

学位論文要旨

Study of the effective field theory for the model with light and heavy scalars
(軽いスカラーと重いスカラーを含む模型の有効理論の研究)

氏名 河村 優太

標準模型は素粒子物理学の中で最も成功した理論の1つとして知られている。カミオカンデの実験でニュートリノ振動が観測されたことなどから、ニュートリノが小さい質量を持つことが明らかになった。ニュートリノが他の荷電レプトンと同様にディラック粒子である場合を考え、右手型のニュートリノを導入することでニュートリノの小さい質量を説明する場合、ニュートリノとヒッグス粒子の間の湯川結合を非常に小さくする必要はある。

2番目の新たなヒッグス粒子を導入し、ヒッグス粒子と2番目のヒッグス粒子の混合質量項を導入することで小さなニュートリノの湯川結合を仮定しなくてもニュートリノの質量を説明できる模型が提唱されている。この模型では、ニュートリノは2番目のヒッグス粒子とのみ結合しており、その真空期待値はシーソー機構のようなメカニズムで小さくなることから、小さい湯川結合を仮定しなくてもニュートリノの小さい質量を説明できる。しかし、新たに導入されたヒッグス粒子は発見されておらず、現在加速器実験で到達されているエネルギーよりも重い質量を持つ可能性がある。このような場合、加速器で新粒子を生成し検出する直接探索よりも標準模型の予言値とのずれを検出し、間接的に新粒子の効果を探索する間接探索の方法が有用な場合がある。このような立場から重い新粒子を含む模型を解析する方法として有効理論の方法が知られている。有効理論の方法では、考慮するエネルギースケールよりも重い新粒子は積分して新粒子を含まない理論を構築する。新粒子の情報は有効理論に現れる有効結合定数などに含まれており、この有効結合定数の情報から新粒子の存在を間接的に検証できるのである。そのため本研究では、有効理論の観点から、どのような新粒子の効果が現れるかを研究する。

本研究では、2種類のスカラーとニュートリノを含む簡単な模型を用いて、有効理論の観点でニュートリノの小さい質量がどのようなメカニズムで説明されるかを明らかにする。2種類のスカラーは、軽いスカラーが標準模型のヒッグス粒子に対応し、重いスカラーが2番目のヒッグス粒子に対応する。この模型では、ニュートリノは2番目のスカラーとのみ結合するが、2つのスカラーの混合質量項を通じて軽いスカラーと結合するようになる。重いスカラーを積分して有効理論を求めた結果、ニュートリノの湯川結合に小さな抑制因子(混合質量と重いスカラーの質量の比)が掛かった有効湯川結合が現れる。そのため、ニュートリノの湯川結合がオーダー1程度であっても小さな抑制因子の効果でニュートリノの小さい質量が説明可能であることが明らかになった。本研究では1ループまで量子補正を考慮した有効理論(有効ポテンシャル)を導出した。この際に有効相互作用がどのような係数で現れるか具体的に導びいた。重いスカラーを積分したことで、ニュートリノの4点相互作用項などの高次元オペレーターの寄与が現れることも明らかになった。

導出された有効ポテンシャルは繰り込みスケールを重いスカラーの質量に設定した場合、量子補正に大きな対数項が現れるので有効ポテンシャルの導出の際に用いた結合定数による摂動展開が破綻する可能性がある。この補正は軽いスカラーの寄与である。そこで、重いスカラーを積分した低エネルギーの理論に対する繰り込み群方程式を用いることで大きな対数に関して足し上げを行い、有効ポテンシャルを改善した。また、有効理論に現れる軽いスカラーの真空期待値は重いスカラーの質量に依存していることから、その真空期待値に対するループ補正が補正を考慮しない真空期待値の値に比べて大きくなり過ぎないという条件から重いスカラーの質量の上限を求めた。その重いスカラーの質量の上限を用いてニュートリノの湯川結合がオーダー1程度である場合に、ニュートリノの質量を説明するために必要な2つのスカラーの混合質量の大きさを推定した。