

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	安留 健嗣
論文題目	Search for leptonic CP violation using measurements of neutrino oscillations and neutrino-nucleus interactions (ニュートリノ振動およびニュートリノ反応の測定を用いたレプトンにおける CP 対称性の破れの探索)		
(論文内容の要旨) 本論文は、加速器ニュートリノビームを使ってニュートリノ振動を世界最高精度で測定し、レプトンにおける粒子と反粒子の対称性 (CP対称性) の破れを探索した実験結果について報告している。 ニュートリノ振動は、現代の素粒子標準模型を超えた新現象であり、宇宙創世の起源に関わっている可能性があり、素粒子物理学の発展に極めて重要な研究テーマである。ニュートリノ振動の測定において、加速器ニュートリノビームを使った実験は、実験条件を最適化することで測定精度が良いこと、ニュートリノの反粒子である反ニュートリノをビームとして利用できることでCP対称性の破れを直接精査できることが、特徴である。本論文で報告しているT2K実験 (Tokai-to(2)-Kamioka実験の略) は、茨城県東海村にある大強度陽子加速器J-PARCでミュー型ニュートリノビームを生成し、そこから295km離れた岐阜県飛騨市神岡町にあるスーパーカミオカンデ測定器で測定する。T2K実験では、ミュー型ニュートリノが電子型ニュートリノに振動する過程とそのCP対称となる反ミュー型ニュートリノが反電子型ニュートリノに振動する過程を詳細に比較することで、CP対称性を現在世界最高感度で探索している。T2K実験でのニュートリノ振動の測定における重要な課題は2つあり、1つ目は大強度のニュートリノビームの長期間の照射で統計を増やすこと、2つ目はニュートリノと原子核の反応を正確に理解してニュートリノを測定すること、である。本論文ではこの2点について、10年以上にわたる長期間に取得された全ニュートリノデータを使ってニュートリノ振動解析を行った結果と、新たに作製した測定器WAGASCI-BabyMINDを活用してニュートリノ反応断面積を測定した最初の結果、について報告している。 論文は大きく3部構成となっている。第1部では、ニュートリノ物理のレビューとT2K実験について解説している。特にレビューの中では、ニュートリノ物理における未解決問題と解決に向けた課題を的確に指摘している。T2K実験の説明において、J-PARC加速器の紹介、ニュートリノビーム生成装置、ニュートリノ測定装置、T2K実験のデータ収集の経緯、について解説している。第2部はニュートリノ振動解析結果についてであり、本論文の主要部である。スーパーカミオカンデにおけるニュートリノ測定に新しい事象サンプルを追加して統計量を増加させたこと、ニュートリノ反応由来の系統誤差の取り扱い方法を改善したことで結果の信頼度を向上できたこと、が説明されている。そして、その結果、現時点では世界最高精度でニュートリノ振動パラメーターの精密測定が実現した。CP対称性の破れを示すパラメータ δ_{CP} の値は、CP対称性が破れている範囲にある可能性が95%以上の確率であった。第3部は、新しいニュートリノ反応断面積測定の結果と、その測定がニュートリノ振動測定の改善に与える影響への考察である。J-PARC内に新たに新型ニュートリノ測定器WAGASCI-BabyMINDを設置、運転し、ニュートリノと水の反応断面積を高精度で測定した。ニュートリノにおける水との反応測定の精密データは乏しく、世界から注目される測定となっている。			

以上、本論文の結果は、ニュートリノ物理学を発展させた、素粒子物理学における非常に重要な結果である。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本学位申請論文は、加速器ニュートリノ実験T2Kにおけるニュートリノ振動測定の最新結果について発表している。素粒子物理学におけるニュートリノ研究の大目標の一つは、ニュートリノ振動現象の全貌を解明し、ニュートリノにおいて粒子と反粒子間の対称性 (CP対称性) が破れているかを精査することである。本研究では、ニュートリノ振動パラメータを世界最高精度で測定して、更に新しいニュートリノ検出器を使ったニュートリノ反応断面積の測定を合わせて、レプトンにおけるCP対称性の破れを探索した。本論文の結果は素粒子物理学を発展させる重要なものである。

安留氏は、素粒子物理学におけるニュートリノ研究の意義を紹介し、その後ニュートリノ研究における未解決問題とその課題を詳しく説明した。そして、その課題の解決に向けて進められているT2K実験を紹介し、安留氏が行ったニュートリノビームモニターMUMONの運用、データ解析、測定について丁寧に説明した。ビームモニターMUMONはT2K実験の中で必要不可欠の実験装置の一つであり、T2K実験グループにおける安留氏の活躍の重要性が理解できた。この論文の基礎となるデータは2010年から2021年まで取得され、その全データを使ったニュートリノ振動解析について報告された。振動解析では、ニュートリノ反応の系統誤差の取り扱いが改良され、その信頼度を向上させたことが新しい取り組みであった。その結果、ニュートリノ振動パラメータを世界最高精度で測定し、ニュートリノ振動においてCP対称性が95%以上の確率で破れている可能性があることを報告した。さらに、ニュートリノ振動測定の更なる精度向上にはニュートリノ反応断面積の測定精度を上げることが重要であることを指摘し、新たに導入されたニュートリノ検出器WAGASCI-BabyMINDを使ったニュートリノ反応断面積の最初の測定結果についても報告した。論文は付録部分を加えると300ページを超える大作であり、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た。

安留氏が行ったニュートリノ振動の測定は、国際共同研究 (T2K実験グループ) 全体の結果であるが、その結果を導き出した安留氏の実力は本物と判断した。特に、本論文で報告されているニュートリノ振動パラメータの高精度測定とニュートリノ反応断面積測定の新結果において、安留氏の大きな貢献が見てとれた。本ニュートリノ実験の難しい点は、ニュートリノが原子核との反応を通してしか観測できないため、ニュートリノと原子核の間の反応を正確に理解することがニュートリノ振動測定に必要となる。安留氏はこの点において、ニュートリノ振動測定におけるニュートリノ反応由来の系統誤差の改善と新しいニュートリノ反応断面積測定という手法により、研究を大きく進展させた。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、安留氏の貢献は非常に大きいと判断した。安留氏の活躍により、T2K実験が世界最高レベルでニュートリノ振動を研究できたと言っても過言ではない。さらに、この結果は、ニュートリノ物理学全体の進展、さらに素粒子物理学の進展に結びつくことも間違いない。

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9月12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、安留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： 2023 年 12 月 1 日以降