

氏 名 西森 早紀子

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2651 号

学位授与の日付 2026 年 3 月 24 日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 素粒子原子核専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Study of neutral hadron yields by 31 GeV/c proton + 90 cm
carbon interactions for precise neutrino flux prediction in
long baseline neutrino oscillation experiments

論文審査委員 主 査 坂下 健
素粒子原子核コース 教授
三原 智
素粒子原子核コース 教授
野村 正
素粒子原子核コース 准教授
関口 哲郎
素粒子原子核コース 准教授
中平 武
素粒子原子核コース 教授
石塚 正基
東京理科大学 創域理工学部 教授

博士論文の要旨

氏 名：西森 早紀子

論文題目：Study of neutral hadron yields by 31 GeV/c proton + 90 cm carbon interactions for precise neutrino flux prediction in long baseline neutrino oscillation experiments

A reliable estimation of the accelerator neutrino beam flux is a fundamental requirement for precise neutrino oscillation measurements, in particular for searches for CP violation in the leptonic sector. In long-baseline neutrino oscillation experiments, the uncertainty on the neutrino flux constitutes one of the dominant contributions to the total systematic uncertainty on the extracted oscillation parameters. Since accelerator neutrinos are produced from the decays of hadrons generated in proton-nucleus interactions, an accurate measurement of hadron production processes is essential for reducing these uncertainties.

In the Tokai-to-Kamioka (T2K) experiment, a high-intensity muon neutrino beam is produced using 31 GeV/c protons hitting a 90 cm long graphite target. The neutrino beam is dominated by muon neutrinos originating from the decays of charged pions and kaons. In addition to the dominant muon neutrino component, the beam contains a subdominant but non-negligible fraction of electron neutrinos. This intrinsic electron neutrino component represents an important background in electron neutrino appearance measurements, and its uncertainty must be minimized to achieve high sensitivity to CP violation. A major contribution to the electron neutrino flux uncertainty arises from limited knowledge of neutral kaon production, in particular from decays of long-lived neutral kaons (K^0_L), which significantly contribute to the electron neutrino flux at the far detector. Precise measurements of neutral kaon production are therefore essential for reducing the electron neutrino flux uncertainty. In addition to neutral kaons, the production of strange baryons, especially Lambda particles, also plays an important role in neutrino flux predictions. Lambda baryons contribute indirectly to the neutrino flux through secondary processes, including their decays into protons and charged pions, which subsequently produce neutrinos through further hadronic and leptonic decays. Furthermore, Lambda production is strongly correlated with strange particle production mechanisms in hadronic interaction models. As a result, improved constraints on Lambda production lead to more reliable predictions of anti-muon neutrino components in accelerator-based neutrino experiments.

The NA61/SHINE experiment is a fixed-target experiment at the CERN Super Proton Synchrotron designed to provide precision measurements of hadron production for

neutrino beam experiments such as T2K. To closely replicate the conditions of the T2K neutrino beamline, NA61/SHINE employs a T2K replica target that is identical in material, geometry, and length to the actual production target used in the T2K experiment. Data collected with this replica target in 2009 and 2010 significantly reduced the uncertainties on the muon neutrino and anti-muon neutrino flux predictions in T2K to approximately 5 percent. However, the statistical precision of those datasets was insufficient to perform detailed measurements of neutral kaon and Lambda production. To overcome this limitation, a new high-statistics data-taking campaign was conducted in 2022 using the T2K replica target. This campaign collected approximately an order of magnitude more events than the earlier measurements, providing a substantially improved dataset for studies of rare and previously poorly constrained hadronic processes. The present work is based on the 2022 dataset.

A comprehensive calibration of the NA61/SHINE detector systems relevant for hadron reconstruction was performed to achieve the required level of precision. This calibration includes timing calibration of the Time Projection Chambers, drift velocity determination, alignment of the TPCs, and precise alignment of the Beam Position Detectors. These procedures ensure accurate reconstruction of charged-particle tracks and reliable determination of hadron production vertices at the target surface.

Using the fully calibrated dataset, detailed measurements of K⁰S and Lambda production were carried out as functions of particle momentum and emission angle at the target surface. The analysis focuses on providing new experimental constraints on strangeness production in proton-carbon interactions at 31 GeV/c. These measurements directly address key sources of uncertainty in current hadronic interaction models used for neutrino flux predictions. The results presented in this work are expected to significantly improve the modeling of neutral kaon and Lambda production in neutrino beam simulations. In particular, they will contribute to a substantial reduction of the systematic uncertainties associated with the anti-muon neutrino flux in future T2K oscillation analyses. More generally, these measurement results provide important knowledge for next-generation long-baseline neutrino experiments. These experiments require further improvements in flux measurement precision to maximize the detection sensitivity for CP violation in the lepton sector.

Results of the Doctoral Thesis Defense

博士論文審査結果

Name in Full

氏名 西森 早紀子

Title

論文題目

Study of neutral hadron yields by 31 GeV/c proton + 90 cm carbon interactions for precise neutrino flux prediction in long baseline neutrino oscillation experiments

本論文は、長基線ニュートリノ振動実験におけるニュートリノフラックス予測精度の向上を目的とし、31GeV/c 陽子と炭素標的との相互作用により生成される中性ハドロン生成量の精密測定に関する研究成果をまとめたものである。ニュートリノ振動の研究、特にレプトンセクターにおける CP 対称性の破れ探索においては、ニュートリノフラックスの不確かさが主要な系統誤差要因の一つであり、その低減は極めて重要な課題である。長基線ニュートリノ実験では、ニュートリノは陽子と標的との間の原子核相互作用により生成されたハドロンの崩壊を通じて生成されるため、ハドロン生成過程の理解がフラックス予測精度を支配する。本論文では、T2K 実験において用いられるニュートリノビームを念頭に、特に電子ニュートリノ成分および反ミューオンニュートリノ成分の系統誤差低減に重要な役割を果たす中性 K 中間子および Λ 粒子の生成に着目している。

本研究は、CERN SPS における固定標的実験 NA61/SHINE において、T2K 実験の標的と同一長さ・材質を持つレプリカ標的を用いて取得された 2022 年の高統計データに基づいて行われた。出願者は、この新たに取得された大規模データセットを解析するため、TPC のタイミング校正、ドリフト速度校正、検出器アラインメント、ビーム位置検出器の位置校正など、ハドロン再構成に不可欠な検出器校正を包括的に実施し、高精度なトラック再構成を可能にした。校正されたデータを用いて、出願者はこれまで測定が困難であった中性 K 中間子および Λ 粒子の生成量について初めて詳細な測定を行い、ストレンジネス生成に関する新たな制約を与えた。特に、中性 K 中間子の崩壊が電子ニュートリノ成分の主要な起源の一つであること、また Λ 生成がその崩壊から陽子とパイ中間子が反ミューオンニュートリノを生成することから、これらのニュートリノフラックス予測の系統誤差低減に直接的に寄与するものである。

本論文で得られた結果は、将来の T2K 実験におけるニュートリノ振動解析の精度向上に資するのみならず、HyperKamiokande 実験においても有用な基礎データを提供するものと評価できる。ハドロン生成測定、検出器校正、物理解析、そして今後に向けた議論を一貫して遂行した出願者の研究遂行能力および学術的貢献は高く評価される。

以上の理由から、本委員会は、本論文がニュートリノ物理および加速器実験における学術的価値を十分に有し、博士論文として要求される水準を満たしていると判断する。よって、本論文は博士(理学)の学位授与に値するものと認める。