

Oscylacje neutrin i antyneutrin w eksperymencie MINOS

Katarzyna Grzelak

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych
IFD UW

11.03.2011

PLAN

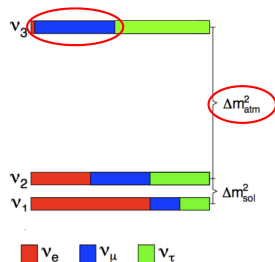
- 1 Wprowadzenie
- 2 Wiązka neutrin NuMI
- 3 Eksperyment MINOS
- 4 Oscylacje neutrin/antyneutrin akceleratorowych w MINOS'ie

- MINOS: eksperyment zbudowany w celu potwierdzenia hipotezy oscylacji neutrin i precyzyjnego zmierzenia parametrów modelu oscylacji
- **Unikalny eksperyment, pozwalający na bezpośrednie porównanie oscylacji neutrin i antyneutrin**
- Kontrolowana wiązka neutrin z akceleratora (źródło wiązki w ośrodku Fermilab pod Chicago)
- Pierwsze oddziaływanie neutrina z wiązki w dalekim detektorze: 7 marzec 2005

MACIERZ MIESZANIA DLA NEUTRIN

Trzy zapachy neutrin jako kombinacja trzech stanów własnych masy.

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$



$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} =$$

$$\underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix}}_{\text{neutrina atmosferyczne}} \underbrace{\begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix}}_{\text{poszukiwane}} \underbrace{\begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\text{deficyt neutrin słonecznych}} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

neutrina
atmosferyczne

poszukiwane

deficyt
neutrin słonecznych

BADANIE ZJAWISKA OSCYLACJI

W EKSPERYMENTACH AKCELERATOROWYCH Z DŁUGĄ BAZĄ

- **Parametry modelu oscylacji neutrin:** 3 kąty mieszania θ_{23} , θ_{13} i θ_{12} , 1 faza δ i dla trzech rodzajów neutrin 2 niezależne różnice mas Δm^2 . ($\Delta m_{kj}^2 \equiv m_k^2 - m_j^2$)
- Obserwacje znikania neutrin mionowych

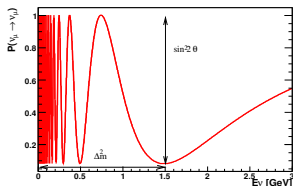
$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) \simeq 1 - \sin^2 2\theta_{23} \sin^2 \frac{1.27 \Delta m_{atm}^2 L}{E_\nu}$$

Jednostki:

$$\Delta m^2 [eV^2]$$

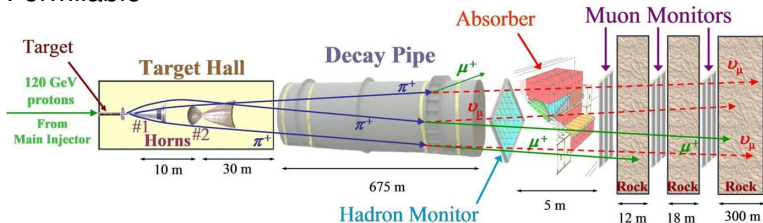
$$E_\nu [GeV]$$

$$L [km]$$

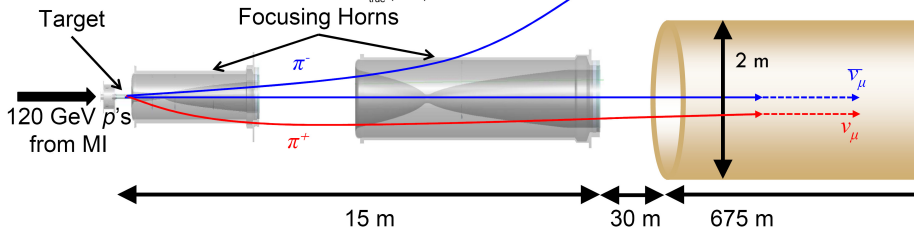
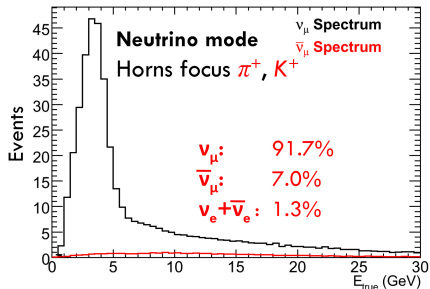


WIAZKA NEUTRIN NuMI

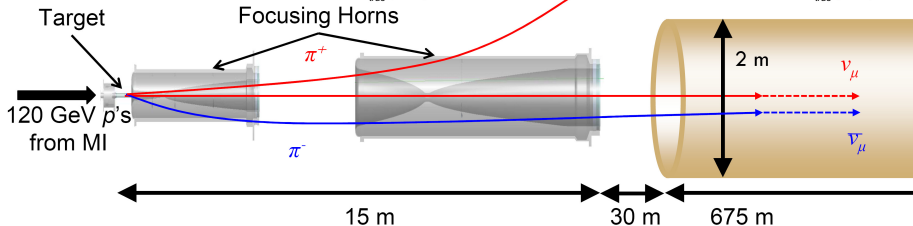
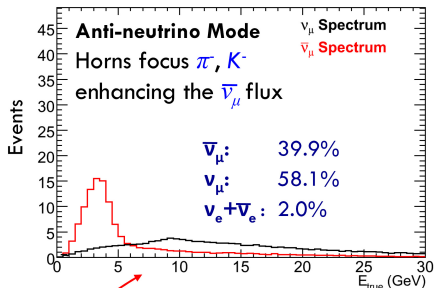
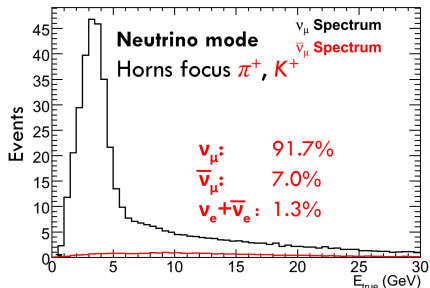
- Protony o energii 120 GeV z akceleratora Main Injector w Fermilabie

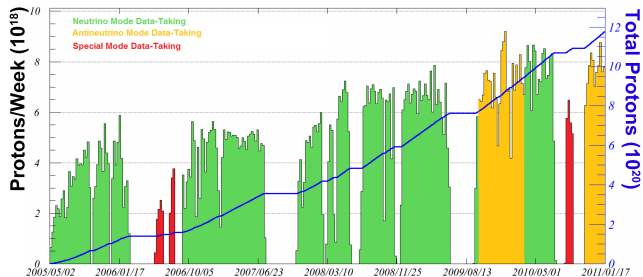


WIĄZKA WTÓRNA - MOD NEUTRINOWY



WIĄZKA WTÓRNA - MOD ANTYNEUTRINOWY





Przeanalizowane dane:

- 7.2×10^{20} pot (neutrina)
- 3.2×10^{20} pot (antyneutrina, wiązka neutrinowa)
- 1.7×10^{20} pot (antyneutrina, wiązka antyneutrinowa)

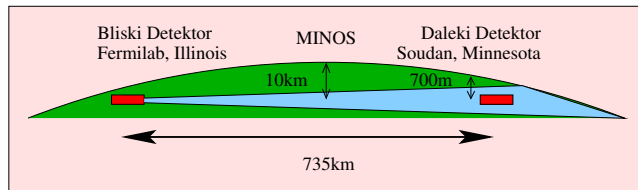
EKSPERYMENT MINOS

Eksperyment MINOS:

29 instytucji, 125 fizyków

Instytucje: Argonne, Athens, Brookhaven, Caltech, Cambridge, Campinas, Fermilab, Goias, Harvard, Holy Cross, IIT, Indiana, Iowa, Minnesota, Minnesota-Duluth, Otterbein, Oxford, Pittsburgh, Rutherford, Sao Paulo, South Carolina, Stanford, Sussex, Texas A&M, Texas-Austin, Tufts, UCL, Uniwersytet Warszawski, William&Mary



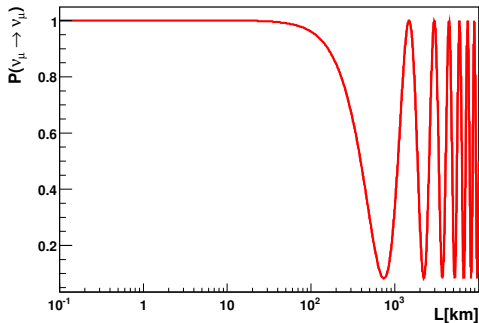


Eksperyment MINOS:

- kontrolowana wiązka neutrin z akceleratora
- dwa podziemne detektory w odległości 735km (czas przelotu neutrina pomiędzy detektorami: $\sim 2.5ms$):
 - Bliski Detektor (ND) (1kt) w ośrodku Fermilab pod Chicago
 - Daleki Detektor (FD) (5.4 kt) w kopalni Soudan, w Minnesocie

POŁOŻENIE DETEKTORÓW

- Daleki Detektor (FD) → poszukiwanie oscylacji
- Bliski Detektor (ND) → widmo energii niezakłócone przez oscylacje

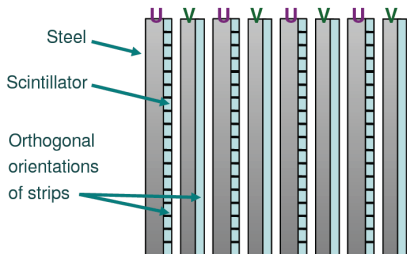


↑
Bliski detektor

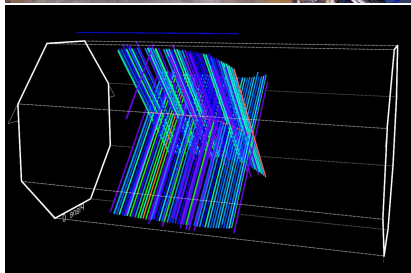
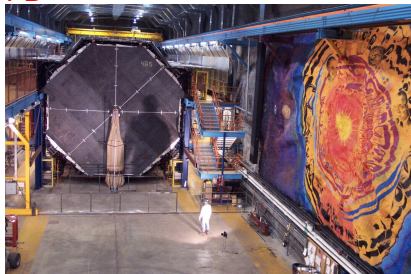
↑ Daleki detektor

MINOS: BLISKI I DALEKI DETEKTOR

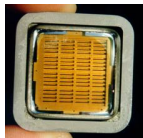
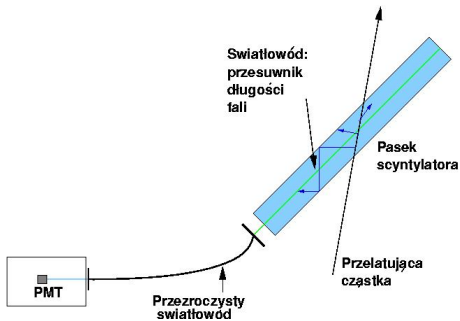
ND



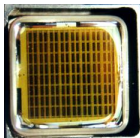
FD



MINOS: BLISKI I DALEKI DETEKTOR



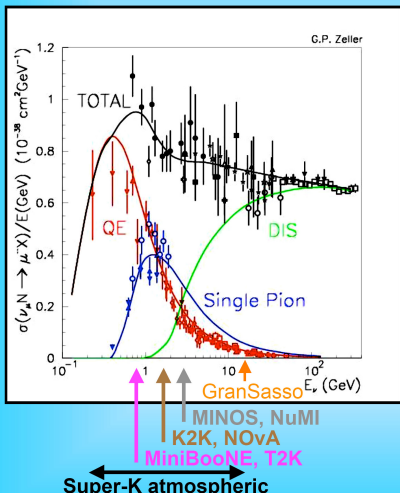
PMT M16 (FD)



PMT M64 (ND)



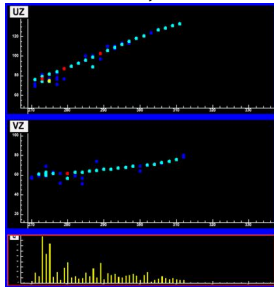
RODZAJE ODDZIAŁYWAŃ NEUTRIN w MINOS'ie



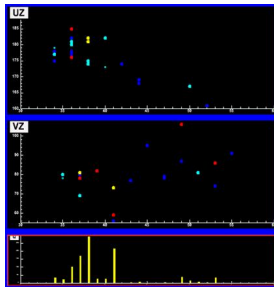
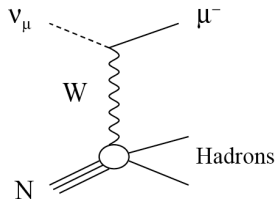
- $\nu_\mu N \rightarrow \mu X$
- Sygnaturą oddziaływania CC ν_μ jest obecność toru mionu
- $E_\nu = E_{shower} + E_\mu$

TOPOLOGIE PRZYPADKÓW Z WIĄZKI NuMI

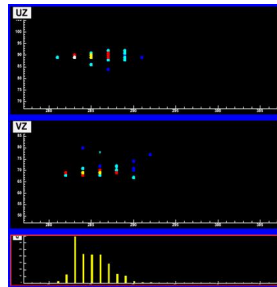
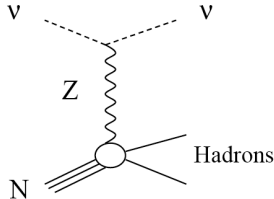
Monte Carlo, Daleki Detektor



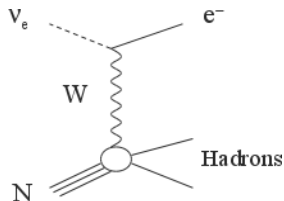
CC ν_μ



NC



CC ν_e

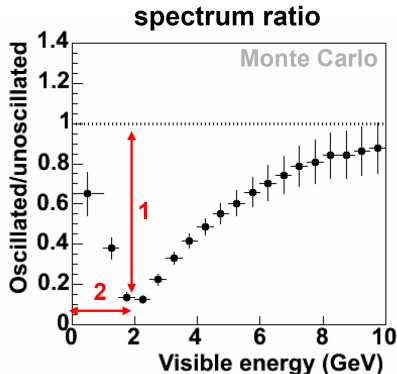
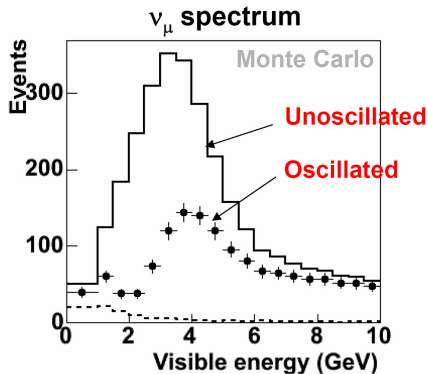


ZANIKANIE ν_μ Z WIAZKI

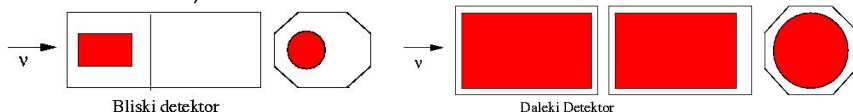
PRZYKŁAD ANALIZY ZANIKANIA ν_μ

Symulacja Monte Carlo

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \underbrace{\sin^2 2\theta}_1 \sin^2 \left(1.267 \underbrace{\Delta m^2}_2 L / E \right)$$



- 1 Czas rejestracji oddziaływania zgodny z czasem wiązki NuMI
- 2 Co najmniej jeden dobrze zrekonstruowany tor (kandydat na mion)
- 3 Wierzchołek oddziaływania w wiarygodnym obszarze detektora (fiducial volume):



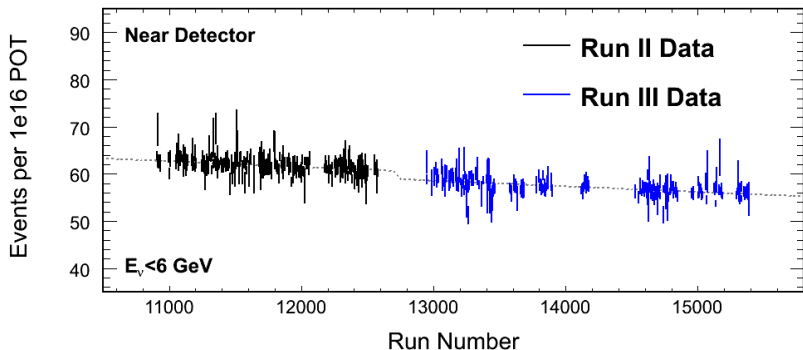
- 4 Miony z ujemnym ładunkiem (wybór ν_μ)
- 5 Cięcie na parametrze PID (Particle IDentification), używanym do selekcji oddziaływań NC i CC - algorytm kNN (k-NearestNeighbours)

SELEKCJA PRZYPADKÓW CC ν_μ 2011 - GŁÓWNE ZMIANY

w stosunku do analizy z 2008 roku

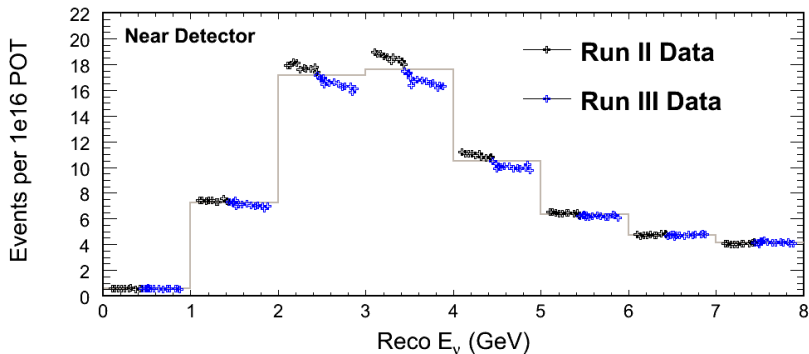
- 1 poprawa rozdzielczości energetycznej dla kaskad hadronowych z przedziału 1-1.5 GeV z 55% na 43%.
- 2 Tory nie muszą mieć zrekonstruowanego ujemnego ładunku (odzyskiwanie niskoenergetycznych przypadków)
- 3 Dodana dodatkowa klasa oddziaływań (zwiększa dwukrotnie statystykę) z wierzchołkami z mniej wiarygodnego obszaru detektora i z otaczającej skały.

WIĄZKA WTÓRNA - LICZBA PRZYPADKÓW CC ν_μ W CZASIE

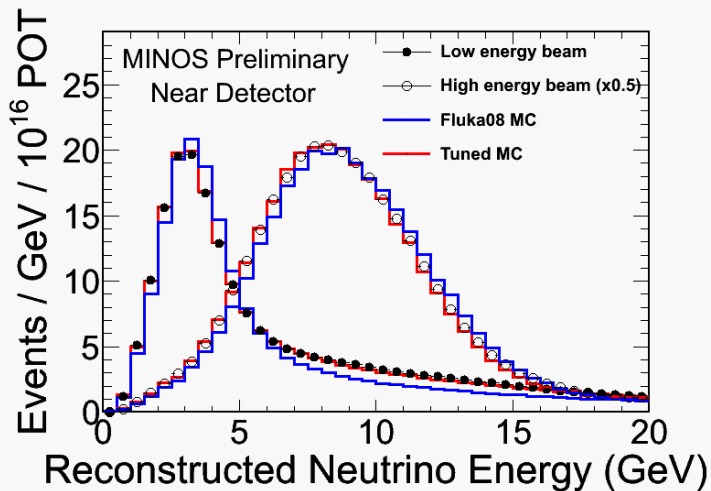


Skok związany z wypełnieniem rury rozpadowej helem.

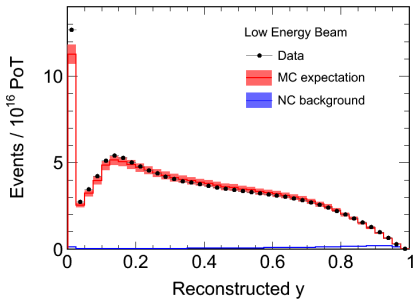
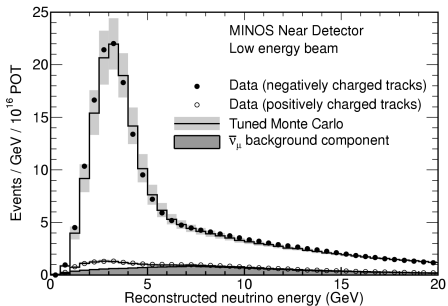
WIĄZKA WTÓRNA - STABILNOŚĆ WIĄZKI NEUTRINOWEJ



WIĄZKA WTÓRNA - WIDMA UŻYWANYCH WIĄZEK NEUTRINOWYCH

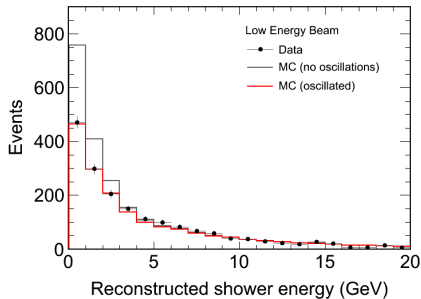
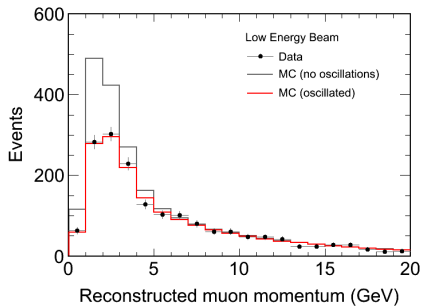


Bliski Detektor (ND)

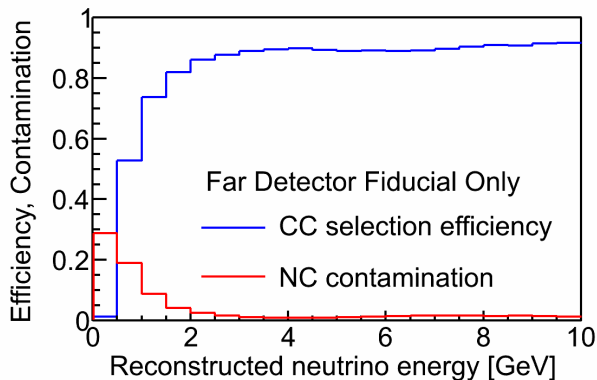


Wszystkie kryteria selekcji przypadków i procedury przeprowadzania analizy zdefiniowane bez dostępu do pełnych danych z Dalekiego Detektora

Daleki Detektor (FD)

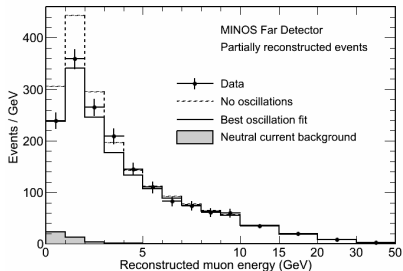
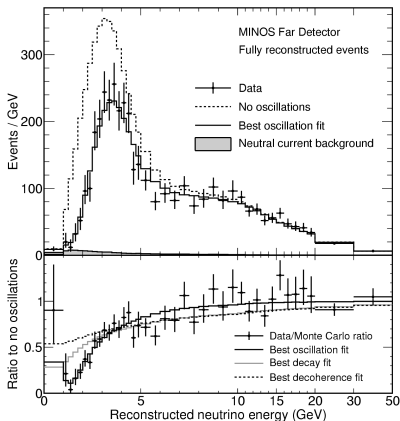


Daleki Detektor (FD)

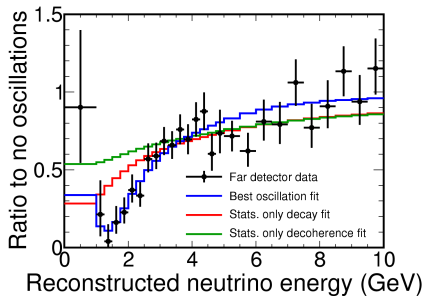
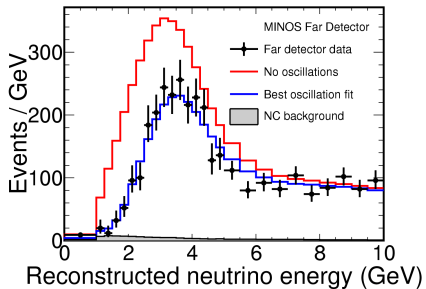


Wyniki dla całkowicie i częściowo

zrekonstruowanych przypadków



$$\Delta m_{23}^2 = (2.32^{+0.12}_{-0.08}) \times 10^{-3} \text{eV}^2$$
$$\sin^2 2\theta_{23} = 1.00 \text{ (najlepsze dopasowanie)}$$



Wyniki dla wszystkich przypadków

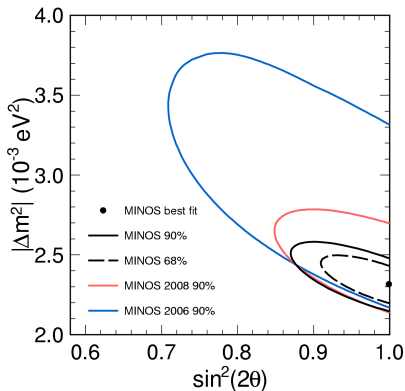
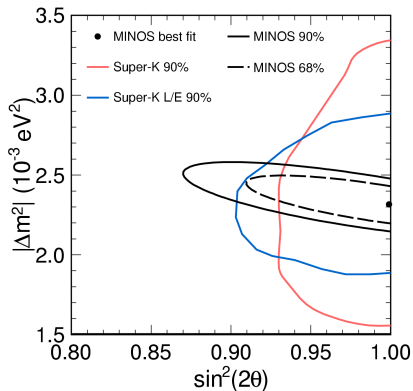
Porównanie liczb przypadków (FD) przewidywanych (brak oscylacji) i obserwowanych.

Wiązka	POT (10^{20})	Teoria (bez oscylacji)		Pomiar	
		częściowo zrekonstru- owane	całkowicie zrekonstru- owane	częściowo zrekonstru- owane	całkowicie zrekonstru- owane
LE (I)	1.269	426	375	318	357
LE (II)	1.943	639	565	511	555
LE (III)	3.881	1252	1130	1037	977
HE	0.153	134	136	120	128
Suma	7.246	2451	2206	1986	2017

Główne źródła błędów systematycznych:

- dla Δm^2 :
 - energia kaskady hadronowej
 - energia mionu (zasięg 2%, krzywizna 3%)
 - względna normalizacja pomiędzy detektorami (1.6%)
- dla $\sin^2 2\theta_{23}$
 - tło od oddziaływań NC (20%)

Wyniki dla wszystkich przypadków

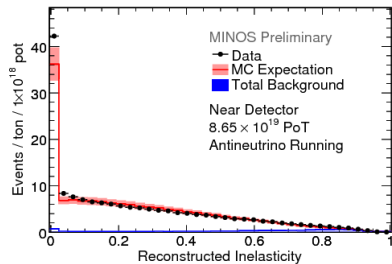
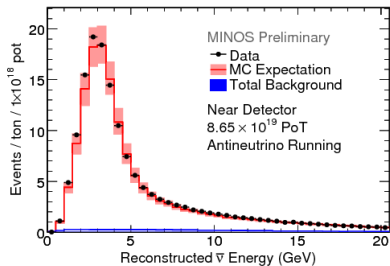


ZANIKANIE $\overline{\nu}_\mu$ Z WIAZKI

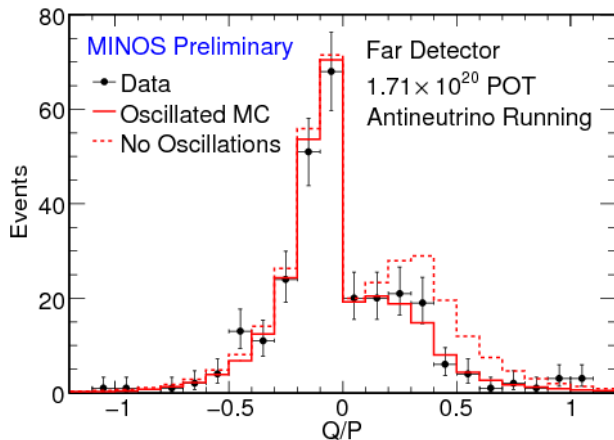
RÓŻNICE POMIĘDZY ANALIZĄ dla ν_μ i $\overline{\nu}_\mu$

- Analiza jak dla ν_μ w 2008 roku
- Mniejsza statystyka
- Potencjalnie większe tło
- Oddziaływania są mniej *hadronowe* (rozkład y)
- Błędy systematyczne bardzo podobne do analizy dla ν_μ
(dodatkowa niepewność w związku z tłem od oddziaływań $cc-\nu_\mu$)
- Dominują błędy statystyczne

Bliski Detektor (ND)

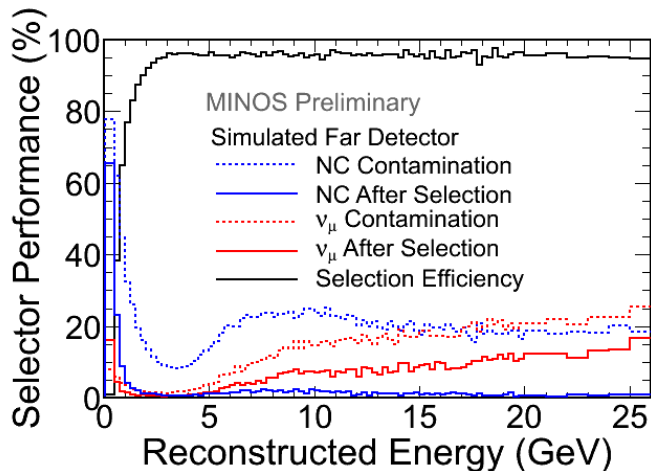


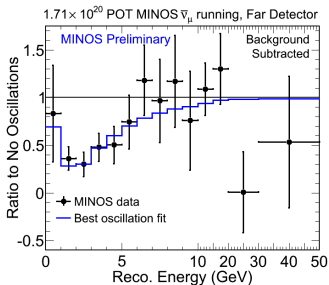
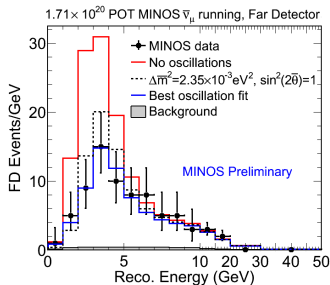
Daleki Detektor (FD)



Wybrane
zostały tylko
przypadki z
dodatnim
mionem
($Q/P > 0$)

Daleki Detektor (FD)



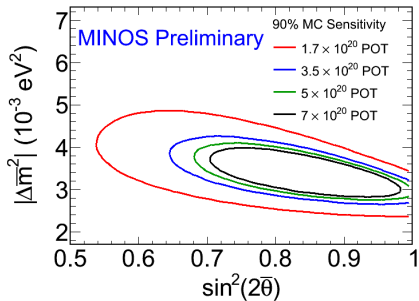
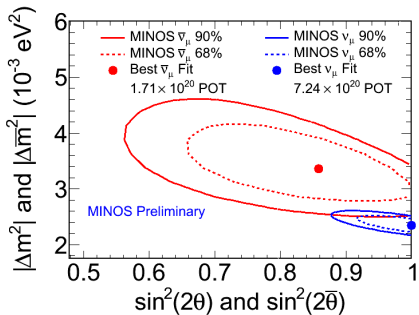


$$\Delta\bar{m}_{23}^2 = (3.36_{-0.40}^{+0.46}(\text{stat.}) \pm 0.06(\text{syst.})) \times 10^{-3} \text{eV}^2,$$

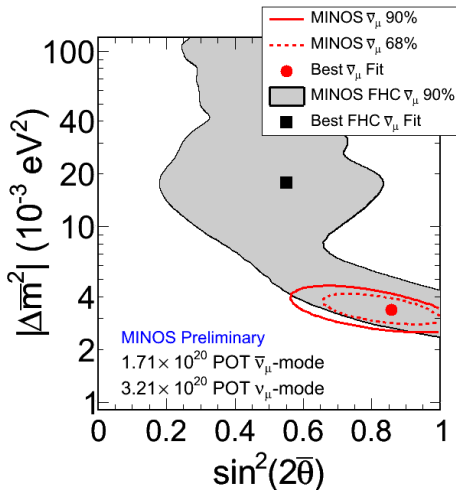
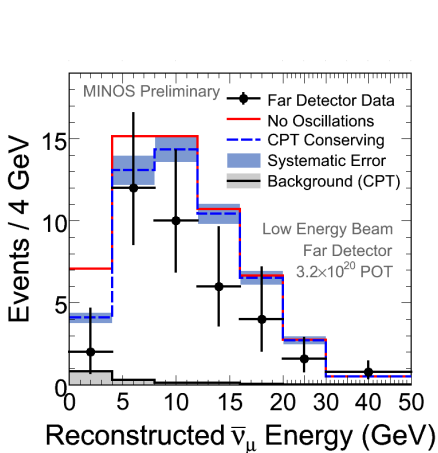
$$\sin^2 2\bar{\theta}_{23} = 0.86 \pm 0.11(\text{stat.}) \pm 0.01(\text{syst.})$$

Zaobserwowano 97 przypadków. W przypadku braku oscylacji powinno być 155 przypadków.

Tło: 2 NC, 6 ν_μ -CC, 0.3 $\bar{\nu}$ -CC



Wyniki dla antyneutrin z wiązki neutronowej



Zaobserwowano 42 przypadki. Dla oscylacji identycznych jak dla neutrin oczekiwane są $58.3 \pm 7.6(stat.)_{3.4}^{+4.3}(syst.)$ Wkrótce wyniki dla dwa razy większej statystyki

- **Zmierzone parametry oscylacji:**

- Dla **neutrin** $\Delta m_{23}^2 = (2.32_{-0.08}^{+0.12}) \times 10^{-3} \text{eV}^2$, $\sin^2 2\overline{\theta}_{23} = 1.00$
(najlepsze dopasowanie)
- Dla **antyneutrin** $\Delta \overline{m}_{23}^2 = (3.36_{-0.40}^{+0.46}(\text{stat.}) \pm 0.06(\text{syst.})) \times 10^{-3} \text{eV}^2$,
 $\sin^2 2\overline{\theta}_{23} = 0.86 \pm 0.11(\text{stat.}) \pm 0.01(\text{syst.})$

- Znaczącość różnicy pomiędzy ν_μ i $\overline{\nu}_\mu$ - 2.3σ

- MINOS kontynuuje zbieranie danych z wiązką antyneutrinową (oczekuje się podwojenia statystyki)
- Wkrótce ukończona zostanie analiza oddziaływań $\bar{\nu}_\mu$ z wiązki neutrinowej dla dwukrotnie większej statystyki
- Nie są przeanalizowane wszystkie dane dla oscylacji ν_μ

- Jeżeli różnica pomiędzy ν i $\bar{\nu}$ się zwiększy:
 - modele łamiące CPT z różnymi masami dla neutrin i antyneutrin ?
(M.C.Gonzales-Garcia, M.Maltoni, Phys.Rept. 460,1,2008)
 - niestandardowe oddziaływania z materią ?
(W.Mann et al., Phys.Rev. D 82, 113010, 2010, J.Kopp et al., Phys.Rev.D 70, 111301(2004))
 - ... ??