

前書き

最近の素粒子物理学は、巨大な加速器の発展と多くの物理学者の研究により非常に進歩してきた。そして、クォークとレプトンという基本物質がグルーオン、ウィークボゾン、光子というゲージ粒子の媒介により相互作用しているとする標準模型は、その後の新しい多くの実験によってもその正しさが確認されている。しかし、この標準模型においては、クォークとレプトンの質量を決める原理は無く、単にパラメータとして理論の中に入っている。そしてこの標準模型の中では、ニュートリノの質量は0とされていた。しかし最近、太陽ニュートリノ異常(太陽から来るニュートリノの量が、期待されるものに比べて小さくなる)が観測され、この異常を説明するために、ニュートリノに質量があるという考えが提案された。もしこの考えが正しいのであるならば、これは標準模型を越えた理論となる。

私たちが最終的に知りたいのは、クォークとレプトンの質量を決める原理であるが、その目標に近づく第一歩として、本研究では2つの問題に取り組んだ。1つ目はクォークの質量についてである。クォークは現在6種類見つかっているが、それらの質量の値には階層性があり、又それらの崩壊の仕方にも規則性がある。これらの規則性はクォーク質量の“質量行列”の規則性に帰着出来る。質量に階層性が容易に現れる模型として、ユニバーサル型(デモクラティック型)の質量行列を用いる模型があるが、我々はこれに小さな破れを入れた模型を作り、これを用いて解析を行った。これにより、クォーク質量の階層性とクォークの対称性に強い関係があることが示された。この対称性から質量を決める原理を見つけることは、これからの課題である。

2つ目は、ニュートリノ質量についての解析である。現在、Super-Kamiokande等でニュートリノ質量の探索が進行中である。我々は、これらの実験結果を解析することにより、ニュートリノには本当に質量があるのか、あるとするならばどれ位の値になるのか、又ニュートリノに質量があれば3つのニュートリノの間に混合が起こるが、その混合角はどれ位になるのかといったことを決めることを非常に詳細に行なった。解析は3世代のニュートリノの枠組みで、 $m_{12}^2 \sim m_{13}^2 \ll m_{23}^2$ という階層性を仮定して行なった。太陽ニュートリノの解析では、ニュートリノが受ける物質の効果であるMSW効果を考慮し、大角度解と小角度解の二つが見つかった。地上実験ではCHOOZなど最新の実験の結果により、 Δm_{23}^2 の許される領域の上限に厳しい制限が付いた。大気ニュートリノについては、何段階かに解析の条件を分けて、順次解析の条件を複雑にして行き、解析を行なった。解析の結果、 $\mu \leftrightarrow \tau$ 混合は大きく $e \leftrightarrow \tau$ 混合は小さいこと、 $e \leftrightarrow \mu$ 混合は大きい混合と小さい混合の両方が可能であることが示された。又 $\Delta m_{12}^2 \sim 10^{-5} \text{eV}^2$ 、 $\Delta m_{23}^2 \sim 10^{-3} \text{eV}^2$ であることが得られた。これらを基に、レプトンの質量行列について議論を行なった。

これらについて、論文ではまず第1章で標準模型における質量のメカニズムをレビューすることで、クォークやレプトンの質量や混合について理解を深める。第2章ではクォークの質量行列について、小さな破れを持つユニバーサルな湯川結合の枠組みで解析を行い破れのパラメータと質量

行列の規則性について議論している。そして、第3章でニュートリノ振動の概念について説明し、ニュートリノが質量を持つ可能性と我々の解析が何に対して行われているかということ明らかにする。そして第4章と第5章でこの論文の主題であるニュートリノ振動の解析を行ってゆく。第4章では太陽ニュートリノと地上実験のニュートリノの解析を行っている。大気ニュートリノについては何段階かの条件で特に詳しく解析を行っているので第5章に独立して書いた。大気ニュートリノの解析は非常に時間がかかるため単純な真空振動から始め、その傾向を考慮し少しずつ複雑な解析に移していったためである。具体的には真空振動の場合、地球の物質密度が一定の場合、そして地球の物質密度が変化する場合の順でまとめている。また、第6章では解析結果から K2K 実験の結果の予言を行っている。我々の解析結果が正しいのならば、K2K 実験ではっきりとしたニュートリノ振動が観測されるであろうことがここで示されている。