

Eksperyment MINOS

Pierwsze wyniki dotyczące neutrin akceleratorowych

Katarzyna Grzelak

Seminarium Fizyki Wielkich Energii

21.04.2006

- 1 Wprowadzenie
- 2 Wiązka neutrin NuMI
- 3 Eksperyment MINOS
- 4 Dane z Bliskiego Detektora
- 5 Analiza oscylacji neutrin dla 0.93×10^{20} pot

MACIERZ MIESZANIA DLA NEUTRIN

Trzy zapachy neutrin jako kombinacja trzech stanów własnych masy.

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

$$U = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix}$$

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

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

$\delta \rightarrow$ faza łamania CP

Zakładając zachowanie CP ($\delta = 0$):

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

$$\underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix}}_{\text{atmosferyczne}} \underbrace{\begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13} & 0 & c_{13} \end{pmatrix}}_{\text{poszukiwane}} \underbrace{\begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\text{słoneczne}} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

atmosferyczne

poszukiwane

słoneczne

$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(L) = \sum_k |U_{\alpha k}|^2 |U_{\beta k}|^2 + 2\text{Re} \sum_{k>j} U_{\alpha k}^* U_{\beta k} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* \exp\left[-i \frac{\Delta m_{kj}^2}{2E_\nu} L\right]$$

$$\Delta m_{kj}^2 \equiv m_k^2 - m_j^2$$

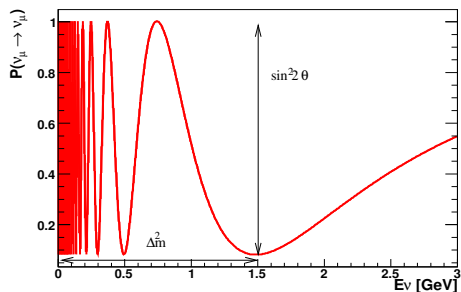
Parametry modelu: 3 kąty mieszania θ_{23} , θ_{13} i θ_{12} , 1 faza δ i dla trzech rodzajów neutrin 2 niezależne różnice mas Δm^2 .

BADANIE ZJAWISKA OSCYLACJI

W EKSPERYMENTACH AKCELERATOROWYCH

- obserwacje znikania danego rodzaju neutrin

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



Jednostki:

$$\Delta m^2 [eV^2] (= 2.5 \times 10^{-3} eV^2)$$

$$E_\nu [GeV]$$

$$L [km] (= 735 km)$$

Maksimum oscylacji dla

$$\frac{1.27 \Delta m_{atm}^2 L}{E_\nu} = \frac{\pi}{2}$$

- obserwacje pojawiania się nowego rodzaju neutrin

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \simeq \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{23} \sin^2 \Delta$$

$$\mp \alpha \sin 2\theta_{13} \sin \delta_{CP} \cos \theta_{13} \sin 2\theta_{12} \sin 2\theta_{23} \sin^3 \Delta$$

$$+ \alpha \sin 2\theta_{13} \cos \delta_{CP} \cos \theta_{13} \sin 2\theta_{12} \sin 2\theta_{23} \cos \Delta \sin^2 \Delta$$

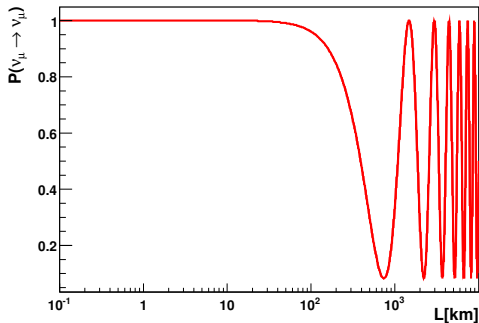
$$+ \alpha^2 \cos^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 \Delta$$

$$\Delta \equiv \frac{\Delta m_{atm}^2 L}{4E_\nu}, \quad \alpha \equiv \frac{\Delta m_{sol}^2}{\Delta m_{atm}^2}$$

Dokładnie mierzy się tylko kombinację parametrów, a nie tylko samo $\sin^2 2\theta_{13}$

POŁOŻENIE DETEKTORÓW

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



↑
Bliski detektor

↑ Daleki detektor

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) \simeq 1 - \sin^2 2\theta_{23} \sin^2\left(\frac{1.27\Delta m_{23}^2 L}{E}\right)$$

$$\nu_\mu N \rightarrow \mu X$$

- Weryfikacja hipotezy oscylacji neutrin w obszarze *atmosferycznym* i precyzyjne pomiary (z precyzją < 10 %) parametrów oscylacji Δm_{23}^2 i $\sin^2(2\theta_{23})$
- Przedstawienie prawdopodobieństwa zanikania ν_μ z wiązki w funkcji energii
- Wykluczenie egzotycznych modeli \rightarrow rozpad neutrin

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$$

$$\nu_e N \rightarrow e X$$

- Poszukiwania oscylacji $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$
Możliwość pierwszego wykazania
niezerowej wartości θ_{13} !

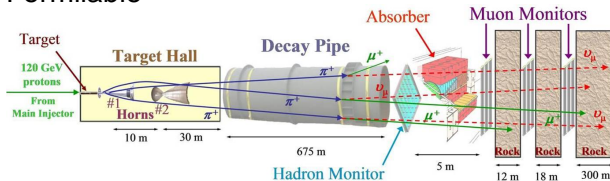
również

- Pierwszy, bezpośredni pomiar oscylacji ν vs $\bar{\nu}$
poprzez badanie neutrin atmosferycznych !
(Pierwszy podziemny detektor z polem
magnetycznym)
- Poszukiwanie neutrin sterylnych

WIAZKA NEUTRIN NuMI

WIĄZKA NuMI - WSTĘP

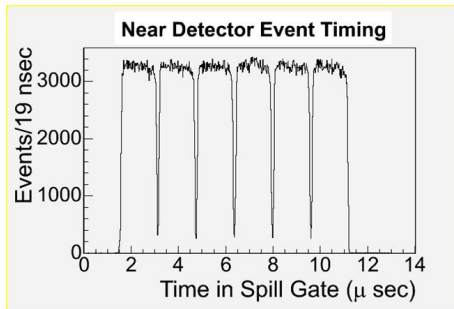
- Protony o energii 120 GeV z akceleratora Main Injector w Fermilabie



- Protony uderzają w grafitową tarczę o długości 1m
- π^+ , K^+ są ogniskowane przez dwa paraboliczne rogi (*ang.* horn) magnetyczne
- Piony i kaony rozpadają się w próżniowej rurze rozpadowej o długości 675m

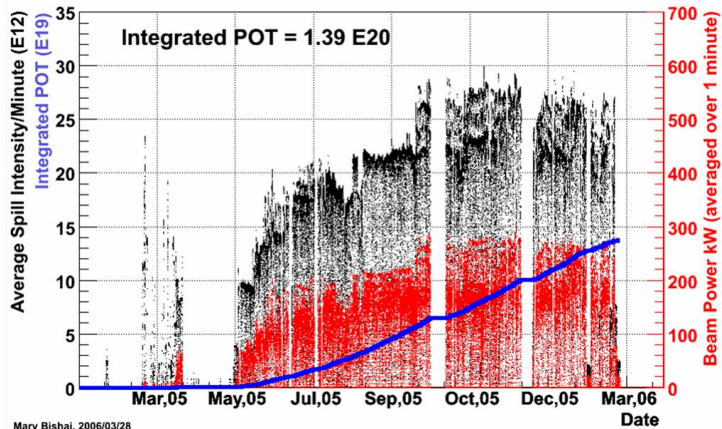
WIĄZKA PIERWOTNA - PROTONY

- Pierwotna wiązka protonów:
wysyłana w 5-6 paczkach, w czasie 8-10 μs
- 2.3×10^{13} protonów/puls
co 2.2s



WIĄZKA PIERWOTNA - PROTONY

LICZBA DOSTARCZONYCH PROTONÓW

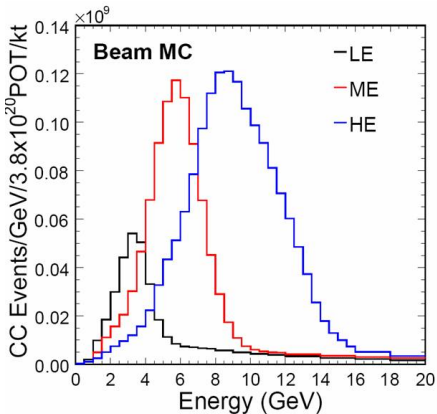


Już zebrane więcej danych niż w czasie całego działania K2K !

WIĄZKA WTÓRNA - NEUTRINA

Unikalną cechą wiązki NuMI jest możliwość zmiany widma neutrin poprzez zmianę położenia tarczy.

Obecnie dane zbierane głównie z konfiguracją niskoenergetyczną (LE), ale na początku zebrane 1.5×10^{18} pot dla ME i HE.



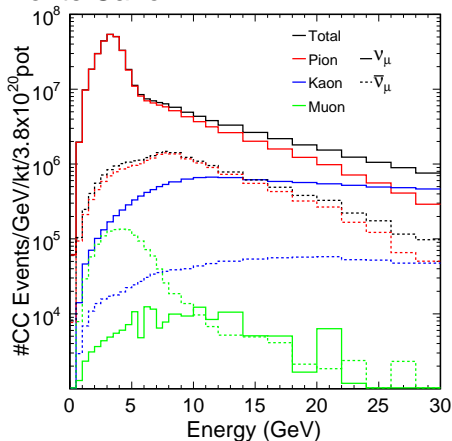
| Wiązka | Oczekiwana liczba przypadków w FD dla 1×10^{20} pot, bez oscylacji, fiducial volume |
|------------|--|
| LE (LE-10) | 390 |
| ME (pME) | 970 |
| HE (pHE) | 1340 |

SKŁADOWE WIDMA NEUTRIN

BLISKI DETEKTOR

- Rozkład widma neutrin i antyneutrin na składowe pochodzące z rozpadów pionów, kaonów i mionów.

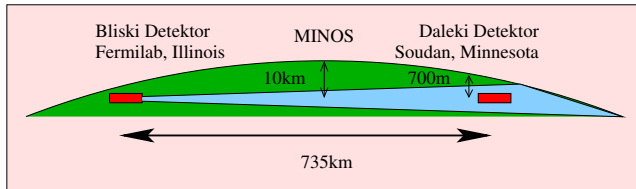
Monte Carlo



- Skład wiązki neutrin (LE): **92%** ν_μ , **6.5 %** $\bar{\nu}_\mu$
- Mały dodatek ($< \sim 1.5\%$) ν_e , $\bar{\nu}_e$ z rozpadów kaonów i mionów

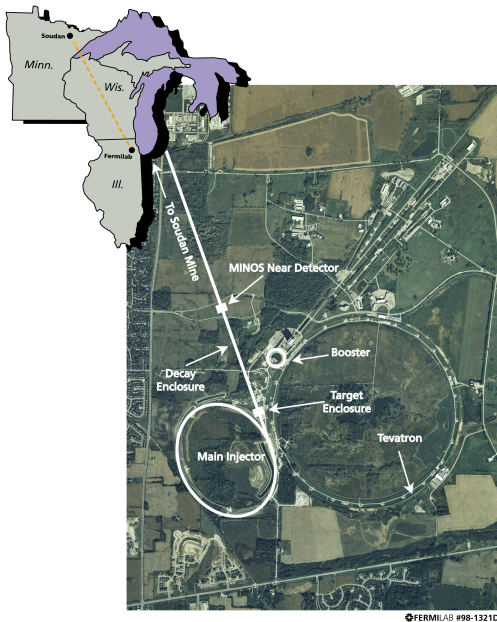
EKSPERYMENT MINOS

MINOS: PIERWSZY UŻYTKOWNIK WIĄZKI NuMI



- Drugi w historii i jedyny obecnie zbierający dane eksperyment z długą bazą
- Detektory umieszczone **w osi** wiązki NuMI
- Bliski Detektor (ND) (1kt) w ośrodku Fermilab pod Chicago
- Daleki Detektor (FD) (5.4 kt) znajduje się 735km dalej w kopalni Soudan, w Minnesocie

MINOS: PIERWSZY UŻYTKOWNIK WIĄZKI NuMI



Pierwsze oddziaływanie
neutrina z wiązki w dalekim
detektorze: 7 marzec 2005

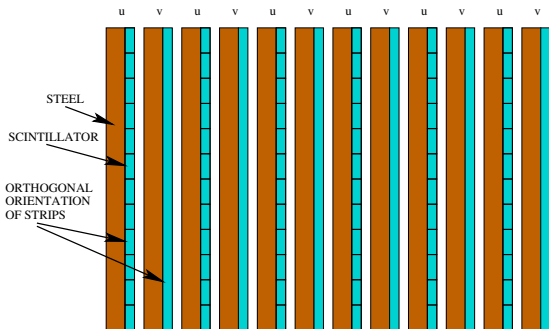
SOUDAN



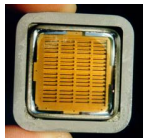
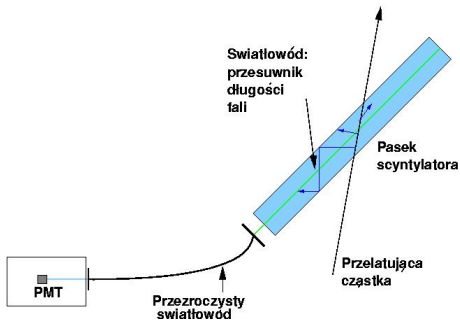
MINOS: BLISKI I DALEKI DETEKTOR

Bliski i Daleki Detektor eksperymentu MINOS mają tak bardzo jak to możliwe podobną budowę:

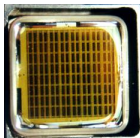
- naprzemiennie: stalowe płyty (2.54 cm) i paski scyntylatora (1cm)
- paski w co drugiej płaszczyźnie są do siebie prostopadłe



MINOS: BLISKI I DALEKI DETEKTOR

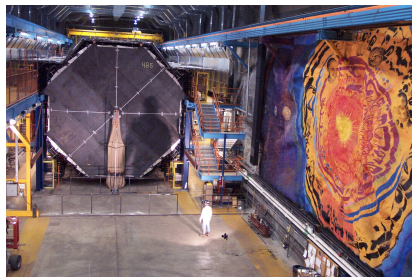


PMT M16 (FD)



PMT M64 (ND)

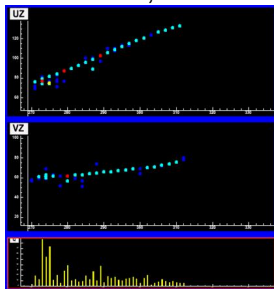
MINOS: BLISKI I DALEKI DETEKTOR



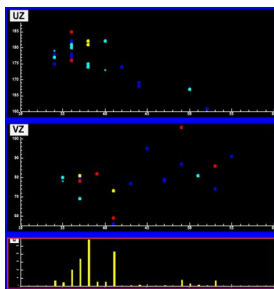
- Bliski Detektor: 1kt, 282 płaszczyzny, 3.8m × 4.8m × 15m
- Daleki Detektor: 5.4kt, 484 płaszczyzny , 8m × 8m × 30m
- $B \sim 1.2$ T w obu detektorach (próbkowanie) Bliskiego Detektora

TOPOLOGIE PRZYPADKÓW

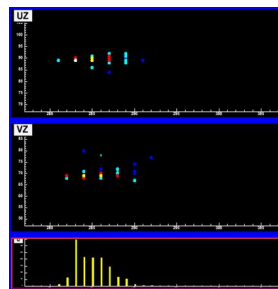
Monte Carlo, Daleki Detektor



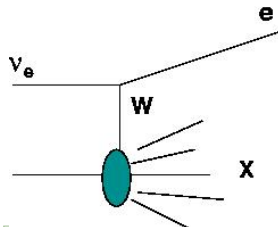
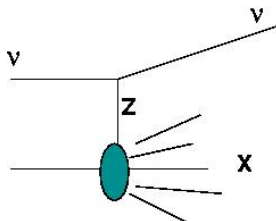
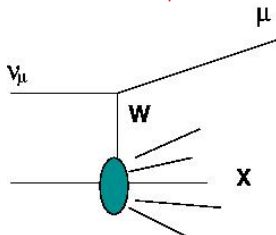
CC ν_μ



NC

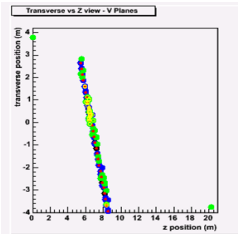
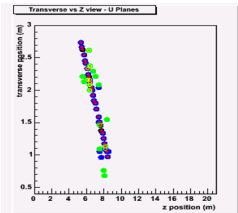


CC ν_e

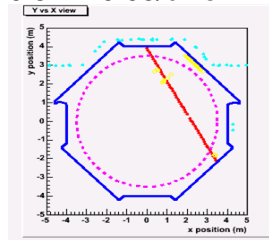


TYPOWE ODDZIAŁYWANIE W DALEKIM DETEKTORZE

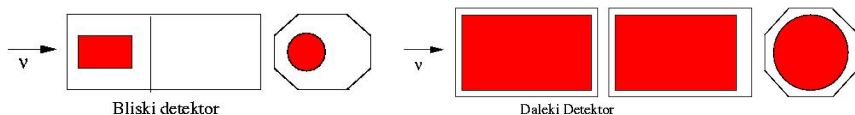
NIE Z WIĄZKI



Głębokość 2070 mwe: strumień mionów kosmicznych to 50000 przypadków/dzień
Oddziaływania neutrin atmosferycznych:
 0.54 ± 0.05 /dzień



- 1 Jeden zrekonstruowany tor (kandydat na mion)
- 2 Wiarygodny obszar detektora (fiducial volume).
Położenie wierzchołka oddziaływania:
 - ND: $1\text{m} < z < 5\text{m}$, $R < 1\text{m}$ od środka wiązki
 - FD: $z > 50\text{cm}$ od pierwszej płaszczyzny, $z > 2\text{m}$ od ostatniej płaszczyzny , $R < 3.7\text{m}$ od środka detektora



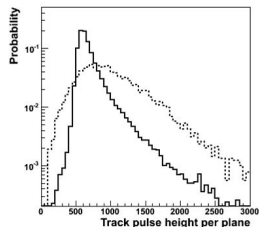
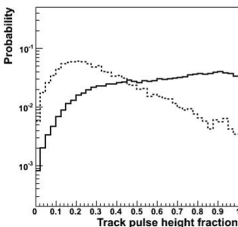
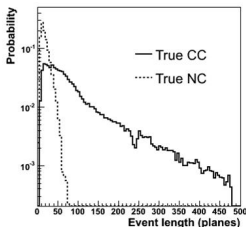
- 3 Miony z ujemnym ładunkiem (wybór ν_μ)
- 4 Cięcie na parametrze PID (Particle IDentification), używanym do selekcji oddziaływań NC i CC

ODRÓŻNIANIE ODDZIAŁYWAŃ CC ν_μ i NC

Trzy wejściowe funkcje gęstości prawdopodobieństwa (PDF), które różnicują oddziaływania CC ν_μ i NC

- 1 Długość przypadku (liczba płaszczyzn)
- 2 Suma sygnałów dla toru dzielona przez całkowitą wysokość zarejestrowanego sygnału
- 3 Dla toru: średnia wysokość sygnału w płaszczyźnie

Input variables for PDF-based event selection

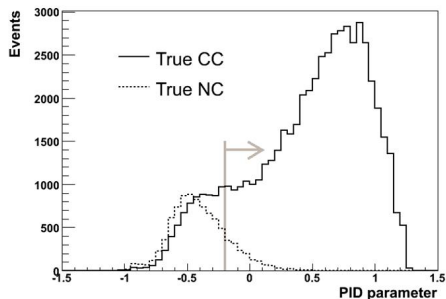


ODRÓŻNIANIE ODDZIAŁYWAŃ CC ν_μ i NC

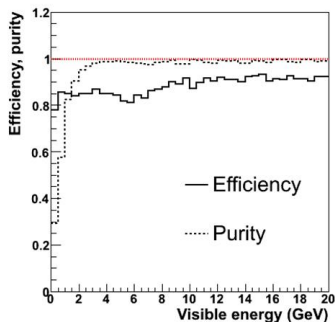
Prawdopodobieństwo, że dany przypadek jest CC ν_μ lub NC (P_μ lub P_{NC}) jest iloczynem trzech funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla CC ν_μ i odpowiednio trzech funkcji dla NC.

$$PID = -(\sqrt{-\log(P_\mu)} - \sqrt{-\log(P_{NC})})$$

PDF PID parameter distribution for true CC and NC events



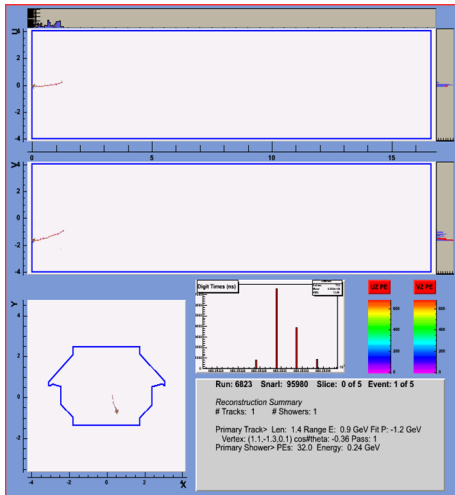
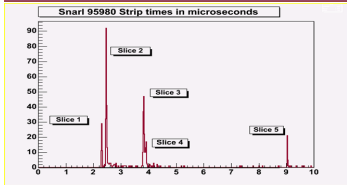
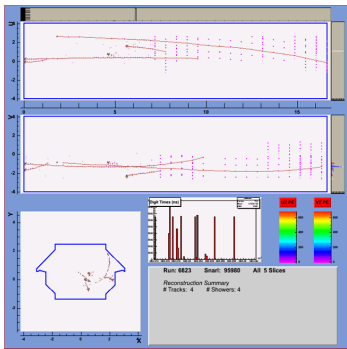
CC selection efficiencies and purities



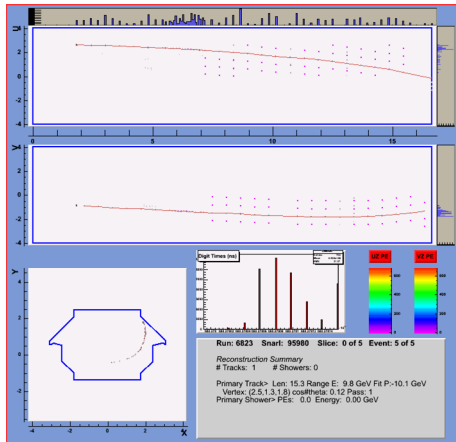
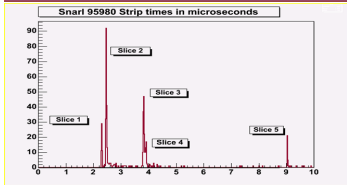
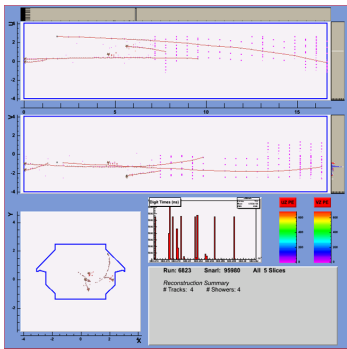
Efficiency 87 %, Purity 97%

DANE Z BLISKIEGO DETEKTORA

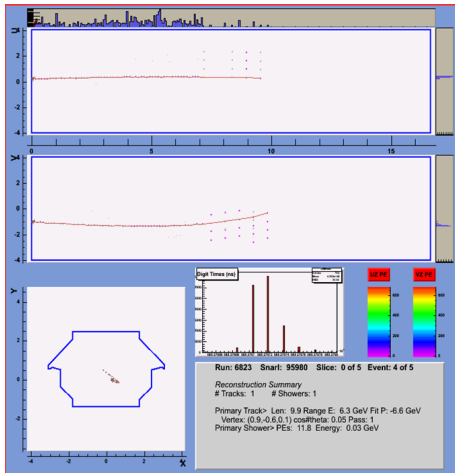
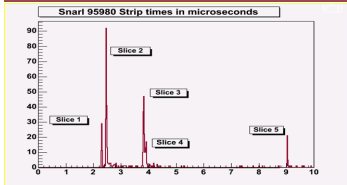
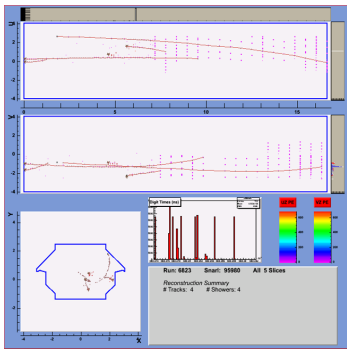
ODDZIAŁYWANIA W BLISKIM DETEKTORZE



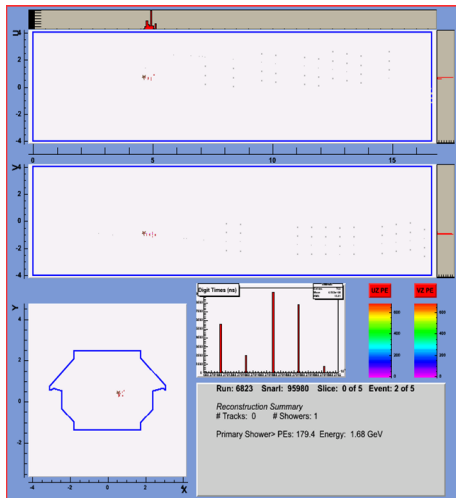
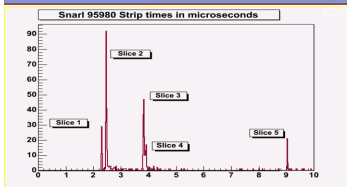
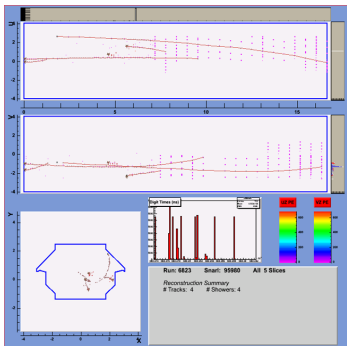
ODDZIAŁYWANIA W BLISKIM DETEKTORZE



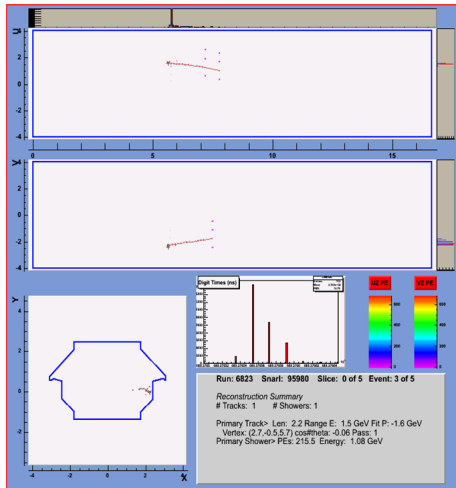
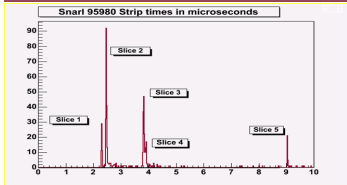
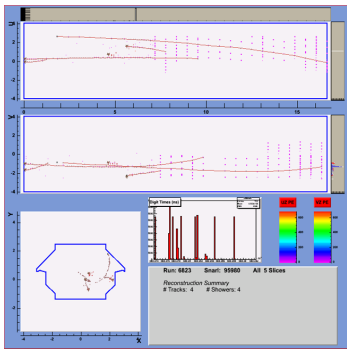
ODDZIAŁYWANIA W BLISKIM DETEKTORZE



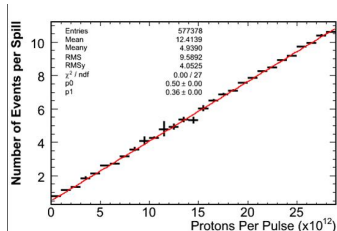
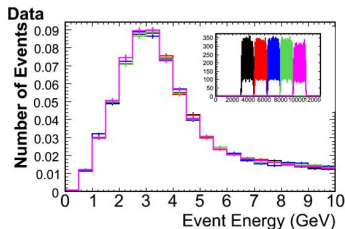
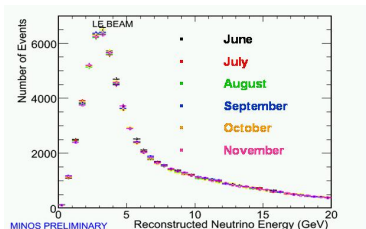
ODDZIAŁYWANIA W BLISKIM DETEKTORZE



ODDZIAŁYWANIA W BLISKIM DETEKTORZE



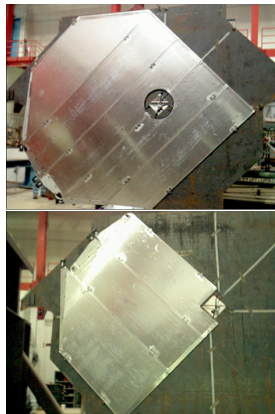
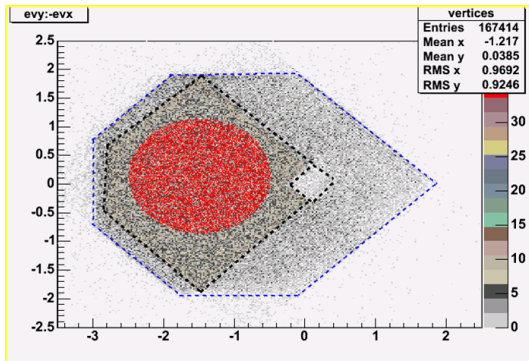
STABILNOŚĆ REKONSTRUKCJI WIDMA ENERGII



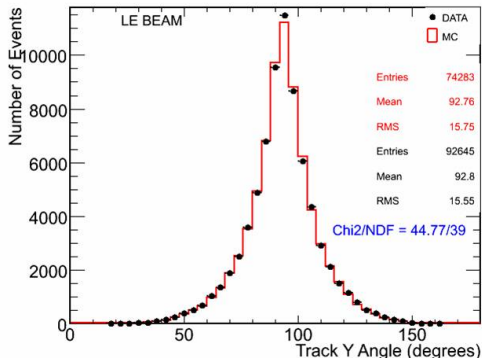
$(1 - 2.8) \times 10^{13}$ protonów/puls

DANE Z BLISKIEGO DETEKTORA

- W bliskim detektorze bardzo duża statystyka: po cięciach czyszczących około 1×10^7 ν dla 1×10^{20} pot
- Widoczne detale budowy detektora



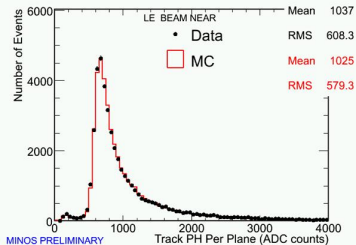
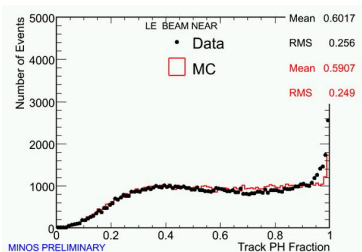
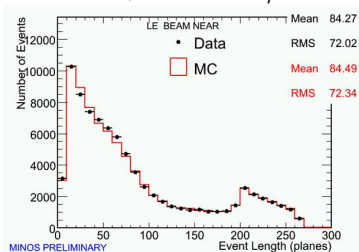
DANE Z BLISKIEGO DETEKTORA



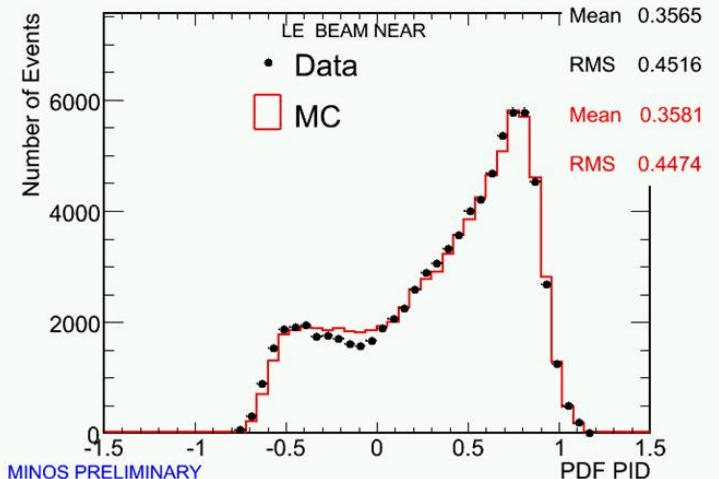
Zrekonstruowany kąt pomiędzy torem mionu a osią Y (oś pionowa).
Wiązka pod kątem 3° do poziomu.

DANE Z BLISKIEGO DETEKTORA

Zmienne używane do odróżniania oddziaływań CC ν_μ i NC.

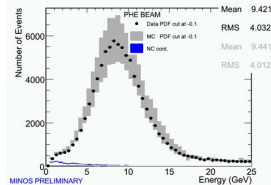
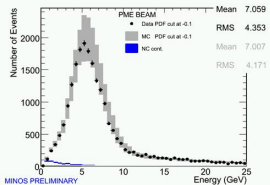
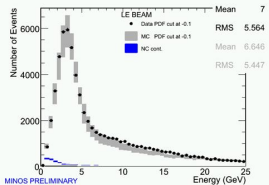


Rozkład parametru PID dla wiązki niskoenergetycznej (LE)

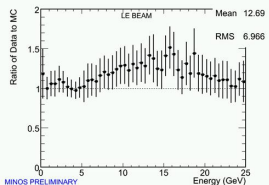


BLISKI DETEKTOR - WIDMA ENERGII

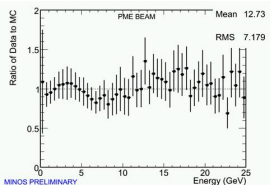
Zrekonstruowana Energia (GeV)



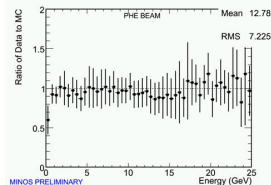
Dane/MC



LE



ME



HE

ANALIZA OSCYLACJI NEUTRIN DLA 0.93×10^{20} pot

ANALIZA PRZYPADKÓW Z DALEKIEGO DETEKTORA

- Pierwsze wyniki dla neutrin akceleratorowych na podstawie danych zebranych pomiędzy 20.05.2005 a 6.12.2005
- 0.93×10^{20} pot
- Do dzisiaj zebrane 1.39×10^{20} pot
(Od początku marca przerwa w pracy akceleratora)

- Zabezpieczenie się przed nieumyślnym naginaniem wyników do oczekiwanego (zgodnego z wynikiem Super-Kamiokande)
- Wszystkie dane z Bliskiego Detektora są dostępne
- Część danych z Dalekiego Detektora ukryta (zgodnie z nieznaną funkcją długości przypadku i energii zdeponowanej w detektorze)
- Przed otwarciem *puszki* wszystkie procedury dotyczące analizy danych muszą być zamrożone
- 4.03.2006: Otwarcie *puszki* dla 0.93×10^{20} pot

ODDZIAŁYWANIE NEUTRINA Z WIĄZKI

Run: 32133, Snarl: 97235, Slice: 1(1/1), Event 1(1/1)

Reco

#Trks: 1

#Shws: 2

q/p: -0.517 +/- 0.034, p/q: -1.935

TrkRangeEnergy: 2.042 RecoShwEnergy: 0.196

Vtx: -0.52, -2.42, 6.20

Truth

N/A

N/A

N/A

N/A

N/A

N/A

N/A

| Ignore | Previous Pass | | Next Pass | |
|--------|---------------|----------------|------------------------------|-----------|
| NuMu | Step Back | | Step Forward | |
| NuE | Prev Slc | Next Slc | Prev Evt | Next Evt |
| NC | Prev MC | Next MC | Step to ... Run, Smart... | AutoMatch |
| CC | Refresh | Log? (Checked) | Print | Quit |

Reco

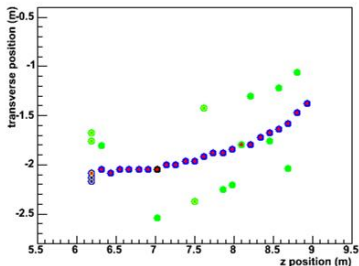
- Summed NPEs < 2.0
- 2.0 < Summed NPEs < 20.0
- Summed NPEs > 20.0
- Reconstructed Track Hit
- Reconstructed Shower Hit (cyan=EM)

Truth

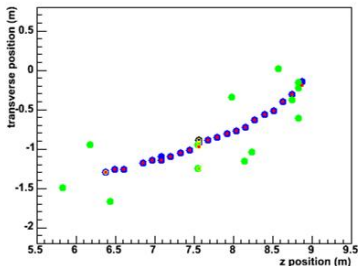
- e
- p
- $\pi^{+/-}$
- $K^{+/-0}$
- τ
- μ
- n
- π^0
- γ
- final v

initial v →

Transverse vs Z view - U Planes

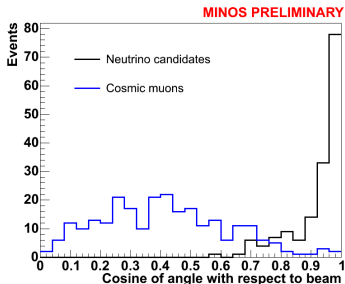
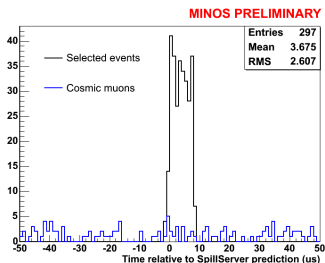


Transverse vs Z view - V Planes



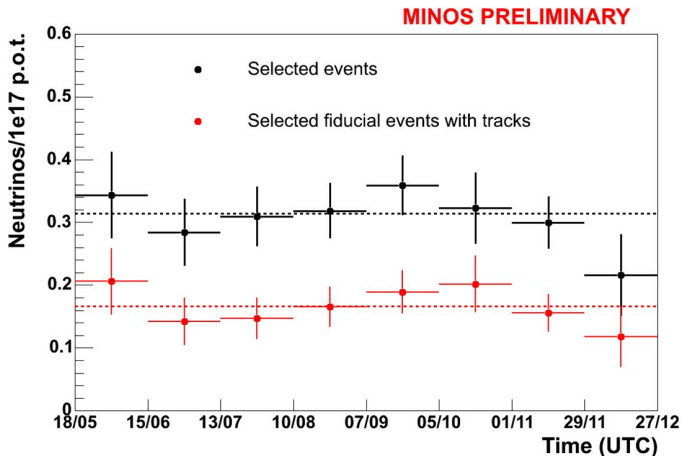
DANE Z DALEKIEGO DETEKTORA - OTWARTA PRÓBKA

Przypadki w przedziale $10 \mu\text{s}$ zgodnie z szerokością wiązki NuMI.
Tło od promieniowania kosmicznego (0.5 Hz) całkowicie usuwalne za pomocą cięć na topologię przypadku.



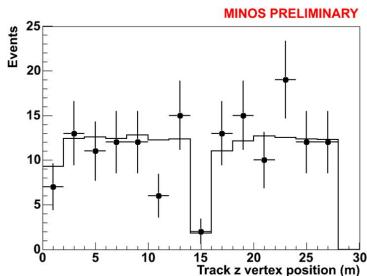
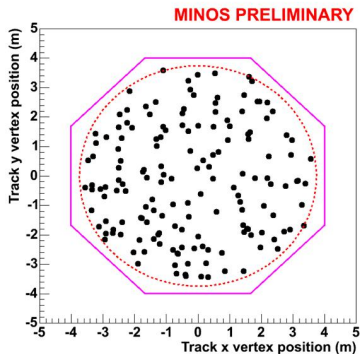
DANE Z DALEKIEGO DETEKTORA - OTWARTA PRÓBKA

Liczba zarejestrowanych przypadków w funkcji czasu.



DANE Z DALEKIEGO DETEKTORA - OTWARTA PRÓBKA

Rozkład wierzchołków oddziaływań neutrin z wiązki w Dalekim Detektorze. Porównanie MC i danych.



PRZEWIDYWANIE WIDMA W DALEKIM DETEKTORZE

METODA **BEAM MATRIX**

FD - Daleki Detektor, ND - Bliski Detektor

- 1 Poprawka na czystość (purity); Reconstructed \rightarrow True; poprawka na efektywność.

$$E_{ND\ CC\text{-like}}^{Reconstructed} \Rightarrow E_{ND\ CC}^{True}$$

- 2 Macierz Wiązki (**BEAM MATRIX**)

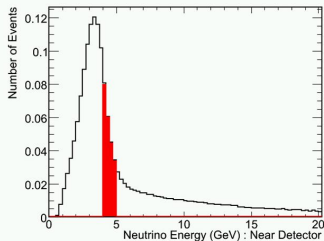
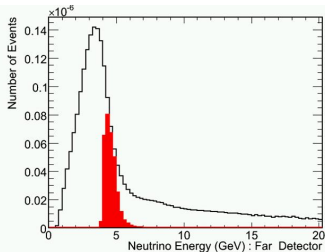
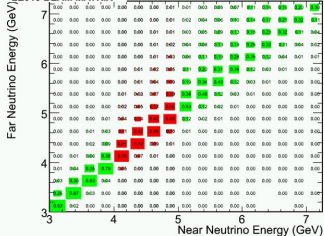
$$E_{ND\ CC}^{True} \Rightarrow E_{FD\ CC}^{True}$$

- 3 True \rightarrow Reconstructed (Bez oscylacji). Czystość używana do znalezienia tła od NC.

$$E_{FD\ CC}^{True} \Rightarrow E_{FD\ CC\text{-like}}^{Reconstructed}$$

METODA BEAM MATRIX

LE010 BEAM MATRIX

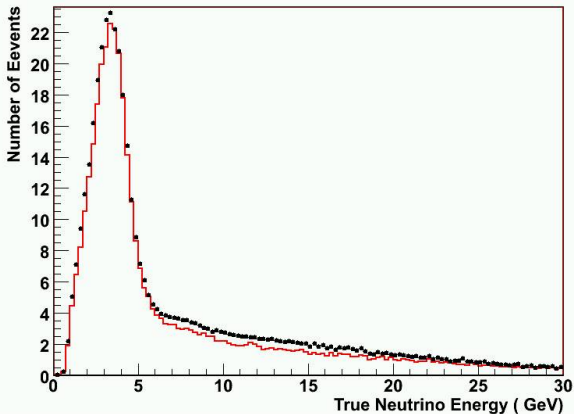


POPRAWIONE WIDMO ENERGII W DALEKIM DETEKTORZE

Czerwony histogram → nominalne MC

Punkty → przewidziane widmo energii w FD w oparciu o dane z ND

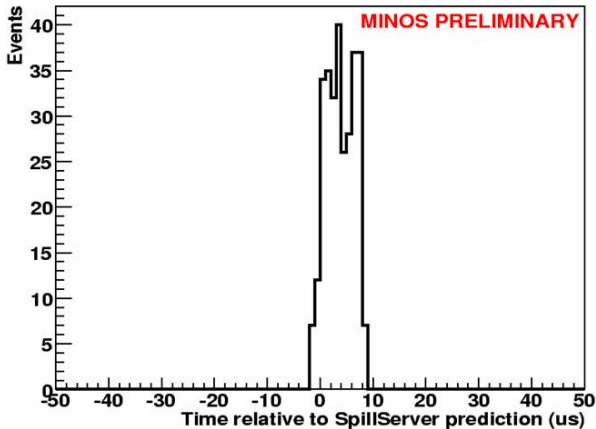
Far Detector True Spectrum : Red Line is Nominal Monte Carlo & Black Points the Predicted Spectrum using Near Detector Data



DANE Z DALEKIEGO DETEKTORA - PEŁNA PRÓBKA

Otwarcie *puszki* 4.03.2006

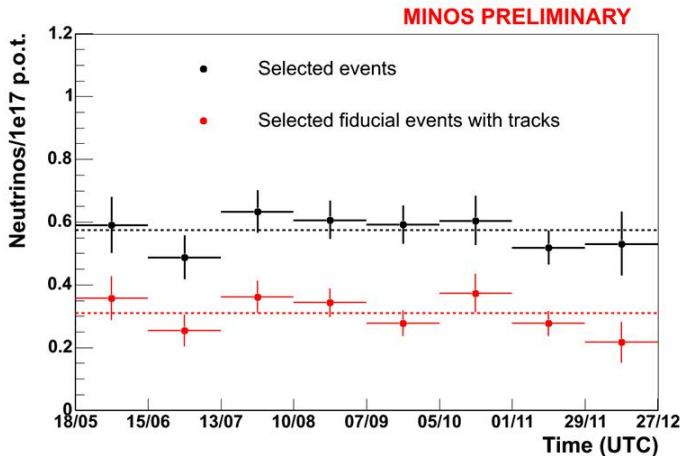
Time distribution of neutrino candidates



Okolo dwa razy więcej przypadków niż dla samej próbki pierwotnej.

DANE Z DALEKIEGO DETEKTORA - PEŁNA PRÓBKA

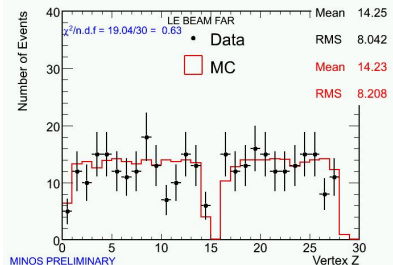
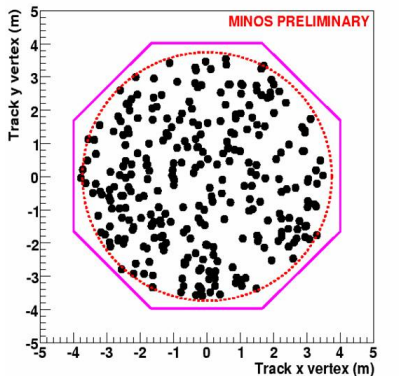
Liczba zarejestrowanych przypadków w funkcji czasu.



DANE Z DALEKIEGO DETEKTORA - PEŁNA PRÓBKA

Rozkład wierzchołków oddziaływań neutrin z wiązką w Dalekim Detektorze. Porównanie MC i danych.

Reconstructed track vertices of neutrino candidates



DALEKI DETEKTOR

LICZBY PRZYPADKÓW

| Cięcie | Liczba Przypadków | Efektywność |
|--|-------------------|---------------|
| Wszystkie przypadki (fiducial volume) | 331 | - |
| Przypadki z torem (mion) | 296 | 89.4 % |
| Cięcia na jakość toru | 281 | 84.9 % |
| Cięcie na PID (CC-like) | 204 | 61.6 % |
| Dodatknie miony | 186 | 56.2 % |
| $E_{Rec} < 30\text{GeV}$ | 166 | 50.2 % |

DALEKI DETEKTOR

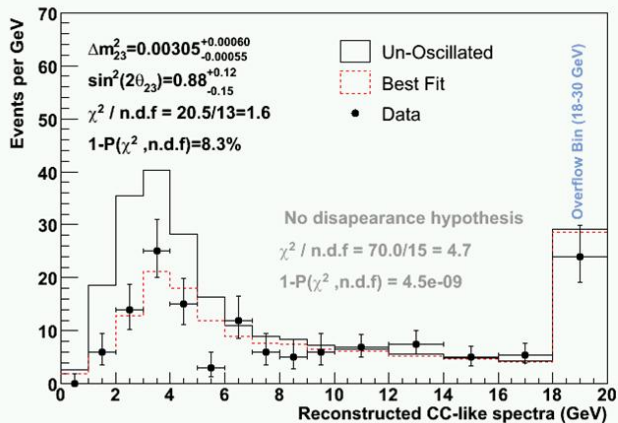
OBSERWOWANE i OCZEKIWANE LICZBY PRZYPADKÓW

| Próbka danych | obserwowane | oczekiwane | stosunek | znaczoność |
|---|-------------|--------------|----------|--------------|
| Kandydaci na CC (CC-like) $(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu)$ | 204 | 298 ± 15 | 0.69 | 4.1σ |
| $\nu_\mu (< 30\text{GeV})$ | 166 | 249 ± 14 | 0.67 | 4.0σ |
| $\nu_\mu (< 10\text{GeV})$ | 92 | 177 ± 11 | 0.52 | 5.0σ |

WIDMO ENERGII

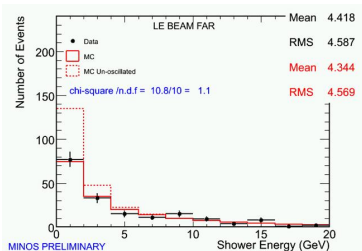
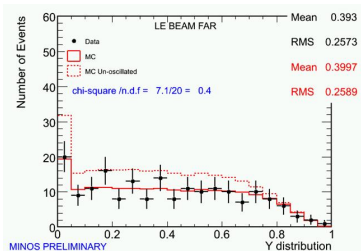
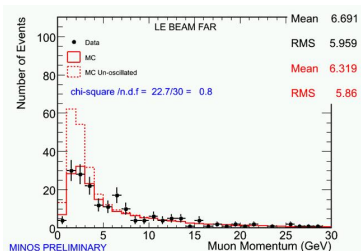
DOPASOWANIE MODELU OSCYLACJI

Oscillation Results for 0.93E20 p.o.t



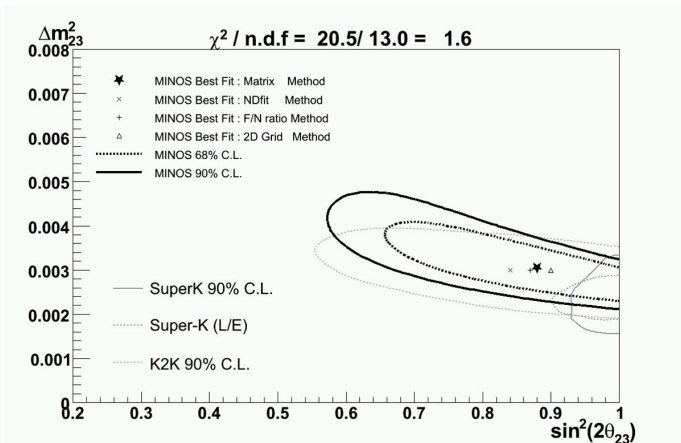
DALEKI DETEKTOR

ROZKŁADY ZMIENNYCH

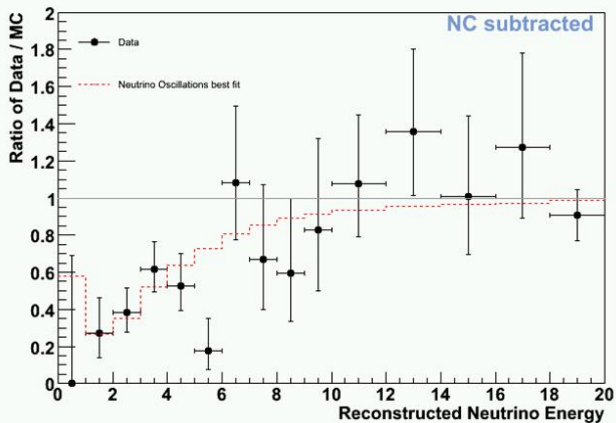


PRZESTRZEŃ PARAMETRÓW OSCYLACJI

DOZWOLONE OBSZARY



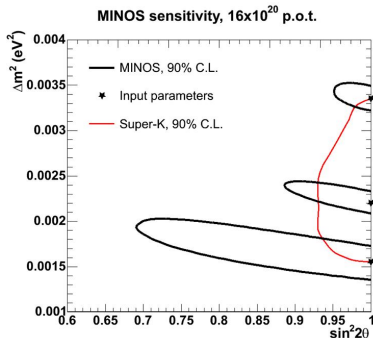
KRZYWA OSCYLACYJNA



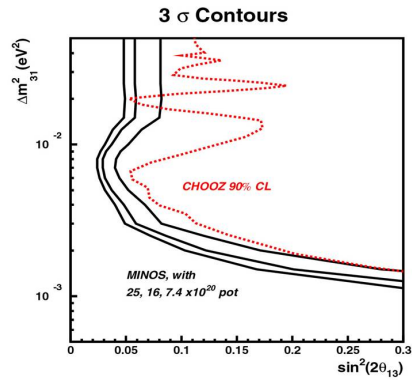
BŁĘDY SYSTEMATYCZNE

| Źródło błędu | Zmiana Δm^2 | Zmiana $\sin^2 2\theta_{23}$ |
|--|---|------------------------------|
| Normalizacja $\pm 4 \%$ | 0.63×10^{-4} | 0.025 |
| Skala energii $\mu \pm 2 \%$ | 0.14×10^{-4} | 0.020 |
| Względna skala energii kaskady hadronowej $\pm 2 \%$ | 0.27×10^{-4} | 0.020 |
| Zawartość NC $\pm 30 \%$ | 0.77×10^{-4} | 0.035 |
| Niepewność σ CC | 0.50×10^{-4} | 0.016 |
| Niepewność wiązki | 0.13×10^{-4} | 0.012 |
| Oddziaływania wewnątrz- jądrowe | 0.27×10^{-4} | 0.030 |
| RAZEM (suma w kwadratach) | 1.19×10^{-4} | 0.063 |
| Błąd stat. (dane) | 6.4×10^{-4} | 0.15 |

PERSPEKTYWY NA PRZYSZŁOŚĆ



Znikanie ν_μ



$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$

- Pierwsze wyniki z eksperymentu MINOS dotyczące oscylacji neutrin akceleratorowych dla 0.93×10^{20} pot.

$$\Delta m_{23}^2 = 3.05_{-0.55}^{+0.60}(\text{stat}) \pm 0.12(\text{syst}) \times 10^{-3} \text{eV}^2$$

$$\sin^2 2\theta_{23} = 0.88_{-0.15}^{+0.12}(\text{stat}) \pm 0.06(\text{syst})$$