



Doctoral Thesis

Study of ν and $\bar{\nu}$ flavor oscillations at the T2K experiment and impact on the δCP phase determination within the 3- ν paradigm

Author(s):

Sgalaberna, Davide

Publication Date:

2016

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010680436> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH NO. 23350

**Study of ν and $\bar{\nu}$ flavor oscillations
at the T2K experiment and impact
on the δ_{CP} phase determination
within the 3- ν paradigm**

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

Davide Sgalaberna

Laurea Magistrale in Fisica, Università di Bologna

born on 15.04.1986

citizen of Italy

accepted on recommendation of

Prof. Dr. André Rubbia, examiner

Prof. Dr. Günther Dissertori, co-examiner

2016

Abstract

T2K (Tokai-to-Kamioka) is a long baseline neutrino oscillation experiment in Japan which goal is to precisely measure the parameters θ_{23} , Δm_{32}^2 and θ_{13} of the PMNS matrix in the context of the 3-neutrinos paradigm and to search for a hint of CP violation in the leptonic sector. The only way to search for CP violation is looking for differences between $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ and $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ oscillations. Furthermore T2K aims to observe for the first time $\bar{\nu}_e$ appearance in a $\bar{\nu}_\mu$ beam, which is predicted by the theory but never observed so far.

A muon neutrino beam is produced at the J-PARC Main Ring (MR) accelerator that provides a 31 GeV/c proton beam interacting on a 90 cm long graphite target. The collisions produce hadrons, mainly charged pions and kaons, that further decay into ν_μ with a contamination of ν_e below 1%. In order to produce a $\bar{\nu}_\mu$ beam the polarity of the magnet is inverted and $\bar{\mu}$'s are focused instead of μ 's. The neutrino beam is first detected by the near detector complex (ND280) located about 280 m downstream of the hadron production target, where neutrinos have not enough time to oscillate, then by the far detector Super-Kamiokande (Super-K), a 50 kt water Cherenkov detector located at a distance of about 295 km from the neutrino production point. The direction of the neutrino beamline is 2.5° off the axis between the target and the far detector. This configuration produces a narrow-band neutrino beam with a peak energy of about 0.6 GeV at the far detector, which is exactly on the first $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ oscillation maximum. ν_μ ($\bar{\nu}_\mu$) disappearance and ν_e ($\bar{\nu}_e$) appearance can be probed by comparing the neutrino flux prediction, based on the measurement at ND280, to the observed flux at Super-K.

T2K is collecting both neutrino and antineutrino data and for the first time is attempting to look for CP violation in the leptonic sector by directly comparing neutrino and antineutrino oscillations. Furthermore T2K has a very good sensitivity to ν_μ disappearance and can provide the best measurements of θ_{23} and Δm_{32}^2 .

In order to perform precision measurements of the oscillation parameters, the reduction of the systematic uncertainties is critical. The largest source of uncertainty comes from the poor knowledge on the neutrino flux prediction, dominated by the uncertainty on the production of the parent hadrons that further decay into neutrinos. The flux estimation is based on hadron production models that provide flux predictions with discrepancies up to about 30%. In order to reach the goals of T2K, the hadron production is measured with the NA61/SHINE (SHINE = SPS Heavy Ion and Neutrino Experiment), a multi-purpose fixed target experiment at the CERN SPS. Interactions of incoming 31 GeV/c protons on carbon are measured with a 2 cm thin target, 4% of the nuclear interaction length, in order to study the primary interactions and measure the total hadron production cross section, and a 90 cm long target ($1.9\lambda_L$), a replica of the one used in T2K, needed to reproduce the same configuration and measure both the secondary and tertiary hadron re-interactions. Spectra of the produced π , K , p , λ^0 as well as the total hadron production cross section were measured. In 2007 a low statistic pilot run has been

conducted with the thin and the replica target in order to test the analysis method. The measured spectra were used to tune the T2K neutrino flux prediction. The detector underwent many updates in 2008 and new data were collected in 2009, increasing the statistics approximately by a factor 10. This allowed to drastically reduce the uncertainty on the T2K neutrino flux prediction.

In the context of 3-neutrino oscillations, the near detector is used to measure the un-oscillated neutrino flux, reducing both the flux and cross section systematic uncertainties. However searches for new physics can be performed as well. There exist several experimental anomalies that could be explained as short baseline neutrino oscillations. There are different scenarios of new physics that could justify these unexpected observations, like the existence of sterile neutrinos that can be accommodated in an extended version of the 3-neutrino framework. Sterile neutrinos do not interact via the electroweak force and cannot be directly detected. If they have a mass of the order of $1\text{eV}^2/c^2$, they could undergo oscillations with standard neutrinos (ν_e , ν_μ and ν_τ), detectable by short baseline detectors like ND280 by looking for a deficit or an excess of neutrinos with respect to the prediction.

This thesis is focused on the search for short baseline neutrino oscillations, consistent with the existence of sterile neutrinos, at the near detector as well as the measurement of long baseline 3-flavor oscillations at the far detector, with a particular emphasis to the search for $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ appearance and CP violation in the leptonic sector. The goal is to test the validity of the 3-neutrino framework and precisely measure the oscillation parameters as well as search for the first hint of CP violation.

I started my Ph.D. working in the NA61/SHINE experiment and I measured the total hadron production cross section of proton-carbon interactions at the T2K energy, with the high statistics 2009 run data. This measurement is not only indispensable for T2K but is also of great interest on its own right, since it can be compared to analogue measurements from other experiments helping in the understanding of the theoretical models of particle interactions.

Then I joined the ND280 electron neutrino working group at T2K and I performed the search for short baseline electron neutrino disappearance in the context of an extended framework with one additional sterile neutrino. The analysis result, for which a paper has been written [136], is presented.

Finally I worked in the oscillation analysis working group at the far detector. My first work was to search for standard $\bar{\nu}_e$ appearance in a $\bar{\nu}_\mu$ beam, not yet observed so far. This measurement is very interesting because it is the first step toward the search for CP violation which can be studied by looking for differences between $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ and $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ oscillations. Finally I performed the first search for CP violation where both neutrino and antineutrino data were simultaneously analyzed.

The first chapter of the thesis provides an introduction to the theory of neutrino physics, in particular neutrino oscillations. A review of the most important discoveries and experiments about neutrinos is given as well. In the second chapter the T2K experiment is described as well as the requirements for a precise knowledge of the neutrino beam. In the first part of the third chapter the NA61/SHINE experimental setup is described, while in the second part the measurement of the hadron production cross section is shown. The result of the search for short baseline ν_e disappearance at the T2K near detector is shown in the fourth chapter, while in the last three chapters the 3-flavor neutrino oscillation analyses performed at the far detector are presented.

Sommario

T2K (Tokai-to-Kamioka) è un esperimento situato in Giappone che studia le oscillazioni di neutrini a grande distanza, con l'obiettivo di misurare con precisione i parametri θ_{23} , Δm_{32}^2 e θ_{13} della matrice PMNS nel contesto del paradigma dei 3 neutrini e cercare un primo segnale di violazione di CP nel settore leptonic.

L'unico modo per osservare la violazione di CP è trovare differenze tra le oscillazioni $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ e $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$. Inoltre T2K punta ad osservare per la prima volta l'apparizione di $\bar{\nu}_e$ in un fascio di $\bar{\nu}_\mu$, predetto dalla teoria ma mai osservato finora.

Un fascio di neutrini muonici viene prodotto dall'acceleratore circolare principale a J-PARC che fornisce un fascio di protoni di 31 GeV/c, che interagiscono in una targhetta di grafite lunga 90 cm. Le collisioni producono adroni, in gran parte pioni e kaoni carichi che in seguito decadono in ν_μ con una contaminazione di ν_e minore dell' 1%. Un fascio di $\bar{\nu}_\mu$ viene prodotto invertendo la polarità del magnete, in modo da focalizzare i $\bar{\mu}$ piuttosto che i μ . Il fascio di neutrini viene rivelato prima dal rivelatore vicino (ND280), che si trova a circa 280 m di distanza dalla targhetta di produzione degli adroni, dove i neutrini non hanno abbastanza tempo per oscillare, poi dal rivelatore lontano, Super-Kamiokande (Super-K), composto da 50 kt di acqua che sfrutta la tecnologia Cherenkov ed è situato a circa 295 km dal punto di produzione dei neutrini. Il fascio di neutrini viene prodotto in una "beamline" la cui direzione è di 2.5° rispetto l'asse che congiunge la targhetta ed il rivelatore lontano. Questa configurazione produce un fascio di neutrini con uno spettro di energia molto stretto ed un picco a circa 0.6 GeV al rivelatore lontano, esattamente sul primo massimo di oscillazione di $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$. La sparizione di ν_μ ($\bar{\nu}_\mu$) e l'apparizione di ν_e ($\bar{\nu}_e$) può essere provata confrontando il flusso di neutrini predetto, in base alle misure eseguite al rivelatore vicino, e quello osservato a Super-K.

T2K sta accumulando dati sia di neutrini che antineutrini e per la prima volta sta tentando di osservare la violazione di CP nel settore leptonic confrontando direttamente oscillazioni di neutrini e antineutrini. Inoltre T2K ha un'ottima sensibilità alla sparizione di ν_μ e può fornire le migliori misure di θ_{23} e Δm_{32}^2 .

Per poter ottenere una misura precisa dei parametri di oscillazione, la riduzione delle incertezze sistematiche è fondamentale. La maggior fonte di incertezza viene dalla cattiva conoscenza nella predizione del flusso di neutrini, dominata dall'incertezza nella produzione degli adroni "genitori" che decadono in neutrini. La stima del flusso si basa su modelli di produzione di adroni che fornisce discrepanze nella predizione del flusso fino al 30%. Per raggiungere i goal prefissati di T2K, la produzione di adroni viene misurata da NA61/SHINE (SHINE = SPS Heavy Ion and Neutrino Experiment) un esperimento a targhetta fissa all'SPS del CERN. Le interazioni di protoni di 31 GeV/c su carbonio sono misurate con una targhetta sottile di 2 cm, 4% della lunghezza di interazione nucleare, per poter studiare le interazioni primarie e misurare la sezione totale di produzione adronica, e una targhetta lunga 90 cm ($1.9\lambda_L$), una replica di

quella usata a T2K, che serve per poter riprodurre la stessa configurazione. e misurare le reinterazioni secondarie e terziarie. Gli spettri di π , K , p , λ^0 e la sezione d'urto totale adronica vengono misurate. Nel 2007 è fu preso un "run" di dati pilota di bassa statistica sia con la targhetta sottile e lunga usato per testare il metodo di analisi. Gli spettri misurati furono usati per calibrare il flusso di neutrini di T2K predetto. Il rivelatore è stato sottoposto a diverse modifiche nel 2008 e nuovi dati sono stati presi nel 2009, incrementando la statistica di circa un fattore 10. Questo ha permesso di ridurre drasticamente l'incertezza sulla predizione del flusso di neutrini a T2K.

Nel contesto delle oscillazioni dei 3 neutrini, il rivelatore vicino viene usato per misurare il flusso di neutrini non oscillato, riducendo sia le incertezze sistematiche sul flusso che sulla sezione d'urto. Comunque pure ricerche di nuova fisica possono essere fatte. Esistono alcune anomalie sperimentali che potrebbero essere spiegate assumendo oscillazioni di neutrini a piccola distanza. Ci sono diversi scenari di nuova fisica che potrebbero spiegare queste osservazioni inaspettate, come l'esistenza di neutrini sterili che possono essere introdotte in una versione estesa della struttura dei 3 neutrini. I neutrini sterili non interagiscono mediante la forza elettrodebole e quindi non possono essere rivelati direttamente. Nel caso avessero una massa di circa $1 \text{ eV}^2/c^2$ potrebbero oscillare con i neutrini standard (ν_e , ν_μ e ν_τ), che possono essere osservati mediante rivelatori situati a piccola distanza, come ND280, cercando un disavanzo o un eccesso di neutrini rispetto alla predizione.

Questa tesi è focalizzata sia sulla ricerca di oscillazioni di neutrini a piccola distanza al rivelatore vicino, consistente con l'esistenza di neutrini sterili, che sulla misura a grande distanza di oscillazioni tra i 3 sapori al rivelatore lontano, con una particolare enfasi alla ricerca dell'apparizione $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ e della violazione di CP nel settore leptonic. L'obiettivo è testare la validità della struttura a 3 neutrini, misurare con precisione i parametri di oscillazione e ricercare per la prima volta la violazione di CP.

Ho iniziato il Ph.D lavorando nell'esperimento NA61/SHINE misurando la sezione d'urto totale di produzione adronica in interazioni tra protoni e carbonio all'energia di T2K con il "run" di dati di alta statistica del 2009. Questa misura è di grande interesse non solo perché importante per T2K, ma anche perché può essere confrontata con altre misure analoghe di altri esperimenti fornendo un'aiuto alla comprensione dei modelli teorici di interazioni di particelle.

In seguito ho aderito al gruppo di lavoro del neutrino elettronico di ND280 a T2K ed ho portato a termine l'analisi di ricerca della sparizione del neutrino elettronico a piccola distanza nel contesto della struttura di neutrini estesa con l'aggiunta di un neutrino sterile. Il risultato dell'analisi, per cui un articolo è stato pubblicato [136], viene presentato.

Infine ho lavorato nel gruppo di analisi di oscillazioni al rivelatore lontano. Il mio primo lavoro è stato lo studio di apparizione standard di $\bar{\nu}_e$ in un fascio di $\bar{\nu}_\mu$, mai osservata finora. Questa misura è molto interessante in quanto si tratta del primo passo verso la ricerca di violazione di CP, che può essere studiata cercando differenze nelle oscillazioni $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ e $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$. Poi ho portato a termine la prima analisi di ricerca di violazione di CP dove sia i dati di neutrini che di antineutrini vengono analizzati simultaneamente.

Il primo capitolo della tesi fornisce una introduzione alla teoria della fisica del neutrino, in particolare le oscillazioni di neutrini. Viene anche fornita una rassegna delle più importanti scoperte e degli esperimenti sui neutrini. Nel secondo capitolo viene descritto l'esperimento T2K e tutti i requisiti per una conoscenza precisa del fascio di neutrini. Nella prima parte

del terzo capitolo viene descritto l'esperimento NA61/SHINE, mentre nella seconda parte viene presentata la misura della sezione d'urto totale di produzione adronica. Il risultato della ricerca di scomparsa di ν_e a piccola distanza al rivelatore vicino di T2K viene mostrato nel quarto capitolo, mentre negli ultimi tre capitoli le analisi di oscillazione di neutrini a 3 sapori prodotte al rivelatore lontano viene presentata.