

# Neutrinowy eksperyment MINOS

Katarzyna Grzelak

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych  
IFD UW

12.03.2008

# PLAN

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

# WSTĘP

$\nu_{\mu}$

→



- MINOS: eksperyment zbudowany w celu potwierdzenia hipotezy oscylacji neutrin i zmierzenia parametrów modelu oscylacji
- Kontrolowana wiązka neutrin z akceleratora
- Pierwsze oddziaływanie neutrina z wiązki w dalekim detektorze: 7 marzec 2005
- Wyniki dla do tej pory przeanalizowanych danych, odpowiadające  $2.5 \times 10^{20}$  pot (protonów na tarczę)

# WPROWADZENIE

## **Eksperyment MINOS:**

27 instytucji, 147 fizyków

**Instytucje:** Argonne, Arkansas Tech, Athens, Benedictine, Brookhaven, Caltech, Cambridge, Campinas, Fermilab, Harvard, IIT, Indiana, Minnesota, Twin Cities, Minnesota-Duluth, Oxford, Pittsburgh, Rutherford, Sao Paulo, South Carolina, Stanford, Sussex, Texas A&M, Texas-Austin, Tufts, UCL, Uniwersytet Warszawski, William&Mary





# MACIERZ MIESZANIA DLA NEUTRIN

Trzy zapachy neutrin jako kombinacja trzech stanów własnych masy.

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

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

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

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

$\delta \rightarrow$  faza łamania CP

# MACIERZ MIESZANIA DLA NEUTRIN, cz. 2

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

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

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

neutrino  
atmosferyczne



poszukiwane



deficyt  
neutrin słonecznych



Super-K, K2K	CHOOZ	Homestake, SNO	<b>Eksperymenty</b> kamienie milowe
MINOS	MINOS	KamLAND, Borexino	obecne
T2K	T2K, reaktorowe		przyszłe

# PRAWDOPODOBIENSTWO PRZEMIANY $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta$

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

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

**Parametry modelu:** 3 kąty mieszania  $\theta_{23}$ ,  $\theta_{13}$  i  $\theta_{12}$ , 1 faza  $\delta$  i dla trzech rodzajów neutrin 2 niezależne różnice mas  $\Delta m^2$ .



# BADANIE ZJAWISKA OSCYLACJI W EKSPERYMENTACH AKCELERATOROWYCH

- 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:

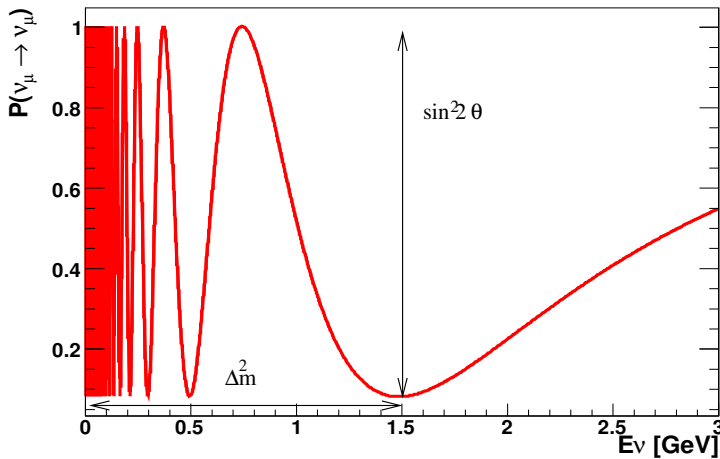
$$\Delta m^2 [eV^2]$$

$$E_\nu [GeV]$$

$$L [km]$$

Maksimum oscylacji dla

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



# BADANIE ZJAWISKA OSCYLACJI W EKSPERYMENTACH AKCELERATOROWYCH

- obserwacje pojawiania się nowego rodzaju neutrin

$$\begin{aligned} P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) &\simeq \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{23} \sin^2 \Delta \\ &\mp \alpha \sin 2\theta_{13} \sin \delta_{CP} \cos \theta_{13} \sin 2\theta_{12} \sin 2\theta_{23} \sin^3 \Delta \\ &+ \alpha \sin 2\theta_{13} \cos \delta_{CP} \cos \theta_{13} \sin 2\theta_{12} \sin 2\theta_{23} \cos \Delta \sin^2 \Delta \\ &+ \alpha^2 \cos^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 \Delta \end{aligned}$$

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

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

# Cele eksperymentu MINOS

- **Weryfikacja hipotezy oscylacji  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  i precyzyjny pomiar (<10%) parametrów modelu neutrin  $\Delta m_{23}^2$  and  $\sin^2 2\theta_{23}$**
- Poszukiwania jeszcze nie zaobserwowanych przy tej skali mas, oscylacji  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  (poszukiwanie  $\theta_{13}$ )
- Poszukiwanie/wykluczenie egzotycznych hipotez: sterylne neutrina, rozpad neutrina
- Pierwszy, bezpośredni pomiar oscylacji  $\nu$  vs  $\bar{\nu}$  (symetria CPT)
- Badanie oddziaływań  $\nu$ , wyznaczanie przekrojów czynnych przy użyciu danych z bliskiego detektora
- Badanie mionów z promieniowania kosmicznego

# Stan analiz eksperymentu MINOS

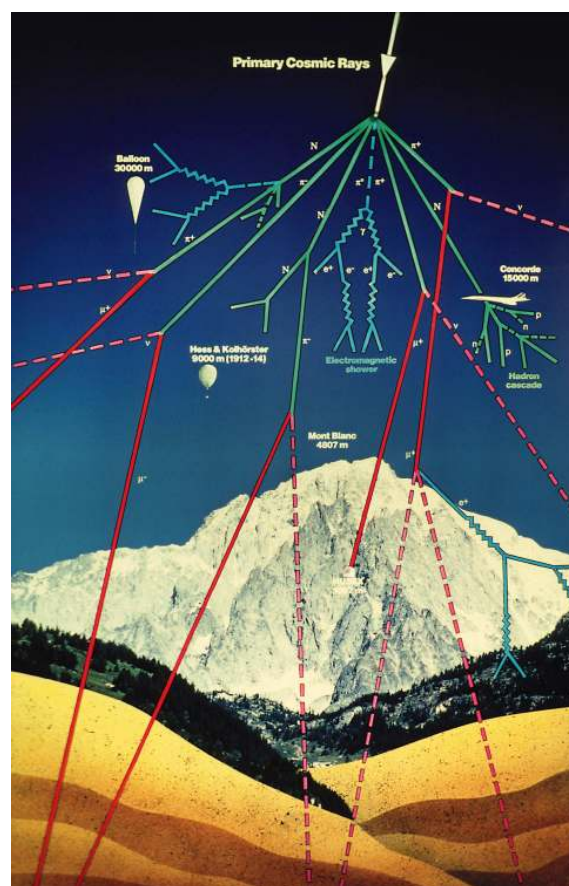
## Neutrina akceleratorowe

- Pierwsze oddziaływanie w dalekim detektorze 7 marca 2005
- Pierwsze opublikowane wyniki (zanikanie  $\nu_\mu$ : w oparciu o  $1.27 \times 10^{20}$  pot (Run I) (215 oddziaływań  $\nu_\mu$ )
- Do tej pory przeanalizowano  $2.5 \times 10^{20}$  pot (563 oddziaływań  $\nu_\mu$ )
- Do chwili obecnej zebrano około  $3.88 \times 10^{20}$  pot (Run II + Run III)
- Prace nad analizą  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ , NC, opracowaniem danych z ND

# Stan analiz eksperymentu MINOS

## Neutrina atmosferyczne

- Dane zbierane od lipca 2003
- Opublikowane wyniki:
  - oddziaływania z wierzchołkiem wewnątrz detektora, rozdzielone  $\nu_\mu$  i  $\bar{\nu}_\mu$ , po selekcji  $\sim 0.25$  oddziaływania na dzień
  - miony z oddziaływań neutrin (poruszające się ku powierzchni ziemi i poziome), rozdzielone  $\nu_\mu$  i  $\bar{\nu}_\mu$ , po selekcji  $\sim 0.15$  oddziaływania na dzień
  - Prace nad połączeniem obu analiz



# Stan analiz eksperymentu MINOS

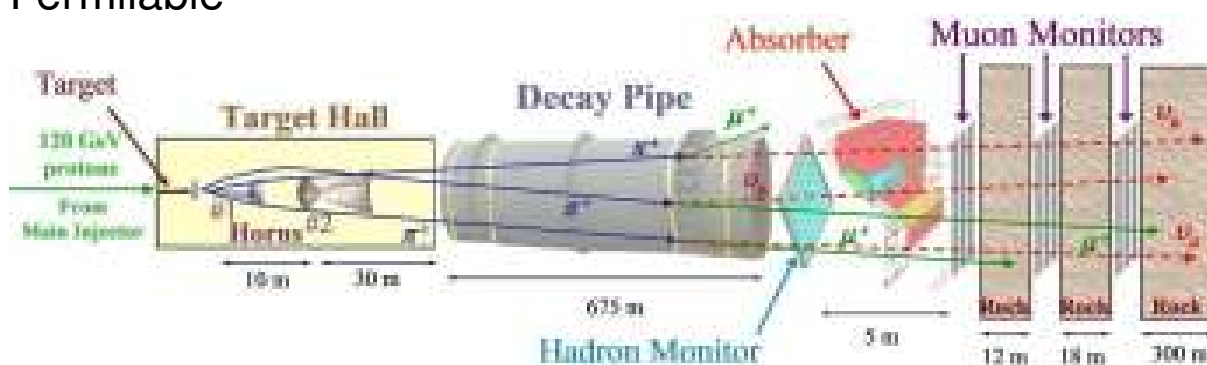
## Miony z promieniowania kosmicznego

- pomiar  $N_{\mu^+} / N_{\mu^-}$
- daleki detektor (FD): rozróżnianie ładunku mionu dla  $p < 250 \text{ GeV}/c$ , częstość rejestracji mionów  $\sim 0.25 \text{ Hz}$
- bliski detektor (ND): miony o średniej energii 8 GeV, częstość rejestracji mionów  $\sim 10 \text{ Hz}$

# WIĄZKA NEUTRIN NuMI

# WIĄZKA NEUTRIN N<sub>u</sub>MI

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

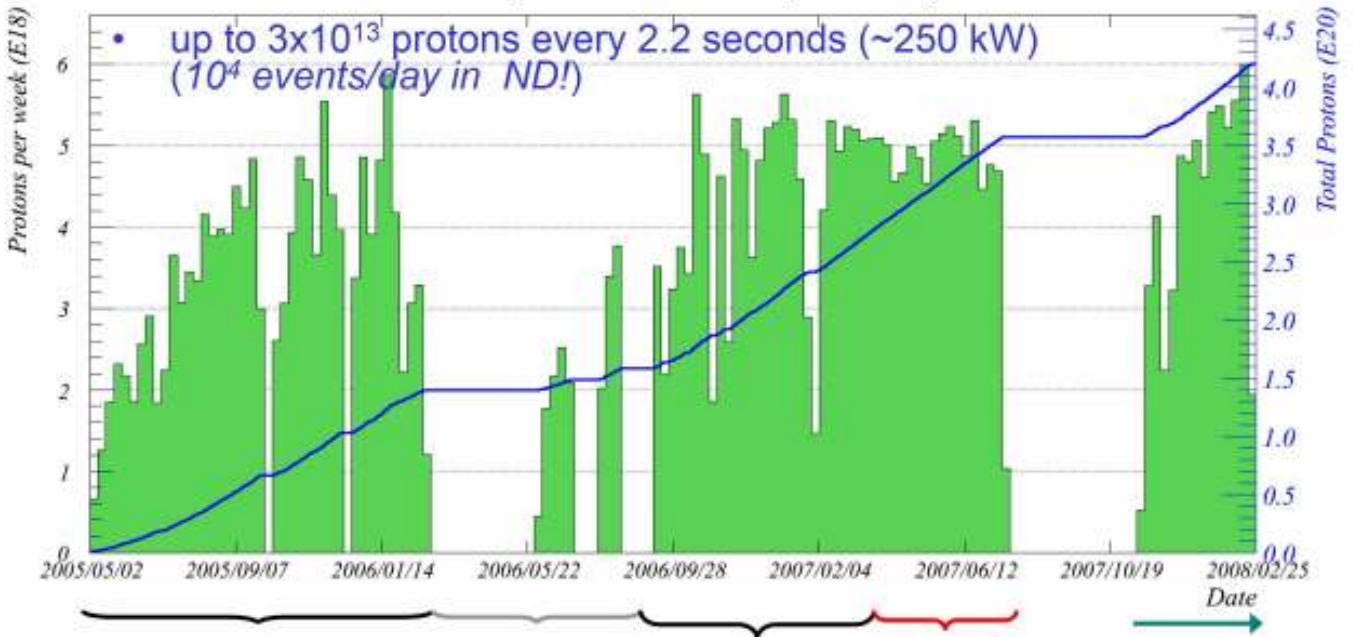




# WIĄZKA PIERWOTNA - PROTONY

## LICZBA DOSTARCZONYCH PROTONÓW

Total NuMI protons to 00:00 Monday 25 February 2008



**RUN I -  $1.27 \times 10^{20}$  POT**  
(published in PRL)

Higher energy beam

**RUN IIa  $1.23 \times 10^{20}$  POT**  
(NEW)

**RUN IIb  $\sim 0.75 \times 10^{20}$  POT**  
(in can)

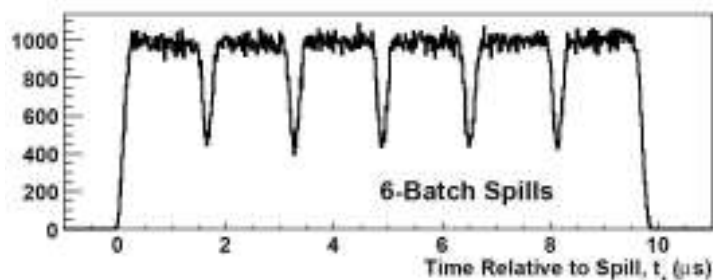
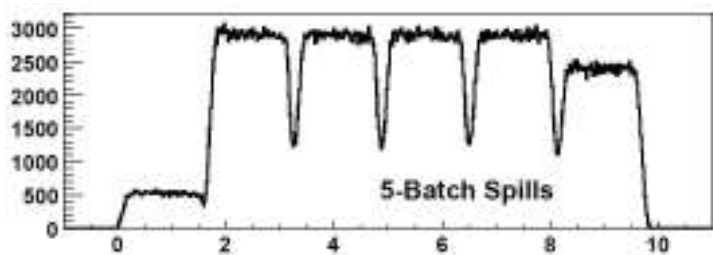
**RUN III  $> 0.63 \times 10^{20}$  POT**  
(current)

Far Det  
>99% live!

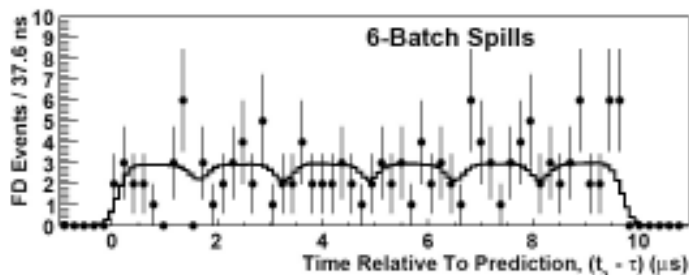
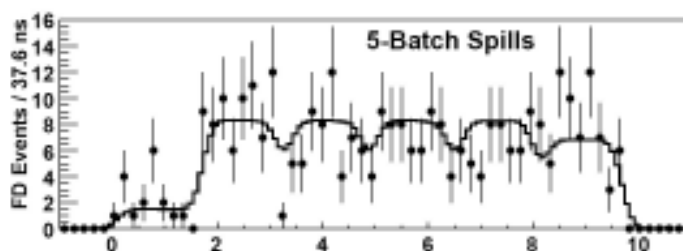


# STRUKTURA WIĄZKI PIERWOTNEJ WIDZIANA W ND i FD

- Pierwotna wiązka protonów: wysyłana w 5-6 paczkach, w czasie  $10 \mu\text{s}$
- $2.4 \times 10^{13}$  protonów/puls co 2.2s



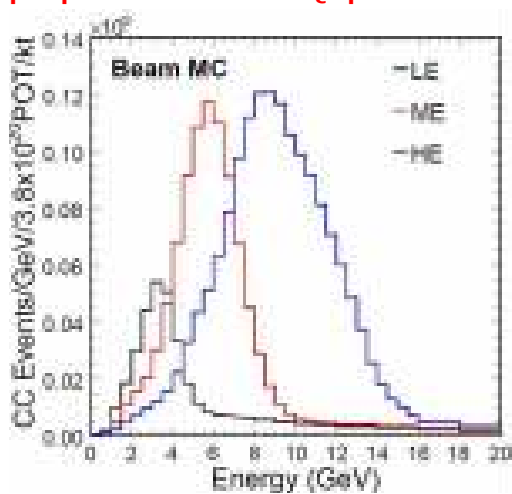
**Bliski Detektor**



**Daleki Detektor**

# WIĄZKA WTÓRNA - NEUTRINA

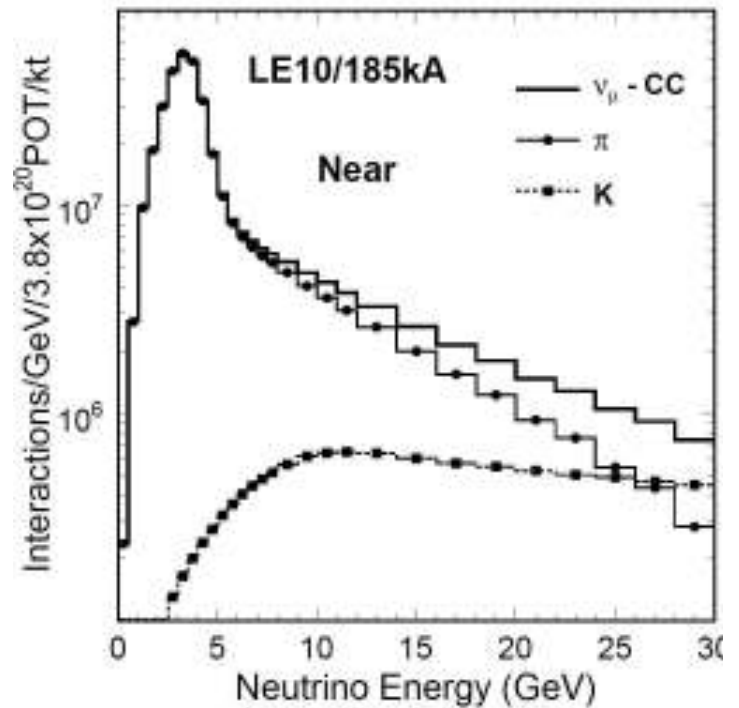
Unikalną cechą wiązki NuMI jest możliwość zmiany widma neutrin poprzez zmianę położenia tarczy.



Skład

wiązki neutrin (LE-10): 98.5 %  
( $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$ ) (6.5 %  $\bar{\nu}_\mu$ ), 1.5 % ( $\nu_e + \bar{\nu}_e$ )

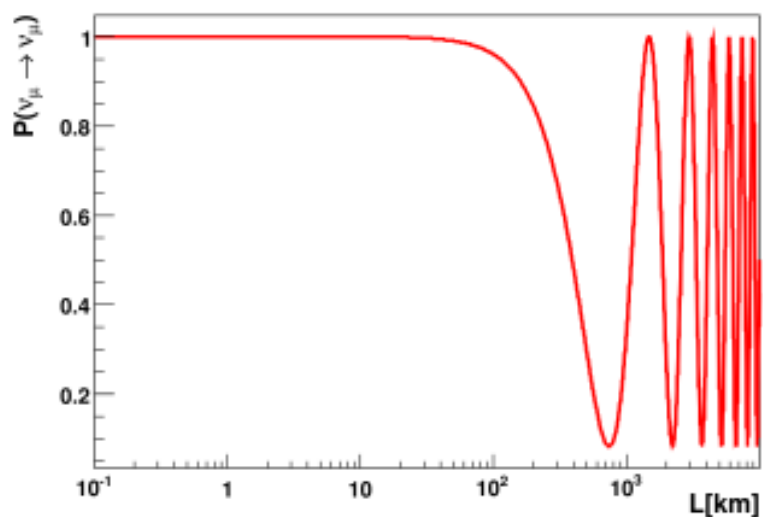
$\nu_\mu$  głównie z rozpadów  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$



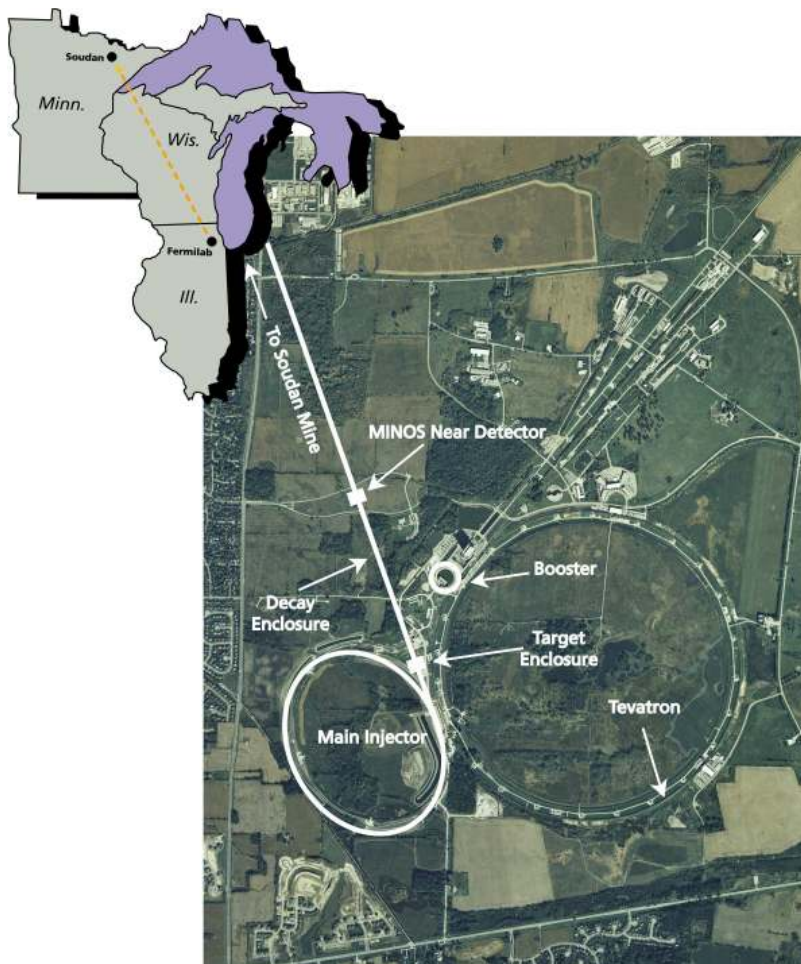
# EKSPERYMENT MINOS

# POŁOŻENIE DETEKTORÓW

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



# MINOS: POŁOŻENIE DETEKTORÓW



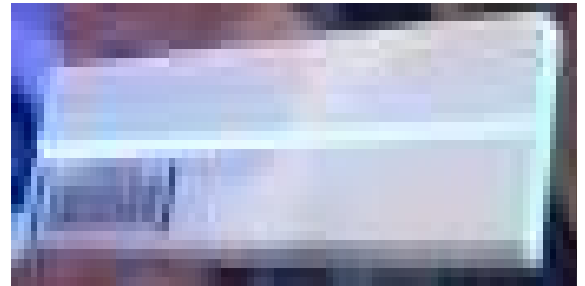
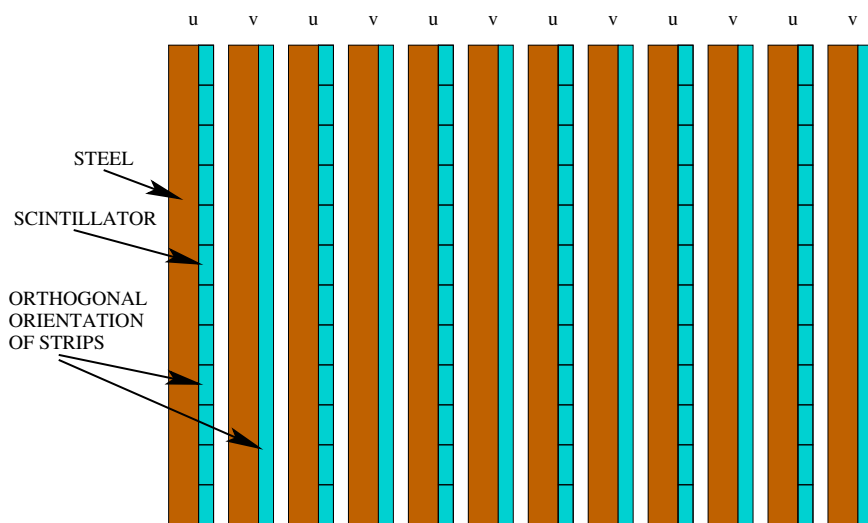
# DALEKI DETEKTOR: KOPALNIA SOUDAN



# MINOS: BLISKI I DALEKI DETEKTOR

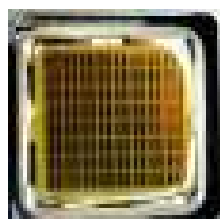
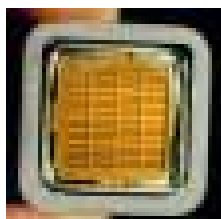
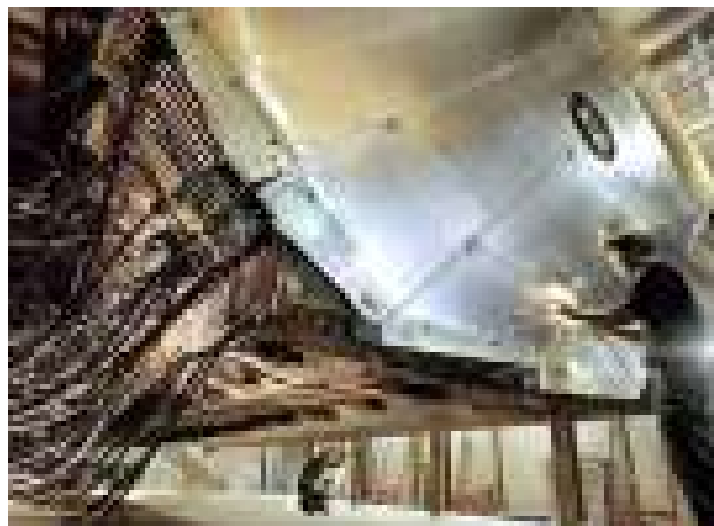
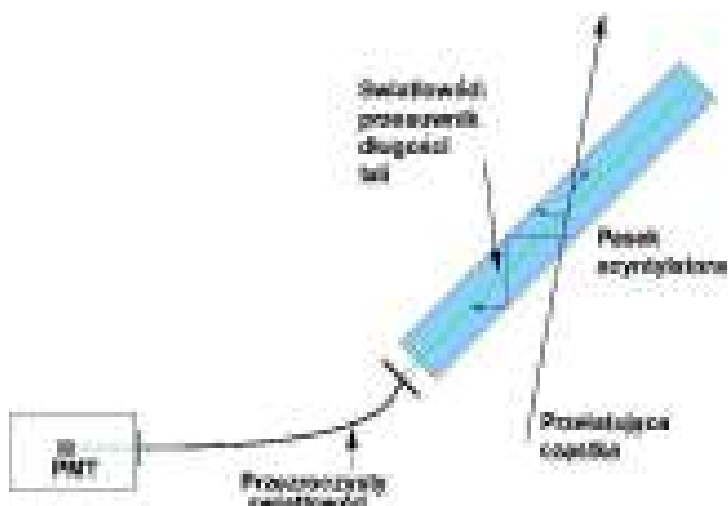
Bliski i Daleki Detektor eksperymentu MINOS mają tak bardzo jak to możliwe podobną budowę:

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





# MINOS: BLISKI I DALEKI DETEKTOR



PMT M16 (FD)    PMT M64 (ND)

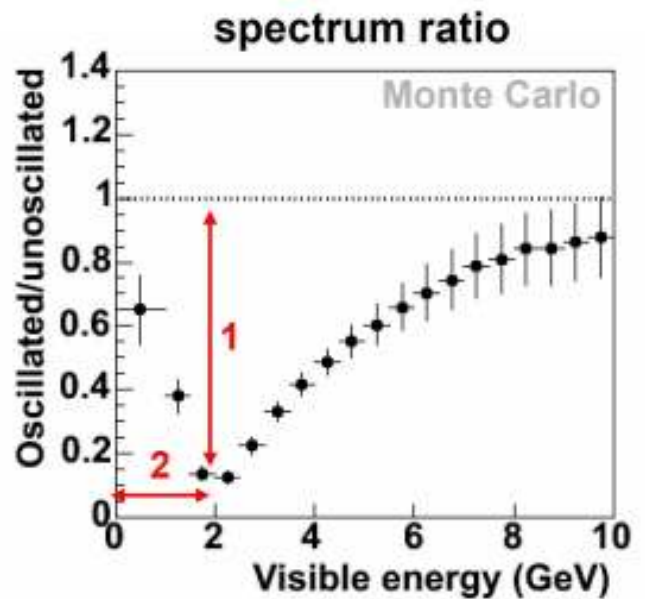
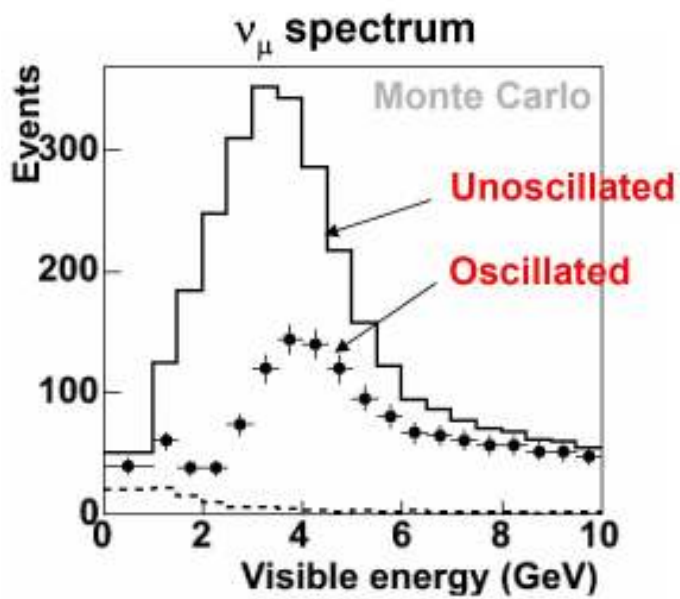


# OSCYLACJE NEUTRIN AKCELERATOROWYCH w MINOS'ie

# PRZYKŁAD ANALIZY ZNIKANIA $\nu_\mu$

Symulacja Monte Carlo

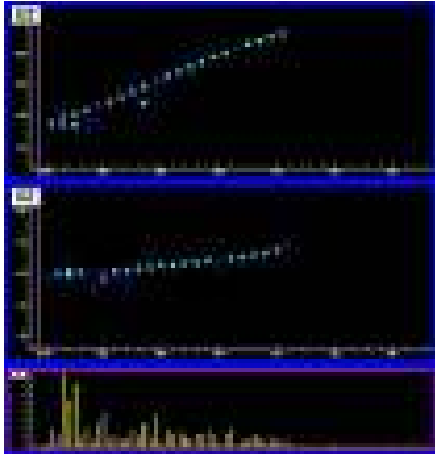
$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \underbrace{\sin^2 2\theta}_1 \sin^2 \left( 1.267 \underbrace{\Delta m^2}_2 L / E \right)$$



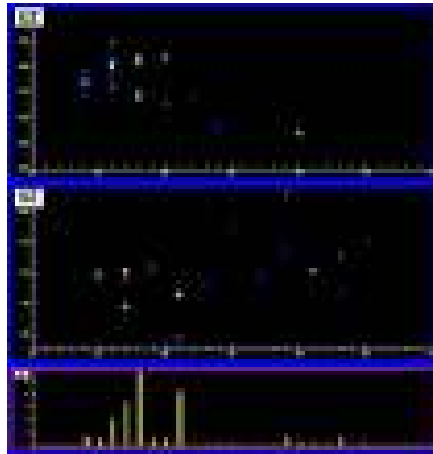


# TOPOLOGIE PRZYPADKÓW Z WIĄZKI NuMI

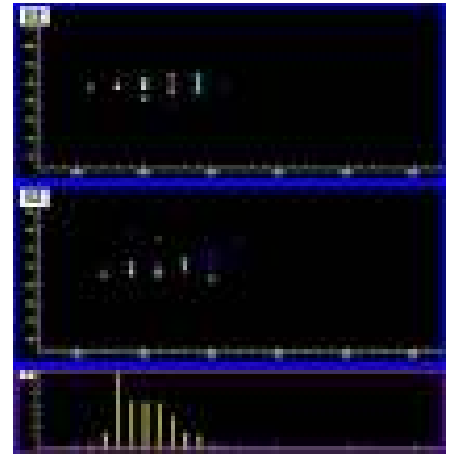
Monte Carlo, Daleki Detektor



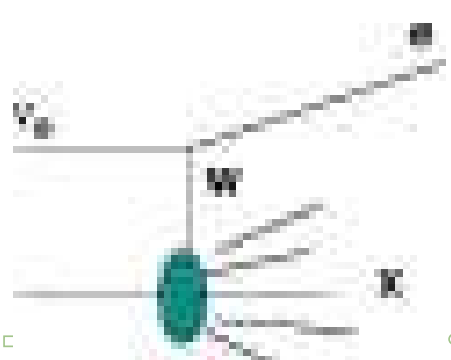
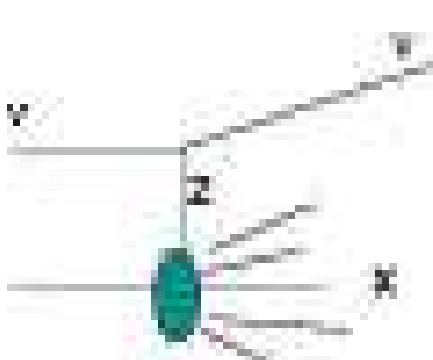
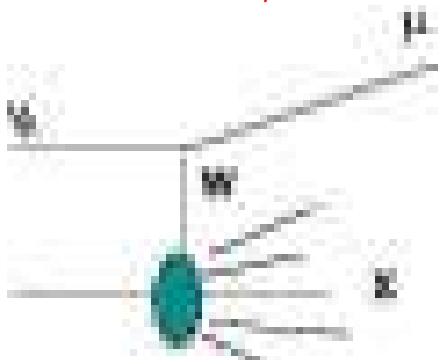
CC  $\nu_\mu$



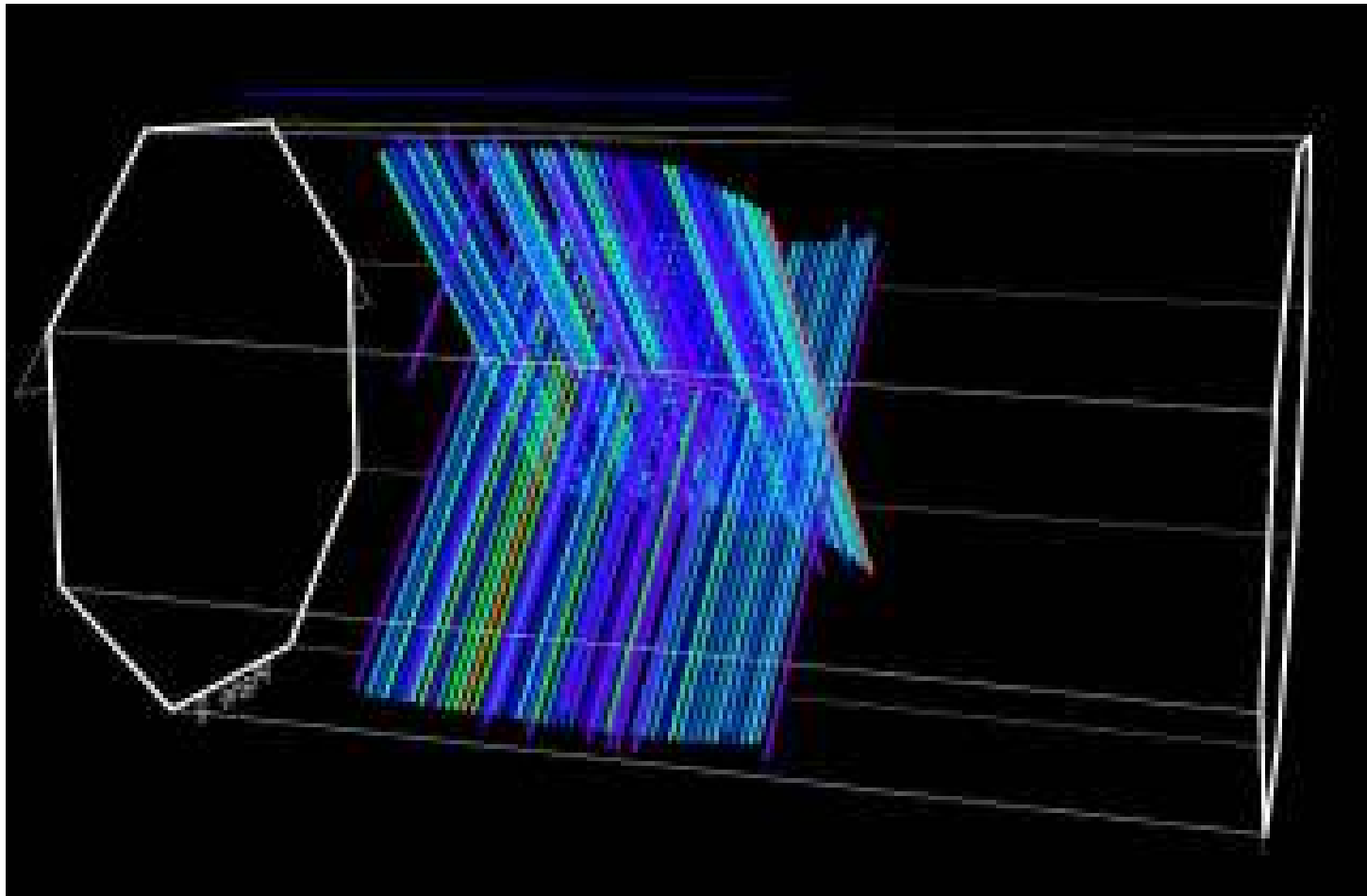
NC



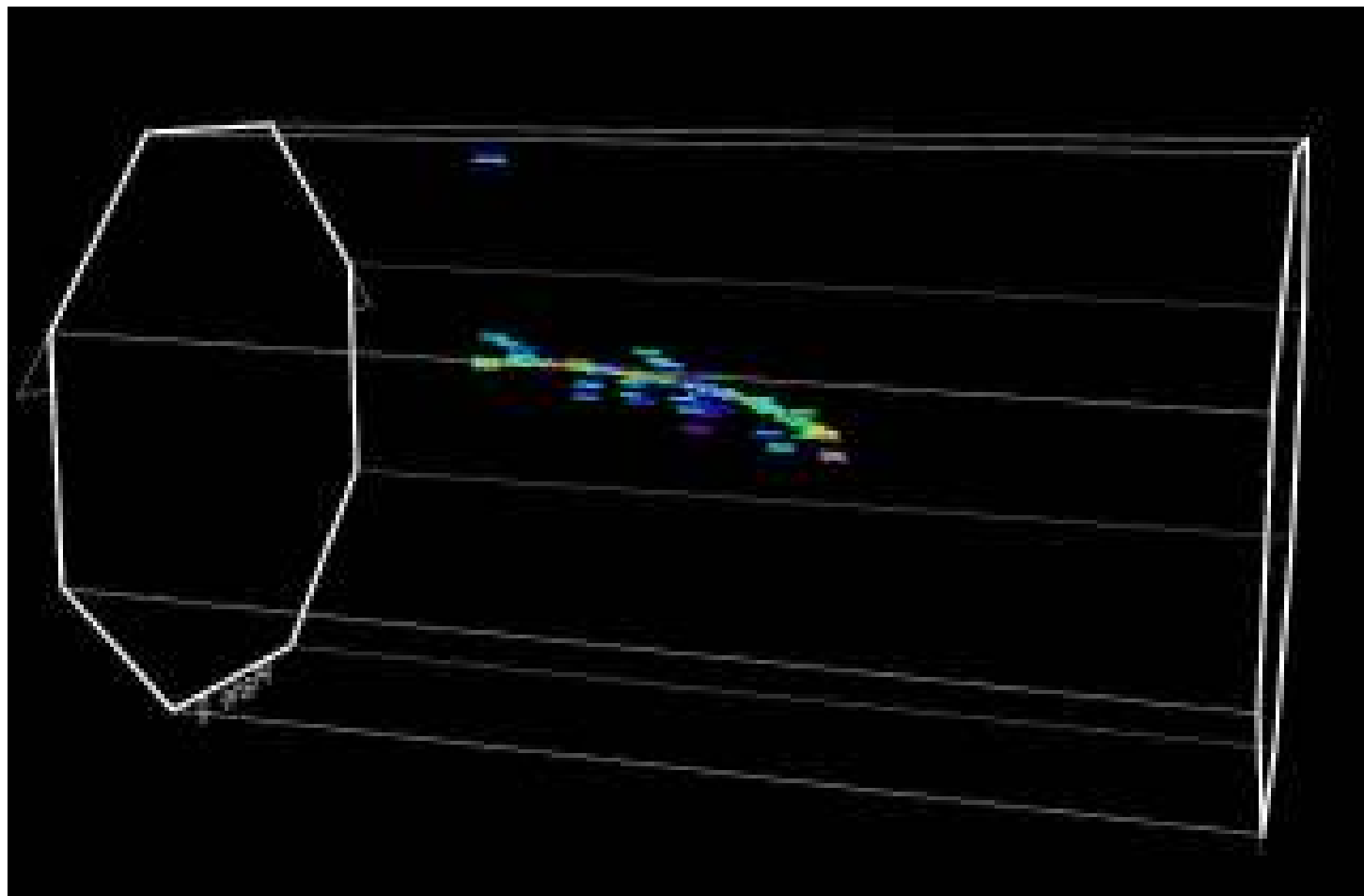
CC  $\nu_e$



# REKONSTRUKCJA w MINOS'ie



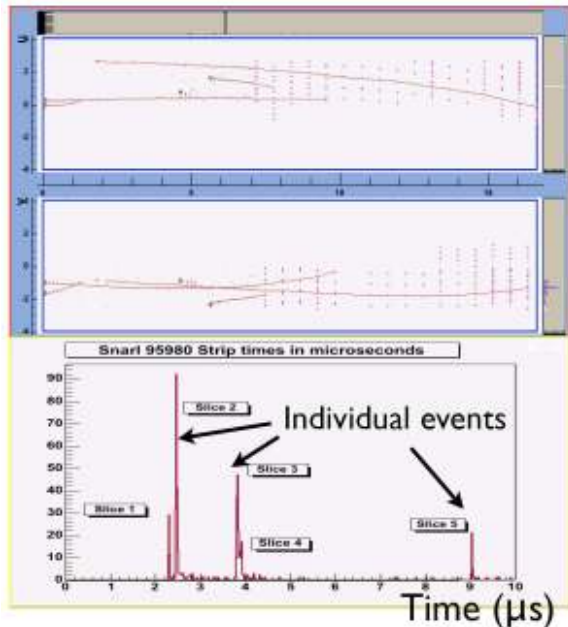
# REKONSTRUKCJA w MINOS'ie





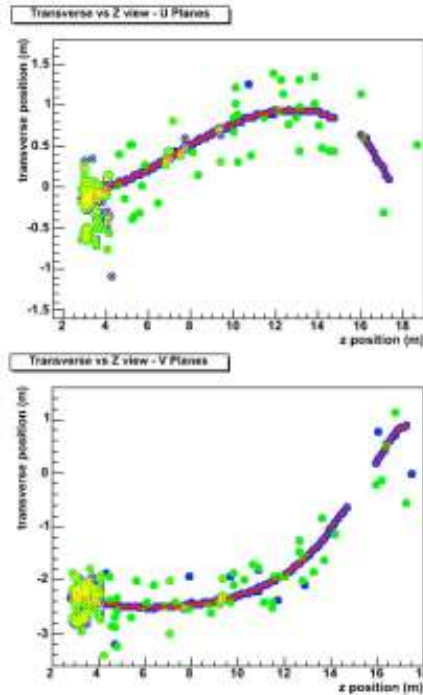
# TYPOWE ODDZIAŁYWANIA - DANE

## Bliski Detektor



Kilka przypadków rejestrowanych w czasie jednego pulsu wiązki. Odróżniane dzięki informacji czasowej i przestrzennej

## Daleki Detektor

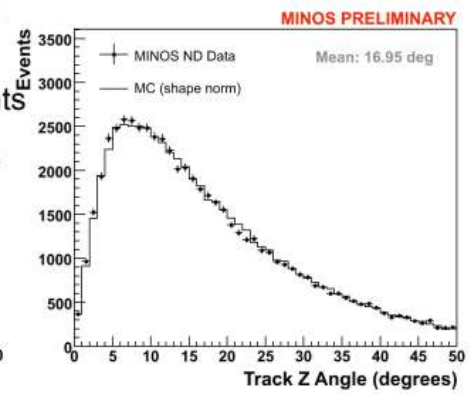
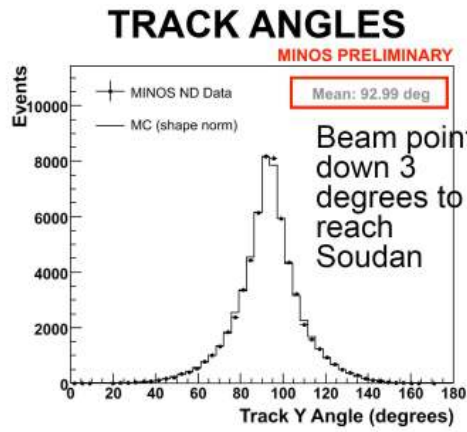
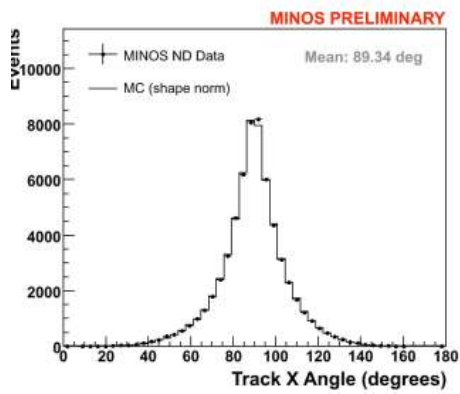
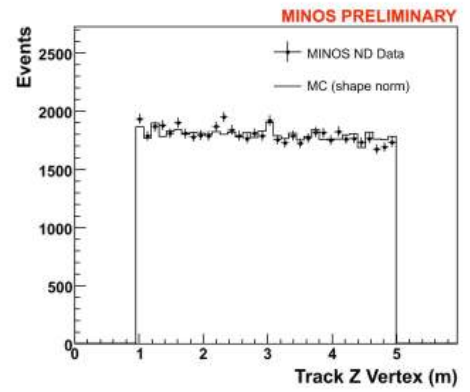
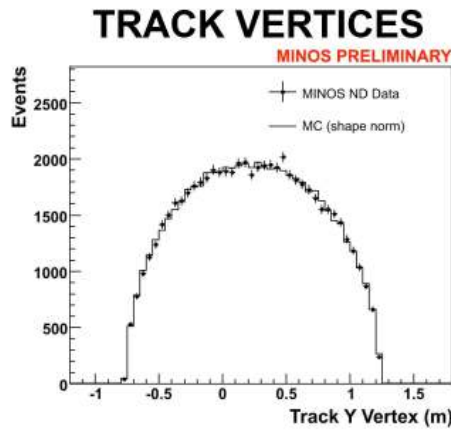
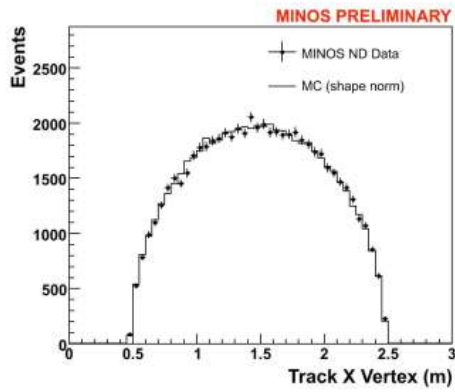


Częstość oddziaływań w FD znacznie niższa ( $\sim 10^{-6} \times$  częstość w ND)

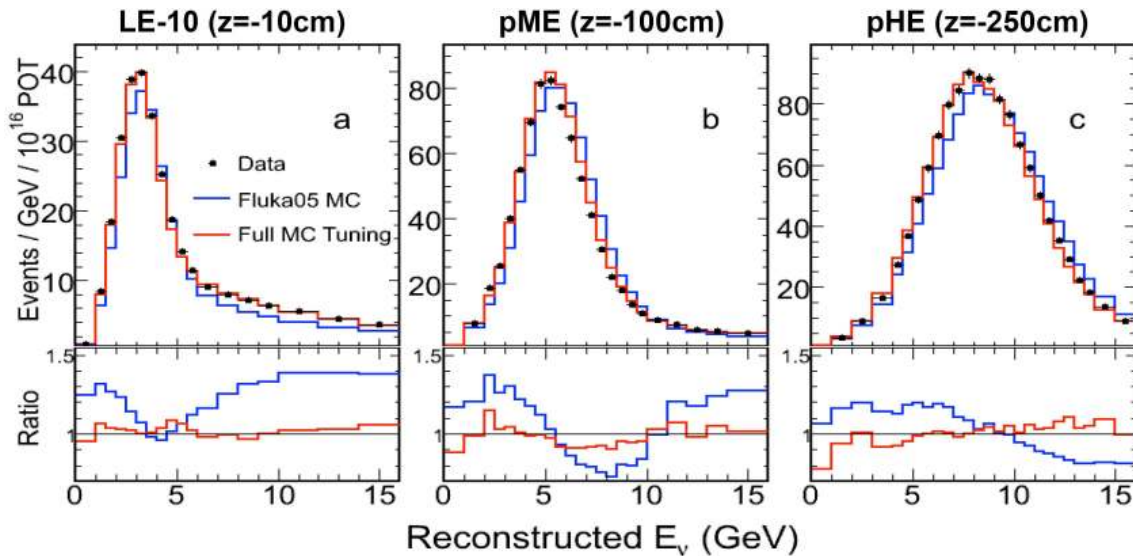
# BLIND ANALYSIS

- Zabezpieczenie się przed nieumyślnym naginaniem wyników do oczekiwanego
- 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
- Po otwarciu *puszki* dla pierwszej analizy, część danych z FD na nowo ukryta przy użyciu nowej funkcji

# BLISKI DETEKTOR: PORÓWNANIE DANE/MC



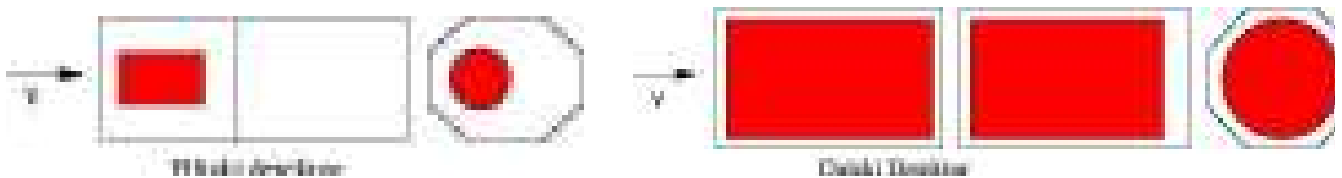
# WIDMA ENERGII W BLISKIM DETEKTORZE



- Dane były zbierane przy 7 różnych konfiguracjach wiązki (różne pozycje tarczy i różne prądy w rogach magnetycznych)
- Różnica pomiędzy MC a danymi zmienia się dla różnych konfiguracji wiązki ⇒ to sugeruje że źródłem rozbieżności są niedoskonałości w modelowaniu wiązki, a nie nieznanymi przekrojów czynnych

# SELEKCJA PRZYPADKÓW CC $\nu_\mu$

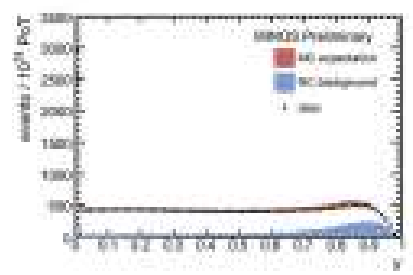
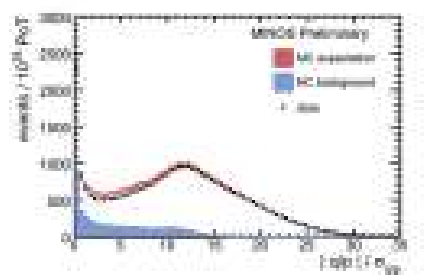
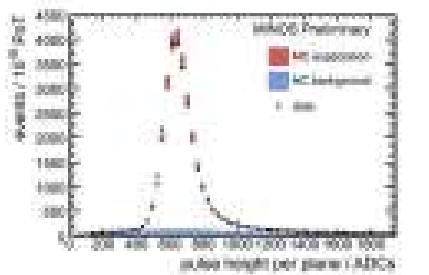
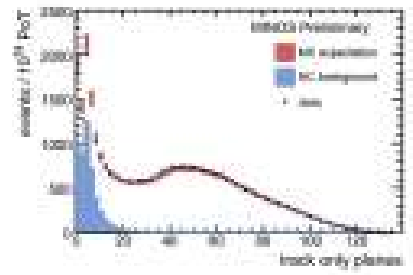
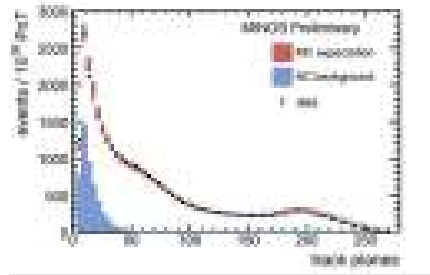
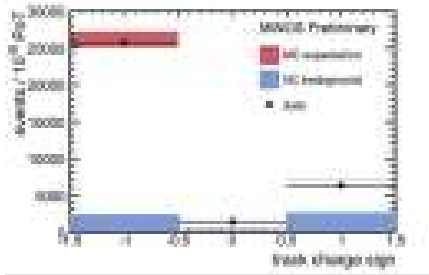
- 1 Co najmniej jeden dobrze zrekonstruowany tor (kandydat na mion)
- 2 Wierzchołek oddziaływania w wiarygodnym obszarze detektora (fiducial volume):
  - ND:  $1\text{m} < z < 5\text{m}$  ,  $R < 1\text{m}$  od środka wiązki
  - FD:  $z > 20\text{cm}$  od pierwszej płaszczyzny,  $z > 2\text{m}$  od ostatniej płaszczyzny ,  $R < 3.7\text{m}$  od środka detektora



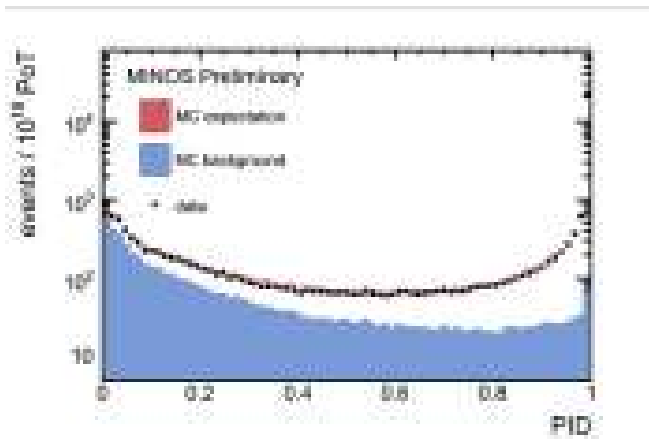
- 3 Miony z ujemnym ładunkiem (wybór  $\nu_\mu$ )
- 4 Cięcie na parametrze PID (Particle IDentification), używanym do selekcji oddziaływań NC i CC

# Bliski Detektor: porównanie danych i MC

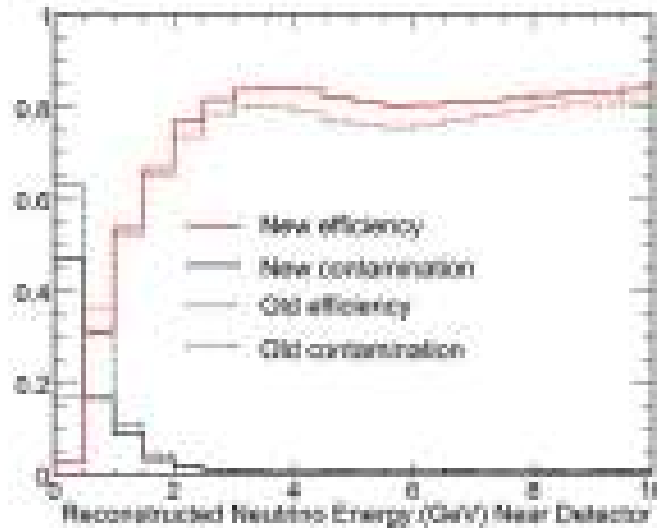
Wielkości które różnicują oddziaływania CC  $\nu_\mu$  i NC



# ODRÓŻNIANIE ODDZIAŁYWAŃ CC $\nu_\mu$ i NC



Cięcie na CC  $\nu_\mu$  : PID > 0.85



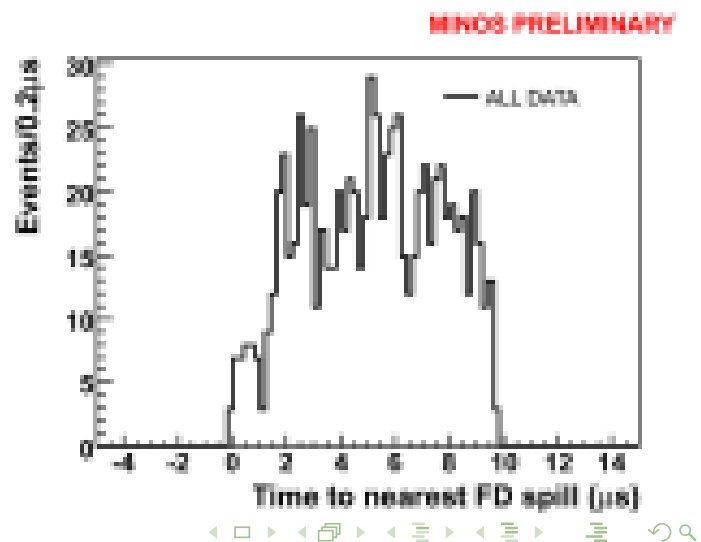
Efektywności i czystości dla ND

# SELEKCJA ODDZIAŁYWAŃ Z WIĄZKI W FD

Oddziaływania w Dalekim Detektorze są selekcjonowane na podstawie czasu ich rejestracji i topologii :

- Czas rejestracji oddziaływań musi być w koincydencji z czasem wiązki NuMI (w  $50 \mu s$  oknie)
- Kierunek neutrin musi być zgodny z osią wiązki (kąt toru względem osi wiązki  $< 50^\circ$ )

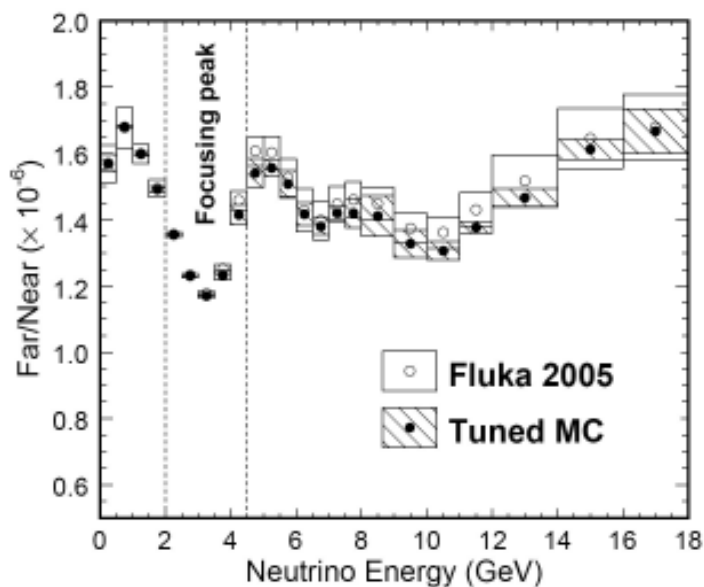
Oczekiwane tło z mionów z promieniowania kosmicznego:  
 $< 0.5$  przypadków





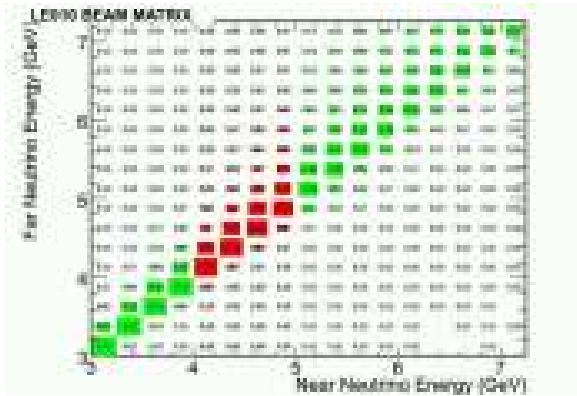
## EKSTRAPOLACJA ND $\rightarrow$ FD

- Dane z Bliskiego Detektora są używane do przewidywania rozkładów energii w Dalekim Detektorze
- Niepewności związane z modelowaniem wiązki i przekrojami czynnymi, wspólne dla ND i FD, istotnie się skracają

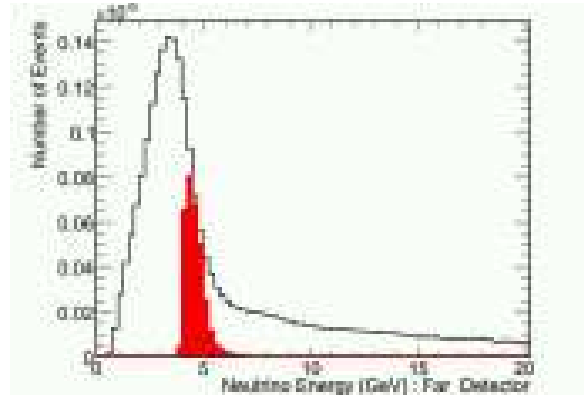


- ND widzi wiązkę  $\nu$  jako źródło rozciągnięte,  
FD - jako punktowe
- ← Funkcja przejścia wiąże ze sobą prawdziwą energię  $\nu$  w ND z prawdziwą energią w FD

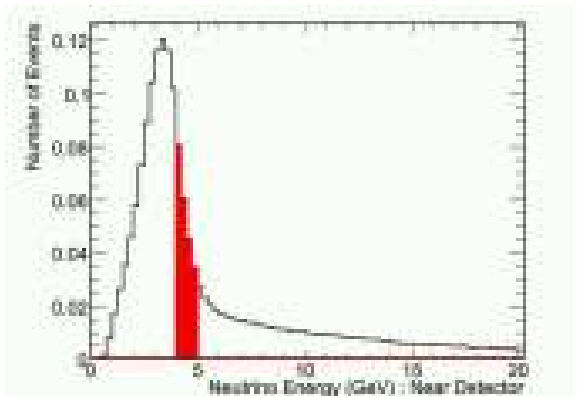
# Metoda BEAM MATRIX



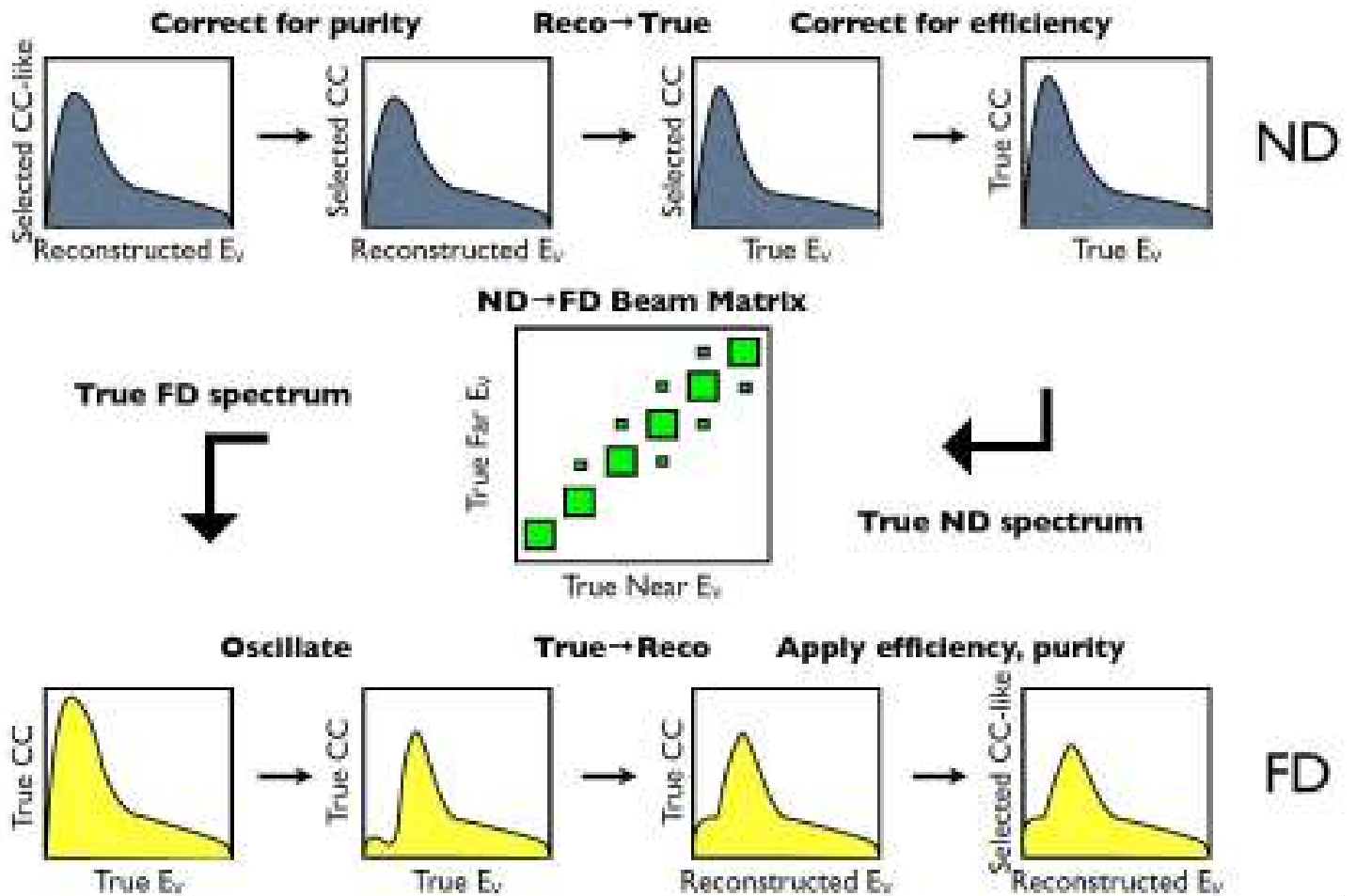
→



↑



# Kolejne kroki w metodzie **BEAM MATRIX**



## Błędy systematyczne na $\Delta m_{23}^2$ and $\sin^2 2\theta_{23}$

- Duże niepewności związane z modelowaniem wiązki i z przekrojami czynnymi, dzięki ekstrapolacji w większości się kasują
- Z pozostałych błędów systematycznych największe są te związane z domieszką przypadków NC i względną normalizacją (niedokładna znajomość wiarygodnego obszaru detektorów (*fiducial mass*), różnice we względnej efektywności rekonstrukcji w ND i FD)

<b>Błąd systematyczny</b>	<b>Shift in <math>\Delta m_{23}^2</math></b>	<b>Shift in <math>\sin^2 2\theta_{23}</math></b>
Normalizacja ND/FD $\pm 4\%$	0.065	$< 0.005$
Absolutna, hadronowa skala energii $\pm 10\%$	0.075	$< 0.005$
Tło od NC $\pm 50\%$	0.010	0.008
Inne systematyczne niepewności	0.007	$< 0.005$
<b>Całkowity błąd systematyczny</b>	<b>0.10</b>	<b>0.008</b>



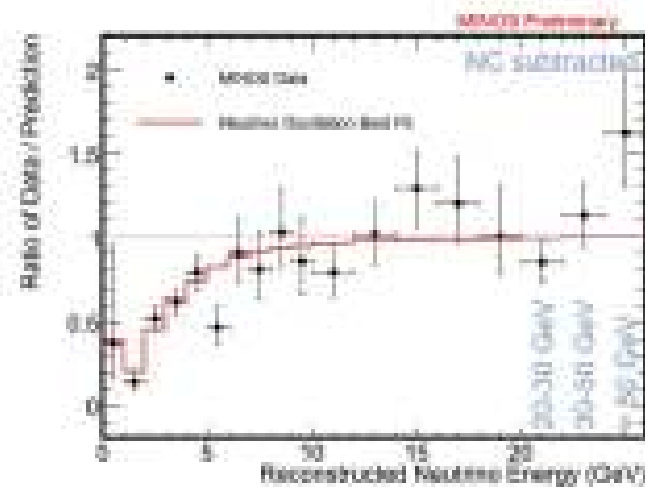
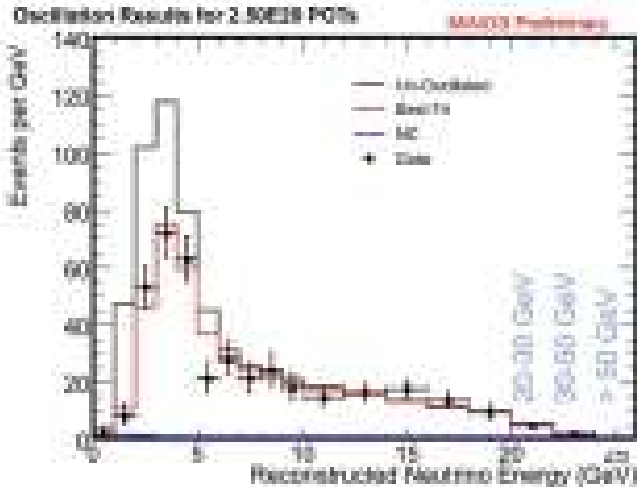
## Wpływ kolejnych cięć na danych z FD

Cięcie	Liczba przypadków
Tor w <i>fiducial volume</i>	847
Dobra jakość danych	830
Czas zgodny z czasem wiązki	828
Dobra jakość wiązki	812
Tor dobrej jakości	811
Ładunek toru $\leq 0$	672
Parametr PID $> 0.85$	564
Zrekonstruowana $E_\nu < 200 \text{ GeV}$	<b>563</b>

## Zaobserwowana vs oczekiwana liczba zdarzeń

Próbka danych	FD Dane	Przewidywanie (bez osc.)	Dane/Przewidywanie (Beam Matrix)
$\nu_\mu CC_{like}$	563	$738 \pm 30$	0.76 (4.4 $\sigma$ )
$\nu_\mu CC_{like} (< 10 \text{ GeV})$	310	$496 \pm 20$	0.62 (6.2 $\sigma$ )
$\nu_\mu CC_{like} (< 5 \text{ GeV})$	198	$350 \pm 14$	0.57 (6.5 $\sigma$ )

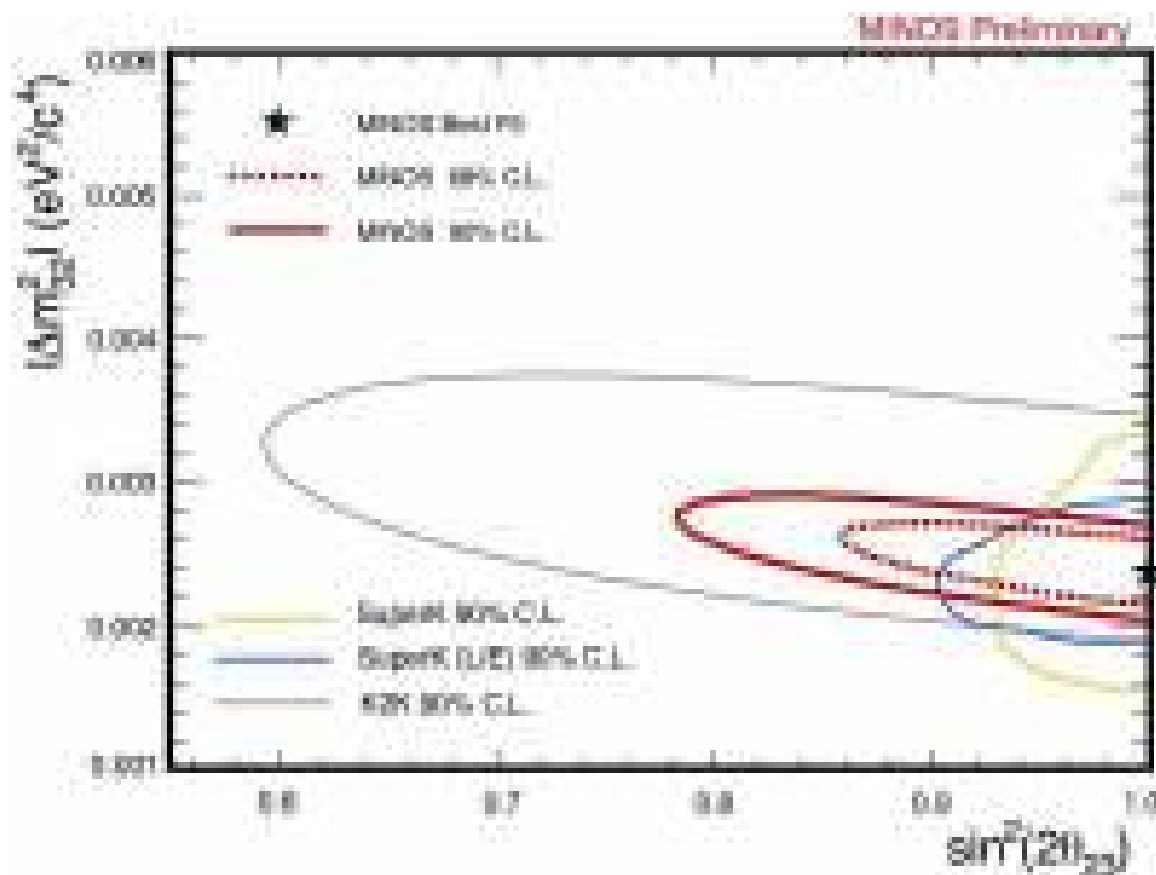
# Widmo energii w FD i krzywa oscylacyjna



## Parametry oscylacji z najlepszego dopasowania:

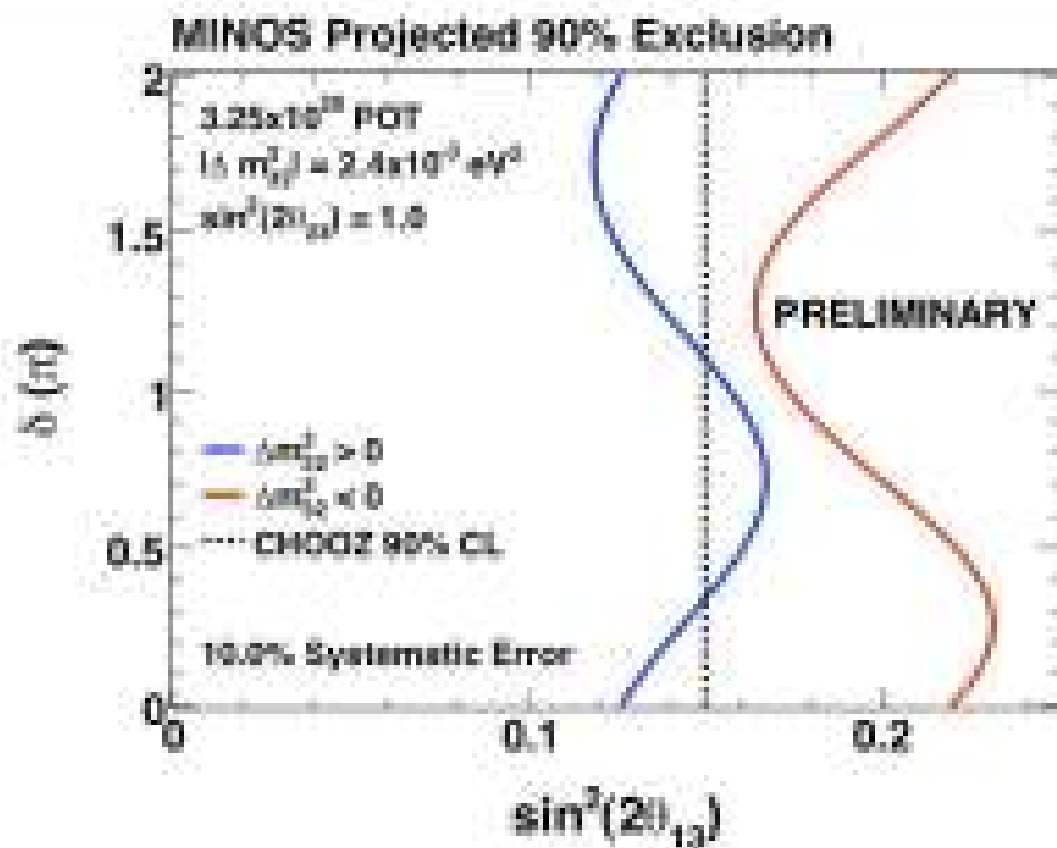
- $\Delta m_{23}^2 = 2.38^{+0.20}_{-0.16} \times 10^{-3} eV^2$
- $\sin^2 2\theta_{23} = 1.00_{-0.08}$

# Dozwolony obszar

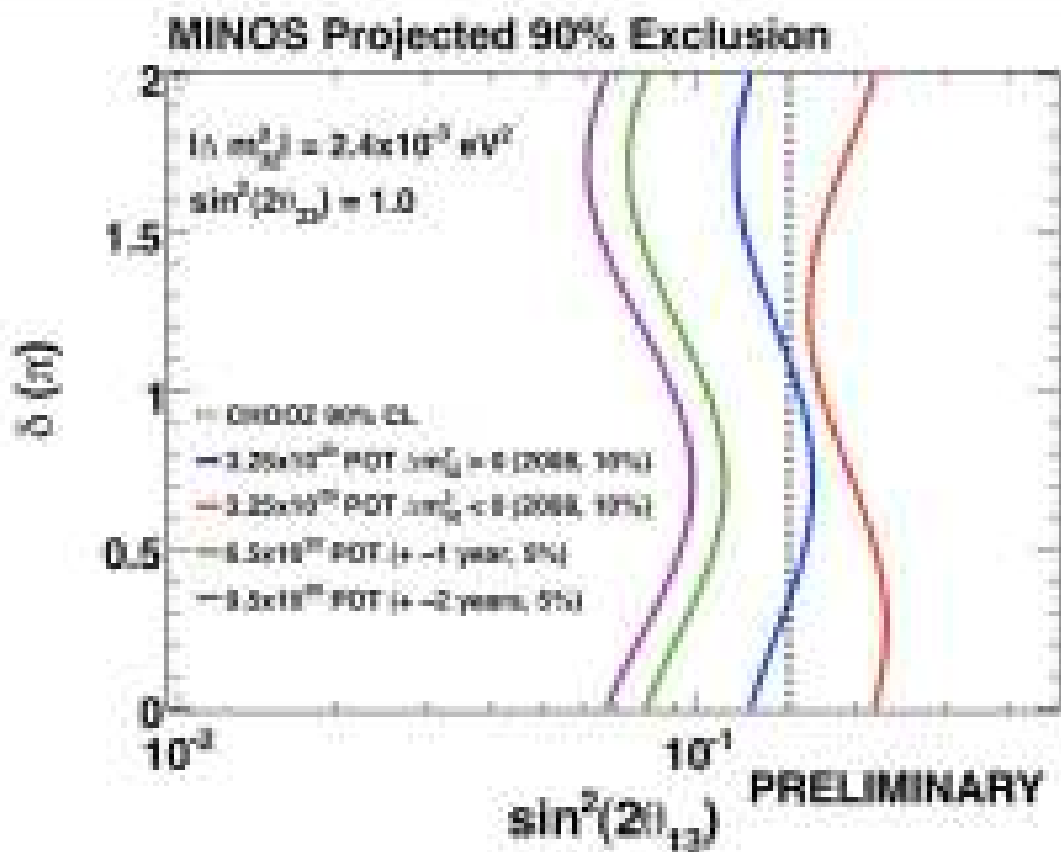




# Przewidywania dla $\theta_{13}$



# Przewidywania dla $\theta_{13}$



# Podsumowanie

- Eksperyment MINOS to jeden z nielicznych obecnie eksperymentów neutrinowych dostarczających nowych, ciekawych danych
- Ciekawa fizyka, nie tylko związana z badaniem akceleratorowych neutrin i nie tylko dotycząca oscylacji neutrin