

論文審査の結果の要旨

氏名 徐 嘉明

本論文は全 8 章からなり、大強度陽子加速器施設 J-PARC で生成されたニュートリノビームを、水チェレンコフ地下ニュートリノ観測装置である Super-Kamiokande を用いて測定する T2K 実験を用いて、ニュートリノ振動現象を通じて、標準理論を超える「反応しない」ニュートリノであるステラルニュートリノの探索を行ったものである。

第 1 章は、ニュートリノ発見の歴史的背景に始まり、ニュートリノ質量の発見につながった標準理論ニュートリノ振動測定について、測定の現状を述べる。その後、標準模型にある 3 種類のニュートリノ混合だけでは説明できない実験的示唆があったこと、標準理論の拡張にステラルニュートリノを含むものがしばしばあり、これらが素粒子物理学・宇宙論的な見地から重要な役割を果たす可能性があることなど、不活性ニュートリノとも呼ばれるステラルニュートリノの実験的・理論的背景が述べられる。

第 2 章は、理論的背景を記述しており、ニュートリノ振動モデルについて、標準理論にある 3 フレーバー混合モデルをまず示す。この混合モデルに含まれるパラメータである混合角と二乗質量差について、各種の実験結果を交えながら測定の現状を概観する。また、CP 破れ位相の測定など、測定の精度がまだ悪いパラメータについても測定の現状を述べる。その後、ステラルニュートリノの理論的背景、そしてそれが導入される代表的な例である type-I Seesaw 機構を紹介し、標準理論に含まれる 3 種のニュートリノに 1 つのステラルニュートリノを加えた場合の振動確率を示す。この振動確率が本論文の解析に使用される。

第 3 章は、J-PARC にある大輝度ニュートリノビームと Super-Kamiokande を組み合わせた長基線ニュートリノ振動実験である T2K(Tokai-to-Kamioka)実験について概観する。その後、本論文に使用されるニュートリノ事象とそのモンテカルロシミュレーションについて記述する。

第 4 章以降が本研究の具体的な内容となる。まず、第 4 章に本解析に使用されたニュートリノ事象の記述がある。本論文には 22.3×10^{20} POT (proton-on-target; ニュートリノ生成に持ちいられた標的に入射した陽子の数) が用いられ、うち 14.7×10^{20} POT がニュートリノビーム、 7.6×10^{20} POT が反ニュートリノビームである。ニュートリノ相互作用のうち、本解析にはミュオンニュートリノ荷電カレント事象 ($\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p$)、電子ニュートリノ荷電カレント事象 ($\nu_e + n \rightarrow e^- + p$ など)、中性カレント事象 ($\nu + X \rightarrow \nu + X + \pi^0$ など) が用いられており、これらについて事象選別の詳細が述べられる。

第 5 章において、これらの事象に最尤法を適用してステラルニュートリノ振動モデルパラメータに制限を加えるための解析フレームワークが記述される。事象別の分布関数の定義、モンテカルロシミュレーションを用いた予測される分布の導出、そして統計誤差を含めた最尤関数の定義を行う。また、系統誤差部分について、誤差要因が詳細に記述される。

第 6 章に、本解析を適用した際に統計的に予想される実験感度が議論される。本解析手法と、モンテカルロシミュレーションをもとに、期待されるステラルニュートリノ振動パラメータに与える制限が計算されている。

第 7 章に本解析の結果が述べられる。まず、ステラルニュートリノを含まない振動解析の結果が示され、これが T2K 実験グループから発表された先行研究と一致することが示される。その後ステラルニュートリノ振動解析の結果が示される。本解析により、 $\Delta m_{41}^2 < 3 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ の領域で $\sin 2\theta_{24}$ に世界最高感度での制限が加えられ、また $\Delta m_{41}^2 = 0.1 \text{ eV}^2$ において $\sin 2\theta_{24} > 0.1$ かつ $\sin 2\theta_{34} > 0.5$ の領域が排除される。

第 8 章が最終章であり、本論文のまとめのほか、T2K 実験を含めた将来計画とその見通し、それにより予想されるステラルニュートリノ振動探索の改善について述べる。

本研究は T2K 実験においてはじめて長基線ステラルニュートリノ振動探索を行ったものであり、今までは排除されていなかったパラメータ空間を排除するなど、世界的にも先端研究と認められる、学術的価値の高いものである。

なお、本研究は国際共同実験 T2K の研究として行われており、特に第 3 章と第 4 章については、その共同実験グループによる研究の記述がなされる。しかし、第 4 章の一部に記述される Neutral current 事象の選別と検証、第 5 章以降のステラルニュートリノ振動解析について、論文提出者が主体的に解析・検証を行ったものであり、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士 (理学) の学位を授与できると認め、審査委員全員で合格と判定する。