それらが標準模型には含まれない新しい素粒子現象をもたらすことを説明している。</p> <p>第3章では、電荷$(2/3)e$を持つアップタイプのシングレットクォーク(U)、電荷$Q=-(1/3)e$を持つダウントタイプのシングレットクォーク(D)、およびシングレットヒッグスを含んだ電弱模型を考えて、クォークの質量と混合およびフレーバー変換相互作用について系統的に調べている。通常クォーク(q)とシングレットクォーク(Q)が混合する(q-Q混合)結果として、フレーバー変換相互作用が標準模型とは顕著に異なったものとなる。すなわち、荷電ゲージボソンWと通常クォークの相互作用を表すCKM行列のユニタリ性が破れ、中性ゲージボソンZおよびシングレットヒッグスと通常クォークとの相互作用にはフレーバー変換項が生じる。まず、電弱ゲージ対称性の自発的破れによって生じる通常クォークとシングレットクォークを含めた全質量行列の対角化(固有値問題)を詳細に検討することによって、クォークの質量と混合に対するq-Q混合の効果を明らかにしている。そして、この結果からフレーバー変換相互作用がq-Q混合とクォーク質量で適切に表される特定のフレーバー構造を持つことを示している。また、シングレットクォークが存在しても通常クォークの質量や混合が実験値の範囲で再現されるとともに、中性中間子の混合やCPの破れ、トップクォークの崩壊などのフレーバー変換過程に対してはq-Q混合が有意な効果を与えることを明らかにしている。さらに、以上で示したシングレットクォークによる効果を詳細な数値計算でも確かめている。</p> <p>第4章では、湯川結合の強さの普遍性のもとでのダウントタイプのシングレットクォークが果たす役割について調べている。USY機構(Universality of Strength for Yukawa couplings)では、クォークの湯川結合それぞれの絶対値を同じくし、それらの位相の差異でクォークの質量や混合が導かれる。ただし、CKM行列のCPの破れは実験事実と反して非常に小さくなることが知られている。もし、シングレットクォークが存在すれば、クォークの質量や混合に有意な効果を与えることは前章で見たとおりなので、この問題を解決することができると期待される。そこで、シングレットDクォークを含んだ電弱模型へのUSY機構の適用を考察している。その結果、期待どおり通常のダウントタイプdクォークとシングレットDクォークの混合によって、CKM行列に十分なCPの破れが得られ</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	樋口 勝一
<p>ることを明らかにしている。また、通常クォークのみの USY では、世代間の置換に対する湯川結合の近似的な対称性により、第3世代のボトムクォークとトップクォークのみが重くなり、世代間の質量の階層性は示されるが、トップクォークとボトムクォークの大きな質量比は説明されない。ここでは、d-D 混合によりボトムクォークが軽くなる一方で、シングレット U クォークが存在しないので (E_6 の 27 次元表現のように) トップクォークは重いままであることから、トップクォークとボトムクォークの質量の階層性を説明している。</p> <p>第5章では、シングレットクォークとシングレットヒッグスを含んだ電弱模型において、フレーバー変換相互作用に対する q-Q 混合の効果を詳細に分析し、今後 CERN の LHC (Large Hadron Collider) 加速器実験においてシングレットクォークが関与する TeV エネルギー領域での新しい素粒子現象について検討している。特に、これまではほとんどゲージ相互作用のみが調べられてきたが、ヒッグス粒子が媒介するスカラー相互作用の重要性も考慮した解析を行っている。まず、現在までに測定されている K、B、D 中性中間子系におけるフレーバー変換過程の実験データから q-Q 混合に対する許容範囲を求めている。そして、この実験的制限のもとで、q-Q 混合によるフレーバー変換相互作用がもたらすシングレットクォークやヒッグス粒子の崩壊様式の特徴について定量的評価を行っている。その結果、シングレットクォークがヒッグス粒子や Z ボソンに崩壊する確率が W ボソンに崩壊する確率と同程度であること、もしダブレットとシングレットのヒッグス混合があればヒッグス粒子への崩壊率が Z へのそれよりも大きくなることなどを明らかにしている。また、ヒッグス粒子が通常のクォークに崩壊する確率はクォーク混合に関係し、特に、シングレット U クォークが存在する場合には、ヒッグス粒子がトップクォークを含む終状態へ有意な確率で崩壊することも指摘している。今後、シングレットクォークやヒッグス粒子の発見が LHC 実験で期待されるので、これらの結果はそれを実験で特定するための有用な指針を与えている。</p> <p>第6章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、素粒子の電弱相互作用において、 E_6 大統一理論などから存在が示唆されている新奇のシングレットクォークがもたらす素粒子物理現象に関する研究成果をまとめたものである。特に、シングレットクォークが通常のクォークと混合することによって、標準模型には存在しないフレーバー変換相互作用が現れる。本論文では、シングレットクォークを含む電弱模型において、クォークの質量と混合およびフレーバー変換過程について詳細に調べ、今後 CERN の LHC (Large Hadron Collider) 加速器実験で期待される、TeV エネルギー領域でのシングレットクォークによる新しい物理現象について検討している。得られた主な成果は以下のとおりである。

1. クォークの質量と混合およびフレーバー変換相互作用について、通常クォーク (q) とシングレットクォーク (Q) の混合 (q - Q 混合) がもたらす効果を系統的に調べ、フレーバー変換相互作用の構造が q - Q 混合とクォーク質量で適切に表現されることを示しており、詳細な数値計算でもこのことを確かめている。この結果により、シングレットクォークが存在しても通常クォークの質量や混合が実験値の範囲で再現される一方で、中性中間子の混合や CP の破れ、トップクォークの崩壊などのフレーバー変換過程に対して q - Q 混合が有意な効果を与えることを明らかにしている。

2. USY 機構 (Universality of Strength for Yukawa couplings) では、クォークの湯川結合それぞれの絶対値を同じくし、それらの位相の差異でクォークの質量や混合が導かれるが、CP の破れは実験事実に対して非常に小さくなることが知られている。ここでは、ダウンタイプのシングレットクォークも含めて USY 機構を適用することによりクォークの混合に十分な CP の破れが与えられることを示している。さらに、これによってトップクォークとボトムクォークの質量比が非常に大きいという事実が説明できることも明らかにしている。

3. シングレットクォークとシングレットヒッグスを含んだ電弱模型において、フレーバー変換相互作用に対する q - Q 混合の効果を詳細に分析している。特に、これまではほとんどゲージ相互作用のみが調べられてきたが、ヒッグス粒子が媒介するスカラー相互作用の重要性も考慮した解析を行っている。まず、現在までに測定されている K、B、D 中性中間子系におけるフレーバー変換過程の実験データから q - Q 混合に対する許容範囲を求めている。そして、この実験的制限のもとで、 q - Q 混合によるフレーバー変換相互作用がもたらすシングレットクォークやヒッグス粒子の崩壊様式の特徴について定量的評価を行っている。これらの新粒子は今後の LHC 実験で発見が期待されるので、それを実験で特定するための有用な指針を与えている。

以上、本論文は、電弱作用においてシングレットクォークがもたらすクォーク質量と混合に対する効果およびフレーバー変換過程の特徴を明らかにし、LHC 実験においてシングレットクォークが関与する TeV 領域での新しい素粒子現象について重要な予測を与えており、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 23 年 1 月 30 日、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。