

( 続紙 1 )

京都大学	博士 ( 理学 )	氏名	平本 綾美
論文題目	Measurement of Neutrino Interactions on Water using Nuclear Emulsion Detectors 原子核乾板検出器を用いた水標的ニュートリノ反応の測定		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、原子核乾板を使った新しいニュートリノ実験で、加速器からのニュートリノビームと水との反応を高精度で測定した結果について報告している。ニュートリノ反応の理解はニュートリノ振動研究の進展に必要不可欠であり、本論文はそのための重要な結果である。</p> <p>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、ニュートリノの性質、特にニュートリノ質量とその混合を理解するために、世界各国で精力的に研究が進んでいる。その中で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良い測定精度が達成できること、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することで粒子と反粒子の対称性の破れ (CP対称性) を探索できること、から注目されている。加速器ニュートリノ振動実験でもっとも懸念されている系統誤差がニュートリノ反応の不定性であり、本論文の研究目的はこのニュートリノ反応の不定性の削減である。</p> <p>本論文では、茨城県東海村にある大強度陽子加速器J-PARCで (反) ミュー型ニュートリノビームを生成し、J-PARC内に新たに製作した検出器でニュートリノビームと水との反応をこれまでにない感度で測定した。水を標的に使う理由は、同じくJ-PARCで行われているニュートリノ振動実験T2Kの測定器スーパーカミオカンデが水を標的としているためである。本論文では、原子核乾板という実験技術を使うことで、これまで測定できなかった低運動量の荷電粒子 (陽子で200MeV/c) の検出に成功し、ニュートリノ反応の精密な理解に向けて大きな一歩を進めた。</p> <p>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とT2K実験の解説である。ニュートリノ物理のレビューでは、ニュートリノ反応の物理とその物理モデルについて丁寧に解説し、本研究の意義を十分に説明している。また、平本氏はT2K実験もおこなっており、T2K実験で責任を持っていたニュートリノビームの測定について説明している。第2部は原子核乾板を使ったニュートリノ反応実験NINJAの物理結果についてである。氏が自身で開発したシンチレーションファイバートラッカー測定器の説明を含め、NINJA実験の解析方法、シミュレーションによる検出効率の計算、系統誤差の評価方法と、細部にわたり詳細に説明されている。その成果として、NINJA実験はニュートリノと水との反応で生成された陽子や荷電<math>\pi</math>中間子を、これまでにない低運動量領域まで測定することに成功した。実験結果は、ニュートリノ反応断面積、生成された荷電粒子の多重度測定、その運動量測定であり、ニュートリノ反応の理解を進める重要な物理量を決定した。第3部は今回の測定結果を元に、NINJA実験で将来達成できる物理感度を見積もり、更にT2K実験で如何に系統誤差を改善するかを考察している。NINJA実験の特徴はその測定量が多数あることで、平本氏は機械学習を用いた多変数解析手法を開発し、その解析を実行した。本論文は、ニュートリノ反応とニュートリノ振動の研究において非常に重要な結果であり、素粒子物理学において重要な結果である。</p> <p>まとめると、本論文は、ニュートリノビームと原子核乾板を使った新しい実験手法によりニュートリノと水との反応過程を高感度で測定した、ニュートリノ振動研究において重要な結果となっている。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本学位申請論文は、加速器ニュートリノ実験 (NINJA実験) 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) が破れているか精査することである。今回、本論文では、そのニュートリノ研究に必要なニュートリノと原子核との反応を高感度で測定し、その測定結果を元にしたニュートリノ振動測定の精度向上について報告している。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。

本論文で平本氏は、素粒子物理学におけるニュートリノ研究の意義を明確に説明し、その後ニュートリノ振動の物理とニュートリノ・原子核反応の物理について詳しく解説している。そして、加速器とニュートリノビーム発生装置、T2K実験の測定装置、NINJA実験の測定装置を順に紹介している。NINJA実験では、時間情報を持たない原子核乾板という装置の弱点を補うために、氏が設計・開発したシンチレーションファイバトラッカーを紹介し、そのデータ解析の方法について丁寧に説明している。物理解析の説明は、発表論文にない内容まで詳細に記述されており、圧巻である。本論文の実験データは、平本氏が中心となり2017年と2018年に取得したものである。ニュートリノ反応の解析では、水でのニュートリノ反応の選別、ニュートリノ反応で生成した粒子の飛跡構築、飛跡の粒子識別、のアルゴリズムが新しく開発された。その結果、水とのニュートリノ反応で生成した荷電粒子の運動量を陽子で200 MeV/cまで観測することに成功した。これまで水とのニュートリノ反応で200 MeV/cの低運動量まで陽子を観測した実験はなく、世界初の結果である。また同様に、低運動量まで荷電 $\pi$ 中間子の運動量分布も測定しており、ニュートリノ反応モデルの修正に迫る興味深い結果となっている。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。

平本氏がおこなったニュートリノと水との反応測定は、共同研究 (NINJA実験グループ) の結果であるが、その結果を導き出した平本氏の実力は本物である。特に、本論文で報告されている、測定器の設計・開発と解析方法の開発から、平本氏の高い能力が判断できる。ニュートリノ実験が難しい点は、ニュートリノという素粒子が弱い相互作用しかしないため、その反応率が極端に小さいことにある。加速器ニュートリノビームで毎秒100兆個のニュートリノを生成しても、J-PARC内に設置された10kgのニュートリノ測定器で観測にかかるのは1秒あたりわずか0.01個程度である。このために、実験においては、強力なニュートリノビームと、その反応事象を高い感度で正確に測定する検出器が必要となる。平本氏はこの点において、原子核乾板で水標的を挟み、さらに時間情報を付加するシンチレータ検出器を開発することで、新しい測定手法を確立した。以上のように、NINJA実験という共同研究の成果による本論文の結果に対し、平本氏の貢献は非常に大きいと判断した。平本氏の活躍により、NINJA実験が最初の物理成果を発表し、さらに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ていると言っても過言ではない。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いたことも間違いない。

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、令和3年1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、平本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： 2021 年 4 月 1 日以降