#### **Eksperyment T2K**

Tomasz Wąchała

Instytut Fizyki Jądrowej PAN,

Zakład Neutrin i Ciemnej Materii

# **Oscylacje neutrin**

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{e} \\ \mathbf{v}_{\mu} \\ \mathbf{v}_{\tau} \end{bmatrix} = U \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{1} \\ \mathbf{v}_{2} \\ \mathbf{v}_{3} \end{bmatrix} \xrightarrow{P(\mathbf{v}_{\alpha} \to \mathbf{v}_{\beta}) = \delta_{\alpha\beta} - 4\sum_{i < j} \Re\left(U_{\alpha i}^{**} U_{\beta j} U_{\alpha j} U_{\beta j}^{*}\right) \cdot \sin^{2} \Phi_{ij}}{\pm 2\sum_{i < j} \Im\left(U_{\alpha i}^{**} U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^{*}\right) \cdot \sin^{2} \Phi_{ij}}$$
$$\frac{\pm 2\sum_{i < j} \Im\left(U_{\alpha i}^{**} U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^{*}\right) \cdot \sin^{2} \Phi_{ij}}{\Phi_{ij} = \Delta m_{ij}^{2} \frac{L}{4E_{\nu}} = 1.27 \cdot \Delta m_{ij}^{2} [eV^{2}] \cdot \frac{L[km]}{E_{\nu}[GeV]}}$$
$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \xrightarrow{U_{\beta}} \begin{bmatrix} c_{12} S_{12} 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \xrightarrow{C_{ij} = \cos \theta_{ij} S_{ij} = \sin \theta_{ij}}$$

 $U = \begin{bmatrix} 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -s_{13} & e^{-i\delta} & 0 & c_{13} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 12 & 12 & 12 \\ s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ neutrina atmosferyczne i amanie/zachowanie CP neutrina w sektorze neutrin słoneczne

# Wyzwania przed fizyką oscylacji neutrin

- Sprawdzenie czy kąt  $\theta_{23}$  jest maksymalny
- Faza  $\delta$ ? Czy symetria CP jest łamana/zachowana w sektorze neutrin?
- Pomiar znaku ∆m<sup>2</sup><sub>23</sub> normalna czy odwrócona hierarchia mas?



Tomasz Wachala, Eksperyment T2K

# Dlaczego to jest ciekawe?

#### **A Question of Flavor and Mass:**





- Where do these numbers come from?
  - Tri-bimaximal mixing? Quark-Lepton Complementarity? Koide relation?
  - What does it mean if any of these are true?
- Answers begging for the right question . . .

H. A. Tanaka (UBC/IPP)



6

## Eksperymenty z długą bazą pomiarową



- Pomiar strumienia neutrin w detektorze bliskim:  $\Phi_{v}^{ND}$
- Pomiar liczby przypadków oraz widma energetycznego neutrin w detektorze dalekim: N<sup>SK</sup>, E<sup>SK</sup>
- Ekstrapolacja  $\Phi_{v}^{ND}$  do detektora dalekiego przy założeniu braku oscylacji otrzymujemy  $\Phi_{v}^{SK(expected)}$
- Porównanie  $N_v^{SK}$ ,  $E_v^{SK}$  oraz  $\Phi_v^{SK(expected)} \rightarrow$  parametry oscylacji neutrin

# Eksperymenty z długą bazą pomiarową

- Eksperyment K2K (Japonia)
  - Wiązka neutrin o średniej energii 1.3GeV z 12GeV wiązki protonów z akceleratora w KEKu
  - Detektor bliski w odległości 300m
  - Detektor daleki SuperKamiokande 250km





Obserwowanych : 112 przypadków  $v_{\mu}$ 

Oczekiwanych : 155.9 przypadków  $v_{\mu}$ 

#### Zanikanie strumienia $v_{\mu}$



#### MINOS (USA), MiniBooNe (USA), ICARUS (Włochy)



Tomasz Wachala, Eksperyment T2K

# **T2K - From Tokai to Kamioka**





Współpraca T2K to 477 ludzi z 12 krajów: Kanada, Francja, Niemcy, Włochy, Japonia, Korea, Polska, Rosja, Hiszpania, Szwajcaria, Wielka Brytania, USA



# Co i jak chcemy zmierzyć?

- $\theta_{13}$  pierwszy krok w stronę pomiaru CP
  - Pomiar pojawiania się neutrin elektronowych w strumieniu neutrin mionowych

$$P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}) \approx \sin^{2} \theta_{23} \sin^{2} 2 \theta_{13} \sin^{2} (1.27 \Delta m_{13}^{2} \frac{L}{E_{\nu}})$$

Pomiar zanikania strumienia neutrin mionowych

$$P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\mu}) \approx 1 - \sin^2 2 \theta_{23} \sin^2 (1.27 \Delta m_{23}^2 \frac{L}{E_{\nu}})$$

- $\delta$  łamanie/zachowanie symetrii CP
  - Pomiar różnicy prawdopodobieńst dla neutrin i antyneutrin

$$A_{CP} = \frac{P(\nu_{\mu} \to \nu_{e}) - P(\overline{\nu_{\mu}} \to \overline{\nu_{e}})}{P(\nu_{\mu} \to \nu_{e}) + P(\overline{\nu_{\mu}} \to \overline{\nu_{e}})} \approx \frac{\Delta m_{12}^{2} \sin 2\theta_{12}}{4 E_{\nu} \sin \theta_{13}} \sin \delta$$

12.11.2009

•  $\theta_{23}$ ,  $\Delta m_{23}^2$ 

### Z jaką czułością chcemy zmierzyć?



# Czym chcemy zmierzyć?







#### Japan Proton Accelerator Research Complex

Tomasz Wachala, Eksperyment T2K

# Produkcja wiązki neutrin



W T2K wykorzystana po raz pierwszy tzw. superwiązka neutrin - konwencjonalna wiązka (K2K, MINOS) o wysokiej intensywności (0.75 MW, K2K -0.0052MW)

arget Decay volume Dump & **μ-monitor** Near detector

- Produkcja neutrin mionowych v  $_{\mu}$  o średniej energii  $\sim$  0.7GeV

- Zanieczyszczenie wiązki neutrinami elektronowymi w piku widma energii  ${\sim}0.5\%$  v  $_{\rm e}$ 

### Wiązka pozaosiowa



pojawiania się  $v_{\rm o}$ 

### **Detektor bliski**



Monitorowanie Kierunku, intensywności oraz średniej energii wiązki

Tomasz Wachala, Eksperyment T2K

# Detektor bliski pozaosiowy

- Detektor bliski ND280 umieszczony jest 2.5° poza osią wiązki (off-axis)
- Ponownie wykorzystany został magnes UA1/NOMAD (CERN)
- Wnęki między płytami magnesu wypełnione scyntylatorami (SMRD)
- Wewnątrz magnesu kilka pod-detetektorów umieszczonych w tzw. koszu (P0D,FGD,TPC)
- Kalorymetr elektromagnetyczny otaczający detektory wewnętrzne (ECAL)
- Wszystkie pod-detektory z wyjątkiem TPC wykorzystują scyntylatory z włóknem WLS (WaveLength Shifting fiber) do transmisji światła i odczyt światła za pomocą MPPC (Multi-pixel photon counter)



 TPC jest pierwszą komorą projekcji czasowej wykorzystującą na taką skalę system odczytu MicroMegas (dwuwymiarowy odczyt elektronów jonizacji przy pomocy tzw. padów)

# Detektor bliski pozaosiowy



# **Detektor daleki**



- SK faza IV: Upgrade elektroniki oraz systemu akwizycji danych zakończony w roku 2008
- Szybki oraz praktycznie bez czasu martwego system DAQ

#### Super-Kamiokande:

- detektor Czerenkowa
- 50kt wody
- 22.5kt przestrzeni roboczej (fiducial volume)
- 11 000 PMT



# Oddziaływania neutrin w T2K



Rekonstrukcja energii neutrina na podstawie kinematyki procesów 2ciałowych z wykorzystaniem leptonu w stanie końcowym:

$$E_{v_{\mu}} = \frac{m_{n}E_{\mu} - m_{\mu}^{2}/2}{m_{n} - E_{\mu} + p_{\mu}\cos\theta_{\mu}}$$



W zakresie energii T2K dominują procesy kwazi-elastyczne z wymianą prądów naładowanych (CCQE) µ n θ

V,,

# Sygnał i tło

- Pomiar  $P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\mu})$ 
  - Sygnał: v<sub>µ</sub> CCQE -> możemy zrekonstruować energię neutrina
  - Tło:  $v_{\mu}$  CCnQE (CC $\pi^{+/-}$ , CC $\pi^{0}$ , CCmulti $\pi$ )
- Pomiar  $P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e})$ 
  - Sygnał: v<sub>e</sub> CCQE
  - Tło: ν<sub>e</sub> CCQE z wiązki, ν<sub>µ</sub> NCπ<sup>0</sup> (sygnał w detektorze od fotonów z rozpadu π<sup>0</sup> bardzo podobny do sygnału elektonów z ν<sub>e</sub> CCQE)





### Typowe przypadki w detektorze bliskim



### Typowe przypadki w SuperKamiokande



# Druga faza eksperymentu

Jeśli uda się zmierzyć  $\theta_{13}$  w I fazie (nie jest zbyt mały) to: Upgrade wiązki do: ~1.7MW 100kt LAr Detektor o masie 100kt wypełniony ciekłym argonem L ~ 660km (Okinoshima) 1Mt, L = 1000km Detektor o masie 1Mt L ~ 1000km (Korea)

- Pomiar fazy delta -> symetria CP
  - Konieczny pomiar prawdopodobieństw zarówno dla neutrin jak i antyneutrin aby wyznaczyć:

$$A_{CP} = \frac{P(\nu_{\mu} \to \nu_{e}) - P(\overline{\nu_{\mu}} \to \overline{\nu_{e}})}{P(\nu_{\mu} \to \nu_{e}) + P(\overline{\nu_{\mu}} \to \overline{\nu_{e}})} \approx \frac{\Delta m_{12}^{2} \sin 2\theta_{12}}{4 E_{\nu} \sin \theta_{13}} \sin \delta$$

Odkrycie na poziomie  $3\sigma$ możliwe dla  $\delta > 20^{\circ} (\sin^2 2\theta_{13} > 0.01)$ 

# Polski udział w T2K

- 1) Uniwersytet Warszawski, Instytut Problemów Jądrowych, Politechnika Warszawska Warszawa
- 2) Uniwersytet Wrocławski
- 3) Uniwersytet Śląski
- 4) Instytut Fizyki Jądrowej PAN Kraków

#### Side Muon Range Detector (detektor bliski ND280)





- Budowa i instalacja detektora
- Testy elektroniki
- Stworzenie koncepcji instalacji detektora w magnesie (Kraków)
- Symulacje Monte-Carlo
- Oprogramowanie do rekonstrukcji torów w detektorze (m.in. Kraków)

#### ANALIZY FIZYCZNE:

- Analiza przypadków z wymianą prądów naładowanych z produkcją mezonów pizero w detektorze bliskim (Kraków)
- Analiza wydajności rozróżniania elektron-pizero dla detektora ciekło-argonowego planowanego w II fazie eksperymentu (Kraków)
- Prace teoretyczne nad modelowaniem przekrojów czynnych, generatory Monte-Carlo (Wrocław)
- Analiza niepewności wynikających z różnych modeli dla oddziaływań jedno-pionowych (Warszawa)

# Stan instalacji

- Wiązka przeszła pomyślnie pierwsze testy w marcu tego roku
- Trwają ostatnie prace przy instalacji detektora ND280
- Planowany ,,run" testowy już w grudniu tego roku
- "Run" fizyczny (zbieranie danych fizycznych) od stycznia 2010 roku





## Podsumowanie



Silna wiązka neutrin (0.75MW) w oparciu o wiązkę protonową z akceleratora

Duża statystyka (CC:  $v_{\mu} \sim 10^3$ ,  $v_{e} \sim 10$ /22.5kt/rok)

Czysta wiązka neutrin mionowych (~0.5%  $v_e$ ) Wąski profil energetyczny ustawiony w maksimum oscylacji III Niskie energie neutrin (<E>~0.7GeV), dla których ważne są głównie procesy CCQE, gdzie łatwo jest zrekonstruować energię

Sprawdzony detektor SuperKamiokande



Dobrze znane i separowalne tło

Efektywna i sprawdzona

rekonstrukcja przypadków

# 22.11.2009- pierwsze neutrino z wiązki



more familiar charged cousins like the electron. Measurements over the last few decades, notably by the Super-Kamiokande and KamLAND neutrino experiments in western Japan, have shown that neutrinos possess the strange property of neutrino oscillations, whereby one type of neutrino will turn into another as they propagate through space. Neutrino oscillations, which require neutrinos to have mass and therefore were not allowed in our

Nov. 22, 2009

20:25:48 JST

cm

cm

T2K Spill# 241792

Zakończono

Plik

MR Run #27, Shot #19655