# T2K From Tokai to Kamioka

Tomasz Wąchała Instytut Fizyki Jądrowej Im. H. Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk



- T2K
- JPARC
- Produkcja wiązki
- Wiązka Off-axis
- Detektory
- Fizyka T2K

#### Stan obecny oscylacji neutrin

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

Dla 3 stanów zapachowych neutrin  $U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13} e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13} e^{-i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} \\ s_{12} & c_{12} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ 

$$c_{ij} = \cos \theta_{ij} s_{ij} = \sin \theta_{ij}$$

neutrina atmosferyczne łamanie/zachowanie CP w sektorze neutrin

neutrina słoneczne

#### Stan obecny oscylacji neutrin

#### Co zostało zmierzone?:

 $\Delta m_{32}^2 = +2.46 \pm 0.15 \times 10^{-3} eV^2$ -2.37 ± 0.15 × 10<sup>-3</sup> eV<sup>2</sup>

$$\Delta m_{21}^2 = 7.67 + 0.22_{-0.21} \times 10^{-5} eV^2$$

$$\theta_{23} = 42.3 + 5.1 \circ_{-3.3} \circ_{-3.3}$$
  
 $\theta_{12} = 34.5 \pm 1.4 \circ_{-3.5}$ 

θ <sub>13</sub> < 10 °

M.C. Gonzalez-Garcia, M.Maltoni, Phys. Rept. 460:1-129, 2008 Co trzeba zmierzyć?

•Znak  $\Delta m^2_{32}$ 

•Poprawić dokładność pomiaru  $\Delta m_{23}^2$ 

•Precyzyjny pomiar θ<sub>23</sub>

•θ <sub>13</sub>=?

•δ =?



# Jak zmierzyć?

 θ <sub>13</sub>?

 Dla neutrin akceleratorowych - pomiar pojawiania się strumienia v e w wiązce neutrin mionowych:

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

#### 🔹 δ ?

Pomiar asymetrii:

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

• Precyzyjne pomiary  $\theta_{23}$  i  $\Delta m_{23}^2$ ?

 Dla neutrin akceleratorowych - pomiar zanikania strumienia neutrin mionowych:

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

### K2K – KEK to Kamioka

- 12 GeV PS KEK
- Wiązka neutrin ν μ
- < E<sub>v</sub> > ~ 1.3 GeV
- Bliski detektor -300m
- Daleki detektor
   Super-Kamiokande
   250 km



# K2K

- Wyniki końcowe dla K2K:
- Obserwowanych : 112 przypadków
- Oczekiwanych : przypadków

+11.5 155.9 -10.2 Zanikanie strumienia v  $_{\mu}$ 

> Modyfikacja widma (słaba statystyka)



Zbieranie danych w okresie: kwiecień 1999 - listopad 2004

## T2K – From Tokai to Kamioka









Japan Proton Accelerator Research Complex

## Produkcja wiązki



 Superwiązka neutrin - konwencjonalna wiązka o wysokiej intensywności (0.75 MW, K2K - 0.0052MW)
 Produkcja v " o średniej energii ~ 1GeV





### Wiązka Off-axis

Wąskie spektrum energii v  $_{\mu}$ przy bardzo dobrym dopasowaniu energii do maksimum oscylacji dla: •L = 295 km • $\Delta$  m<sup>2</sup> = 3x10<sup>-3</sup>eV<sup>2</sup>



Redukcja tła: •obcięcie wysokoenergetycznego ogona widma  $Ev_{\mu}$  - uwolnienie się od tła  $v_e$  (0.4%) •redukcja tła od  $\pi$  ° - ważne dla pomiaru pojawiania się  $v_e$ 





#### Detektor bliski off-axis (ND280)

•2-2.5° off-axis
•Ponowne użycie magnesu UA1
•Detektory wewnętrzne umieszczone w tzw. "koszu"

Pizero detector (POD) Optimized for NC pi0 measurement -measure electron neutrino contamination

# Fine Grained Detector (FGD)

measurebeam flux, Espectrum, flavor composition through CC -interactions, -backgrounds CC-1pi -Water and scintillator target

Time Projection Chamber (IFC) measure charged particle momenta, particle ID via dE/dx -measure backgrounds/pioncross section Side Muon Range Detector (SMRD) measure momentum for lateral muons -provide trigger on cosmic rays

Electromagnetic Calorimeter (ECAL) Photon detection (from pi0) in POD and tracker -charge particle ID and reconstruction



### Detektor pośredni

Ciekłoargonowa komora TPC 100 ton ciekłego argonu Pomiary cząstek z niskim pędem (poniżej progu Czerenkowskiego) ·Pomiary tła od oddziaływań NC oraz od  $v_{\rho}$ 



Wodny detektor **Czerenkowa** •1kt wody ·Wykonany w tej samej ogona widma neutrin technologii co Super-Kamiokande

**Detektor mionowy** Pomiar wysokoenergetycznego

Water Cererkov

#### **Detektor daleki**



Super-Kamiokande:

detektor Czerenkowa

•50kt wody

•22.5kt przestrzeni roboczej (fiducial volume)
•11 000 fotopowielaczy



SK - faza IV: Electronics & online DAQ upgrade (wrzesień 2008)
high-speed & dead-time-less DAQ

#### Dominujące procesy



Rekonstrukcja energii na podstawie kinematyki procesów 2-ciałowych:

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



Dominacja procesów kwazi-elastycznych z wymianą prądów naładowanych (CCQE)







#### 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)

1Mt, L = 295km Detektor o masie 1Mt L = 295km 200 000 fotopowielaczy



Łamanie symetrii CP w sektorze neutrin - II faza T2K

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

 $e_{23} S_{23}$ 

 $0 - s_{23}c_{23}$ 

Zależność od wartości θ 13 zmierzonego w I fazie eksperymentu

 $\begin{array}{c} \text{Pomiar} \\ P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}) - P(\overline{\nu_{\mu}} \rightarrow \overline{\nu_{e}}) \end{array}$ 

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



 $\left|-s_{13}e^{-i\delta}0\right|$ 

 $c_{13} \quad 0 \quad s_{13} e^{-i\delta}$ 

 $C_{13}$ 

 $c_{12}s_{12}0$ 

 $s_{12}c_{12}0$ 

# Polacy w T2K

 Uniwersytet Warszawski, Instytut Problemów Jądrowych, Politechnika Warszawska -Warszawa

- Uniwersytet Wrocławski
- Uniwersytet Śląski
- Instytut Fizyki Jądrowej PAN Kraków
   Side Muon Range Detector (detektor bliski ND280)





#### T2K - LAr (detektor pośredni T2K-2km)





# Pit bliskiego detektora



# Rożki magnetyczne



# Tunel rozpadu



## Akcelerator



### Podsumowanie

T2K będzie posiadał idealne warunki aby po raz pierwszy zmierzyć jednocześnie  $\theta_{13}$ ,  $\Delta m_{23}^2$ ,  $\theta_{23}$ :

- Silna wiązka neutrin (0.75MW) w oparciu o wiązkę protonową z akceleratora
- Czysta wiązka neutrin mionowych
   0.4% v (zazwyczaj tło ~ 1%)
- Waski profil energetyczny ustawiony z maksimum w maksimum oscylacji
- Niskie energie neutrin (E<1GeV), dla których ważne są głównie procesy QE, gdzie łatwo jest zrekonstruować energię
- Sprawdzony detektor Super-Kamiokande

Duża statystyka (CC: ν<sub>μ</sub>~10<sup>3</sup>, ν<sub>e</sub>~10 /22.5kt/rok)

> Efektywna i sprawdzona rekonstrukcja przypadków

Dobrze znane i separowalne tło