

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	栗林 宗一郎
論文題目	Measurement of Neutrino Oscillation Parameters with Study of Neutrino Interaction Effects (ニュートリノ振動解析におけるニュートリノ反応モデルの系統誤差の評価と振動パラメータの精密測定)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、ニュートリノ反応モデルによる系統誤差を評価・研究し、ニュートリノ振動パラメータを世界最高精度で測定した結果について報告している。ニュートリノ振動の測定は、大強度陽子加速器実験施設J-PARCでニュートリノビームを生成し295km離れたスーパーカミオカンデ検出器で測定する、T2K実験 (Tokai-to (2)-Kamioka実験) で行われた。ニュートリノ振動は、2種類以上のニュートリノが異なる質量を持ち、さらにその質量状態が弱い相互作用における反応状態と異なる場合に起こる、素粒子物理の標準模型を超えた現象である。ニュートリノは3種類存在することが分かっており、3種類間でのニュートリノ振動においては粒子と反粒子の対称性 (CP対称性) の破れを示すパラメータ δ_{CP} が測定できる。CP対称性の破れは、我々の住む宇宙が物質からなりなぜ反物質が消えたのか、を調べるための重要な研究課題である。本論文では、T2K実験でニュートリノ振動パラメータの測定精度を向上させて、CP対称性の破れを探索した。T2Kなどのニュートリノビーム実験では、精度を決めるのがニュートリノビーム量とニュートリノを測定する際に用いるニュートリノ反応モデルの信頼度である。本論文では、10年以上かけて取得したT2K実験の全データを解析することでニュートリノビーム量を最大化し、数十種類にわたるニュートリノ反応モデルの組み合わせを調査することで、測定の信頼度を向上させた。</p> <p>本論文は大きく3部構成となっている。第1部は、ニュートリノ物理のレビューに始まり、T2K実験について解説している。ここで、ニュートリノ振動パラメータを精密に測定するための問題点がまとめられていて、本研究の意義と目的が説明されている。第2部はニュートリノ振動の測定についてである。最初に、T2K実験で使用している実験装置類：加速器、ニュートリノビーム発生装置、J-PARC内に設置された前置ニュートリノ測定器、後置ニュートリノ測定器スーパーカミオカンデについて説明している。次に、ニュートリノ測定器でニュートリノがどのように反応しどう測定されるかを説明し、その反応を計算する際に必要なニュートリノ反応モデルについて記述している。最後に、ニュートリノ振動解析を説明し、ニュートリノ振動パラメータの測定結果を報告している。第3部はニュートリノ振動パラメータのより高精度な測定手法の研究と、それによる改良結果についてである。まず、ニュートリノ事象の選択方法と系統誤差の改善により、ニュートリノ振動解析を改良した。そして、ニュートリノ振動解析で使用するニュートリノ反応モデルを複数用意し、モデル毎に振動パラメータを調べることで、ニュートリノ振動パラメータの測定を更新し、その信頼度を向上させた。結果は、$\sin^2 \theta_{23} = 0.561^{+0.019}_{-0.038}$、$\Delta m_{23}^2 = 2.494^{+0.040}_{-0.057} \text{ eV}^2/c^4$、$\delta_{CP} = -1.97 \pm 0.97$で、CPが破れていないケースを90%の信頼度で除外している。最後に、今後の研究方針を示し、加速器、前置測定器、後置測定器のアップグレードについて紹介し、論文としてまとめている。</p> <p>まとめると、本論文は、ニュートリノ反応モデルによる系統誤差を評価・研究し、ニュートリノ振動パラメータを世界最高精度で測定し、CP対称性が破れている可能性を示唆する実験結果について報告している。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本学位申請論文は、ニュートリノ反応モデルのニュートリノ振動測定に与える影響について研究し、ニュートリノ振動パラメータを世界最高精度で測定し、ニュートリノにおけるCP対称性の破れを探索した、重要な結果について報告している。ニュートリノ物理の目標の一つは、ニュートリノ振動現象を高い精度で決定し、ニュートリノにおいてCP対称性が破れていることを確認し、宇宙における物質と反物質の非均衡の原因を探ることである。今回の結果は、世界最高精度でニュートリノ振動パラメータを測定して、さらにCPの破れの発見に迫っており、素粒子物理学を発展させる重要な成果と言える。

栗林氏は、最初にニュートリノ物理の研究意義、ニュートリノ振動が起こるメカニズム、ニュートリノ振動パラメータについて解説し、続いて加速器ニュートリノ実験T2Kを紹介した。T2K実験でニュートリノ振動パラメータの測定精度を制限する要素を紹介し、ニュートリノ反応モデルが振動パラメータ測定に与える影響を解説した。その影響を評価するには、複数のニュートリノ反応モデルをニュートリノ振動解析の中で取り扱うことが必要で、栗林氏が行なった研究の重要性が確認できた。また、測定精度の向上にはデータ量を増加させる必要があり、栗林氏は2010年から2020年までに取得したT2K実験の全データを解析し、さらに事象選択手法を改善することで、最大限の統計量を利用した結果となっている。その結果は、世界最高精度でニュートリノ振動パラメータを測定し、その中でCP対称性の破れを示すパラメータの値 $\delta_{CP} = -1.97 + 0.97i$ はCPが破れていない場合の値0と π から有意に離れており、90%の信頼度でCPの破れが示された。ただし、CPの破れの確立には更なる精度向上が必要で、その向上のために、ハイパワーニュートリノビームの生成計画、より高精度なニュートリノ測定器を使ったニュートリノ反応の測定、より大型のニュートリノ測定器ハイパーカミオカンデ、について説明し研究の将来性を示している。論文は、導入から結論に至るまで、論旨がはっきりしており、本人の理解の深さが読み取れる。

本研究のニュートリノ振動の測定は国際共同実験T2K全体の結果ではあるが、その結果を導き出すのに貢献した栗林氏の活躍が確認できた。特に、ニュートリノ振動解析における系統誤差の評価のために、何十通りにもわたるニュートリノ反応モデルの組み合わせを調査したことは特筆すべきである。その結果、振動パラメータの一つである $|\Delta m_{23}^2|$ には有意な誤差増加が確認され、系統誤差の再評価が行われた。しかし、 δ_{CP} には有意な誤差増加は確認されず、CPの破れの測定の信頼度が向上した。本論文で報告されている物理解析において、栗林氏の高い能力を判断した。以上のように、T2K実験という国際共同研究の成果による本論文の結果に対し、栗林氏の貢献は大きいと判断した。また、この結果は、ニュートリノ物理学全体の進展に結びつき、宇宙創生の起源の解明に重要な一歩となると判断した。

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る。また、2023年11月14日に、論文内容とそれに関連した事項について試問を行い、栗林氏は多くの質問にも的確に解答した。その結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降