

Diss. ETH No. 17106

# Neutrino oscillation physics and nucleon decay with future liquid Argon Time Projection Chambers

A dissertation submitted to the  
**Swiss Federal Institute of Technology Zürich**  
for the degree of  
**Doctor of Sciences**

presented by  
**Anselmo MEREGAGLIA**  
Dipl. Phys. University of Milano Bicocca  
born on May 5th 1979  
in  
Tradate (Va), Italy

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. André Rubbia, examiner  
and  
Prof. Dr. Felicitas Pauss, co-examiner

March 2007

# Abstract

This thesis is focused on the impact of large mass liquid Argon TPC's on neutrino oscillation physics and nucleon decay searches.

The last 20 years were crucial for neutrino physics: oscillations between different neutrino flavours were seen, both with solar and with atmospheric neutrinos. This new phenomenon is now well established in the physics community as well as the fact that neutrino masses differ from zero. However, the picture is far from being complete and many open questions remain to be answered: is  $\theta_{13}$  non zero? Is there CP-violation in the leptonic sector? To address these questions will be the goal of the future neutrino experiments.

In this thesis two future experiments are investigated, namely T2K and GLACIER on new neutrino beams. T2K (Tokai to Kamioka) is a long-baseline (295 km) neutrino oscillation experiment that will start in Japan in 2009. The goal will be to observe  $\nu_{\mu}$  disappearance to precisely measure the oscillation parameters  $\Delta m_{23}^2$  and  $\sin^2(2\theta_{23})$ , and  $\nu_e$  appearance to measure (or improve the current limit on)  $\theta_{13}$ . GLACIER (Giant Liquid Argon Charge Imaging Experiment) is a 100 kton LAr TPC for future neutrino and astroparticle physics. In this thesis its features as an accelerator-physics experiment were studied, as well as other important topics, such as proton decay.

In T2K, a 100 ton LAr TPC as a near detector at 2 km from the target would be used to measure precisely the beam of unoscillated neutrinos, allowing a reliable prediction of the beam (without oscillations) at the Super-Kamiokande (SK) detector. It would play a crucial role in reducing the systematics on the  $\nu_e$  appearance measurement and in the understanding of the background coming from the  $\nu_e$  contamination in the beam and from  $\pi^0$  decays. Thanks to the excellent LAr TPC imaging capability, the two components of the background can be studied separately and an overall consistency with measurements in the 1 kton Water Cerenkov near detector will be demonstrated. Studies on the QE (quasi-elastic)/non-QE event ratio could also be performed in the LAr detector, which will reduce the systematics on the  $\nu_{\mu}$  disappearance measurement.

The second generation long-baseline GLACIER experiment is instead driven by the measurement of CP-violation and the mass hierarchy. The performance of a 100 kton LAr detector has been studied on upgraded versions of the T2K and CNGS (Cern Neutrinos to Gran Sasso) neutrino beams. It was shown that CP violation and the mass hierarchy could be measured at values of  $\sin^2(2\theta_{13}) \sim 2 \times 10^{-3}$  at  $3\sigma$  C.L. In the most unfortunate case, where no  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$  oscillation is measured, an upper limit of  $5 \times 10^{-4}$  at  $3\sigma$  C.L. (depending on the value of  $\delta_{cp}$ ) can be set on  $\sin^2(2\theta_{13})$ , 200 times better than the present limit.

An upper limit on the nucleon lifetime ( $\tau/B$  at 90% C.L.) of about  $10^{35}$  years could be reached for the most favourable decay channels after running GLACIER for 10 years at shallow depth.

# Abstract

In questa tesi si studia l'importanza di TPC ad Argon liquido di grande massa nella fisica delle oscillazioni di neutrini e per la scoperta del decadimento del protone.

Gli ultimi 20 anni sono stati cruciali per la fisica dei neutrini: oscillazioni di sapore leptonic sono state osservate sia con neutrini solari che atmosferici. Questo è un fatto ormai noto nella comunità scientifica come il fatto che la massa dei neutrini è diversa da zero. La conoscenza non è comunque completa e molte sono ancora le domande senza risposta:  $\theta_{13}$  è diverso da zero? C'è violazione di CP nel settore leptonic? Rispondere a queste domande sarà il compito dei futuri esperimenti sulla fisica dei neutrini.

In questa tesi vengono studiati due esperimenti: T2K e GLACIER su fascio di neutrini. T2K (Tokai to Kamioka) è un esperimento sulle oscillazioni di neutrini situato in Giappone che inizierà la presa dati nel 2009. Lo scopo è osservare la sparizione di neutrini  $\nu_\mu$  295 km dal punto di produzione, per misurare i parametri di oscillazione  $\Delta m_{23}^2$  e  $\sin^2(2\theta_{23})$ , e l'apparizione di neutrini  $\nu_e$  per misurare (o migliorare il limite attuale su)  $\theta_{13}$ . GLACIER (Giant Liquid Argon Charge Imaging Experiment) è una TPC ad Argon liquido di 100 kton per fisica del neutrino e astrofisica. In questa tesi GLACIER viene analizzato in quanto esperimento su fascio di neutrini, senza però trascurare altri importanti aspetti come per esempio la possibilità di osservare il decadimento del protone.

In T2K, una TPC ad Argon liquido di 100 ton situata a 2 km dal bersaglio, può essere usata per misurare con precisione il fascio di neutrini prima che l'oscillazione avvenga, e permetterebbe una predizione accurata del fascio (non oscillato) a Super-Kamiokande (SK). Avrebbe un ruolo fondamentale nel ridurre la sistematica sulla misura dell'apparizione di neutrini  $\nu_e$  e nella comprensione del fondo dovuto alla contaminazione di  $\nu_e$  del fascio e al decadimento di  $\pi^0$  quando uno dei due fotoni non ha abbastanza energia per essere rivelato o l'angolo tra essi è troppo piccolo per separarli. Grazie alla possibilità di ricostruire gli eventi in modo eccellente in una TPC ad Argon liquido, le due componenti del fondo possono essere misurate separatamente, e una consistenza generale con quanto misurato dal detector di 1 kton Cerenkov ad Acqua a 2 km può essere dimostrata. Studi sul rapporto di eventi QE (quasi-elastici)/non-QE possono essere effettuati con la TPC ad Argon liquido, questo riduce la sistematica sulla misura della sparizione di neutrini  $\nu_\mu$ .

GLACIER, un esperimento di seconda generazione su fascio di neutrini, ha invece come fine la misura della violazione di CP e della gerarchia delle masse. La performance di una TPC ad Argon liquido di 100 kton su fascio di neutrini è stata studiata considerando versioni migliorate dei fasci usati per T2K e CNGS (Cern Neutrinos to Gran Sasso). È stato dimostrato che la violazione di CP e la gerarchia delle masse potrebbe essere misurata con un livello di confidenza di  $3\sigma$  per valori di  $\sin^2(2\theta_{13}) \sim 2 \times 10^{-3}$ . Nel caso sfortunato in cui non venga osservata alcuna transizione del tipo  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ , un limite superiore di  $5 \times 10^{-4}$  potrebbe essere fissato per  $\sin^2(2\theta_{13})$  con un livello di confidenza di  $3\sigma$  (a seconda del valore di  $\delta_{cp}$ ), 200 volte meglio del limite attuale.

Un limite superiore sulla vita media del protone ( $\tau/B$  at 90% C.L.) di circa  $10^{35}$  anni può essere stabilito per i canali dove il rapporto segnale/rumore è più favorevole, dopo 10 anni di presa dati di GLACIER situato a “shallow depth”.