

# Eksperyment MINOS

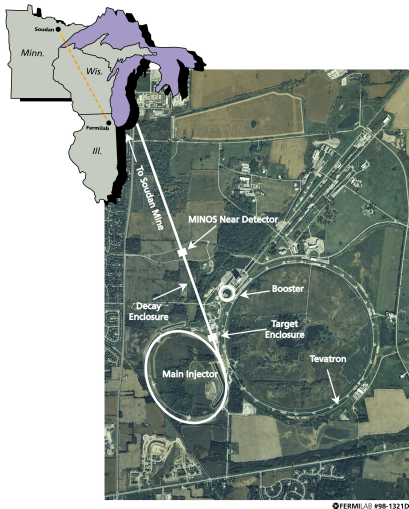
Nowe dane dotyczące oscylacji neutrin i nie tylko

Katarzyna Grzelak

Seminarium Neutrina w laboratorium i w kosmosie  
14.12.2007

- 1 Wprowadzenie
- 2 Oscylacje neutrin akceleratorowych w MINOS'ie
- 3 Wysokoenergetyczne miony z promieniowania kosmicznego
- 4 Neutrina z wiązki NuMI w MiniBooNE

# Eksperyment MINOS



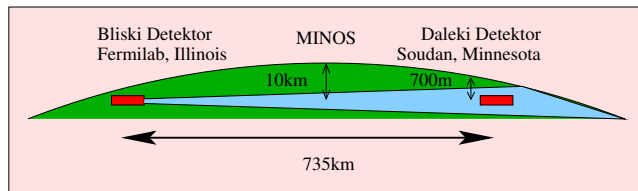
- Drugi w historii i jedyny obecnie zbierający dane eksperyment z długą bazą
- Bliski Detektor (ND) (1kt) w ośrodku Fermilab pod Chicago, 100m pod powierzchnią ziemi
- Daleki Detektor (FD) (5.4 kt) znajduje się 735km dalej w kopalni Soudan, w Minnesocie, 710m pod powierzchnią ziemi (2070 m.w.e.)
- Czas przelotu neutrina  $\sim 2.5ms$

# 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
- Oscylacje neutrin atmosferycznych
- Badanie mionów z promieniowania kosmicznego

# Co bada eksperyment MINOS ?

## Neutrina akceleratorowe

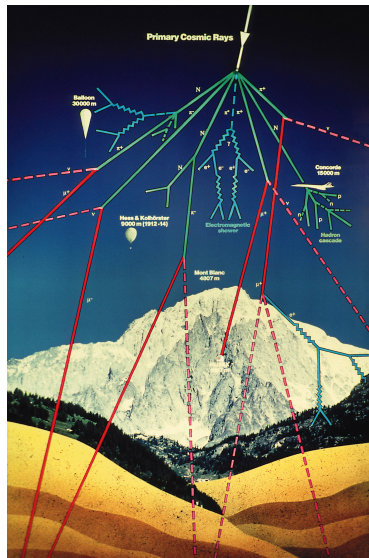


- Pierwsze oddziaływanie w dalekim detektorze 7 marca 2005
- Pierwsze opublikowane wyniki (zanikanie  $\nu_\mu$ : w oparciu o  $1.27 \times 10^{20}$  pot (Run I) (215 oddziaływań  $\nu_\mu$ ))
- Przeanalizowano  $2.5 \times 10^{20}$  pot (563 oddziaływań  $\nu_\mu$ )
- Do chwili obecnej zebrano około  $3.25 \times 10^{20}$  pot (Run II)
- Prace nad analizą  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ , NC

# Co bada eksperyment 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



# Co bada eksperyment MINOS ?

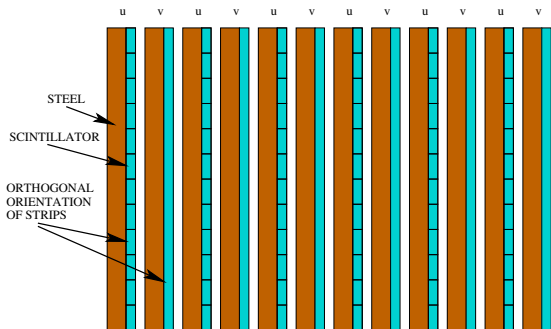
## Miony z promieniowania kosmicznego

- 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  $\sim 10 \text{ Hz}$

# MINOS: BLISKI I DALEKI DETEKTOR

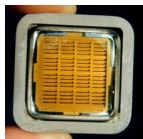
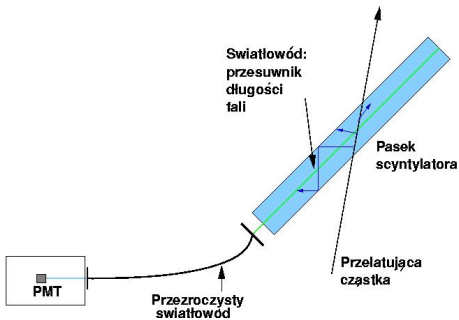
Bliski i Daleki Detektor eksperymentu MINOS mają tak bardzo jak to możliwe podobną budowę:

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

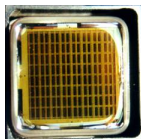




# MINOS: BLISKI I DALEKI DETEKTOR



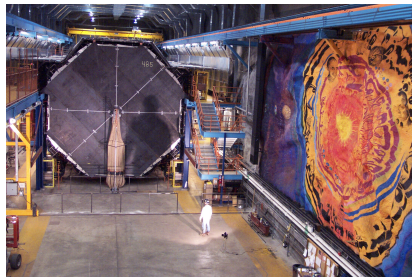
PMT M16 (FD)



PMT M64 (ND)



# MINOS: BLISKI I DALEKI DETEKTOR



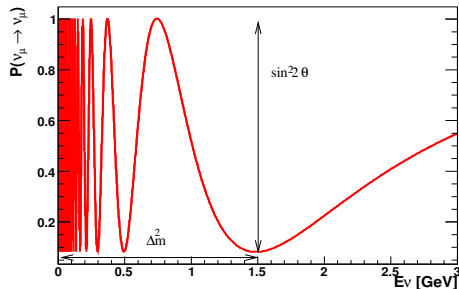
- Bliski Detektor: 1kt, 282 płaszczyzny,  $3.8\text{m} \times 4.8\text{m} \times 15\text{m}$   
100m pod powierzchnią ziemi
- Daleki Detektor: 5.4kt, 484 płaszczyzny,  $8\text{m} \times 8\text{m} \times 30\text{m}$   
710m pod powierzchnią ziemi
- $B \sim 1.3\text{ T}$  w obu detektorach

# OSCYLACJE NEUTRIN AKCELERATOROWYCH w MINOS'ie

# 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:

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

$$E_\nu [GeV]$$

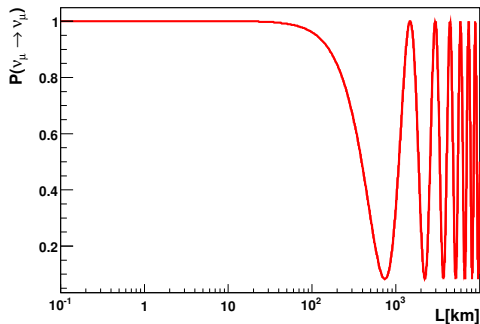
$$L [km]$$

Maksimum oscylacji dla

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

# POŁOŻENIE DETEKTORÓW

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



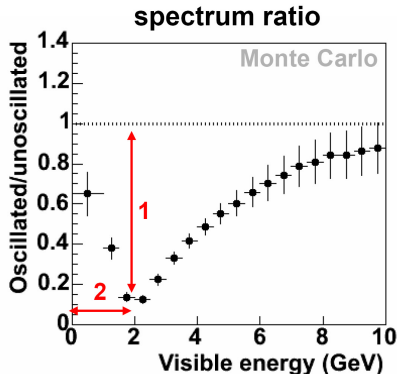
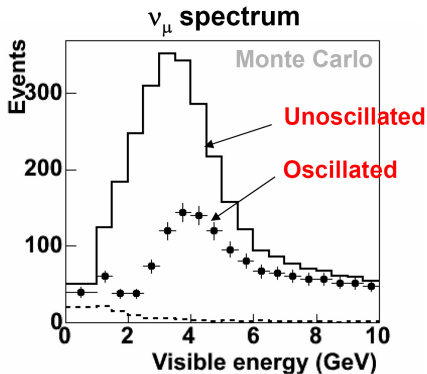
↑  
Bliski detektor

↑ Daleki detektor

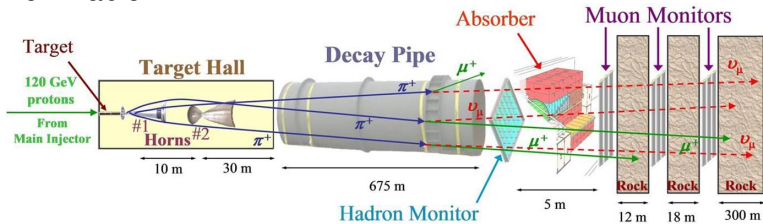
# PRZYKŁAD ANALIZY ZNIKANIA $\nu_\mu$

Symulacja Monte Carlo

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

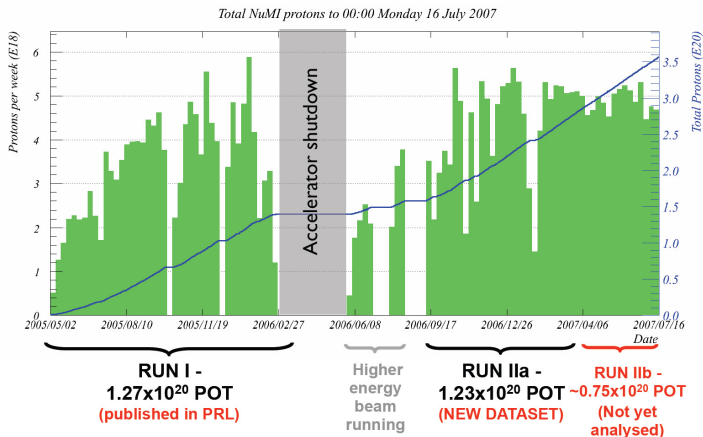


- Protony o energii 120 GeV z akceleratora Main Injector w Fermilabie



# WIĄZKA PIERWOTNA - PROTONY

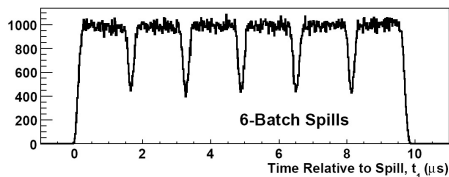
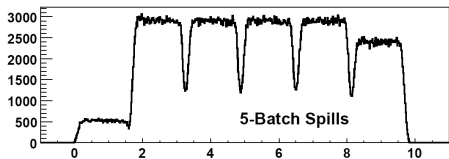
## LICZBA DOSTARCZONYCH PROTONÓW



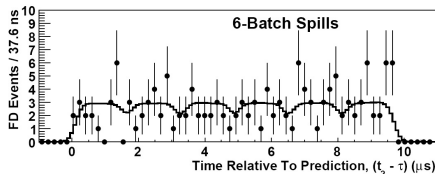
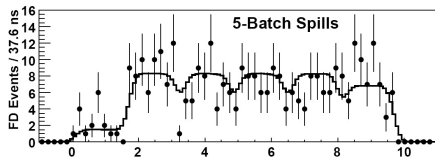


# STRUKTURA WIĄZKI PIERWOTNEJ WIDZIANA W ND i FD

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



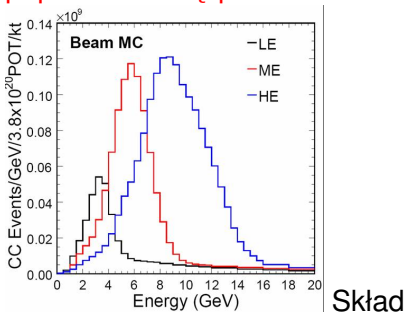
**Bliski Detektor**



**Daleki Detektor**

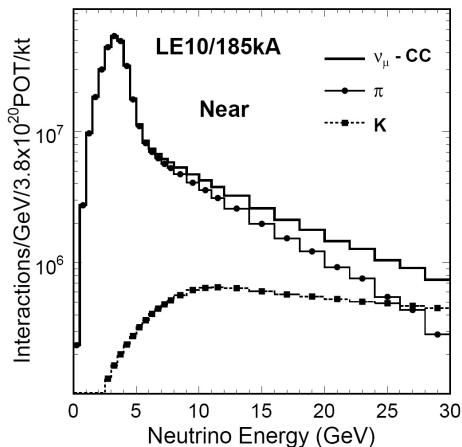
# WIĄZKA WTÓRNA - NEUTRINA

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

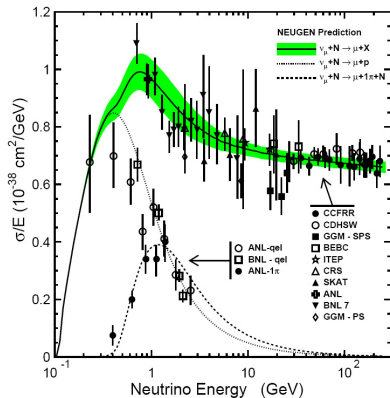


wiązki neutrin (LE-10): 98.5 %  
( $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$ ) (6.5 %  $\bar{\nu}_\mu$ ), 1.5 % ( $\nu_e + \bar{\nu}_e$ )

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



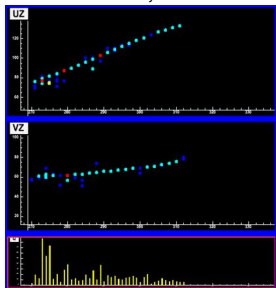
# TYPY ODDZIAŁYWAŃ NEUTRIN w MINOS'ie



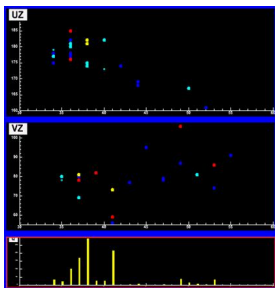
- $\nu_\mu N \rightarrow \mu X$
- Sygnaturą oddziaływania CC  $\nu_\mu$  jest obecność długiego toru mionu
- $E_\nu = E_{shower} + E_\mu$
- Rozdzielczość energetyczna  $55\% \sqrt{E}$
- Dokładność pomiaru pędu mionu (6% z zasięgu, 11% z krzywizny)

# TOPOLOGIE PRZYPADKÓW Z WIĄZKI NuMI

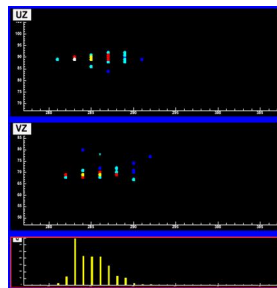
## Monte Carlo, Daleki Detektor



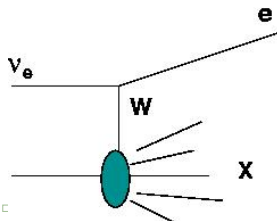
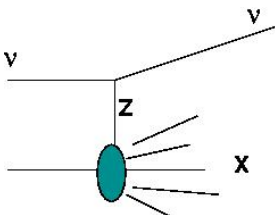
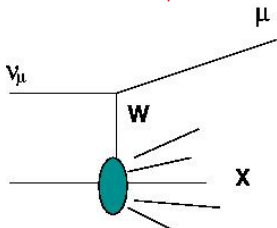
CC  $\nu_\mu$



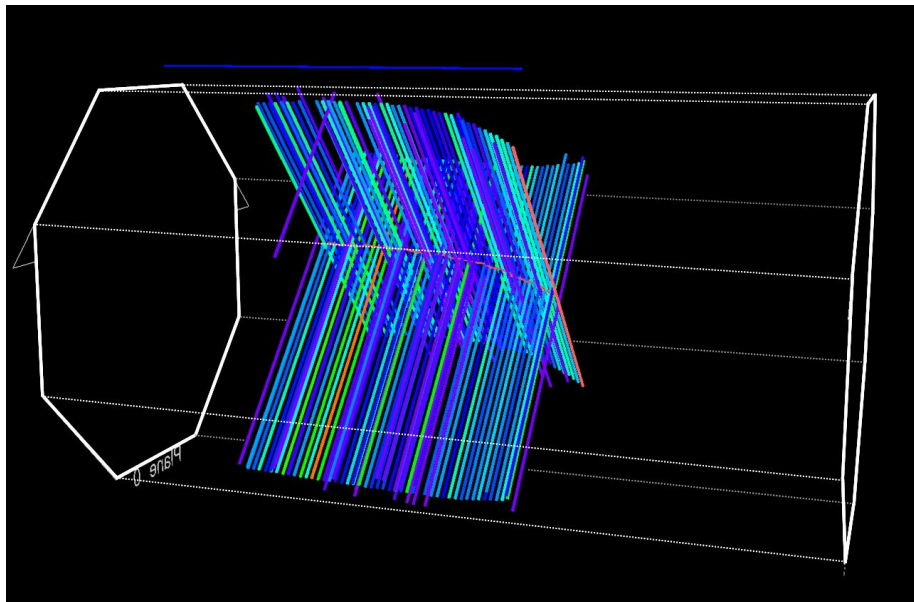
NC



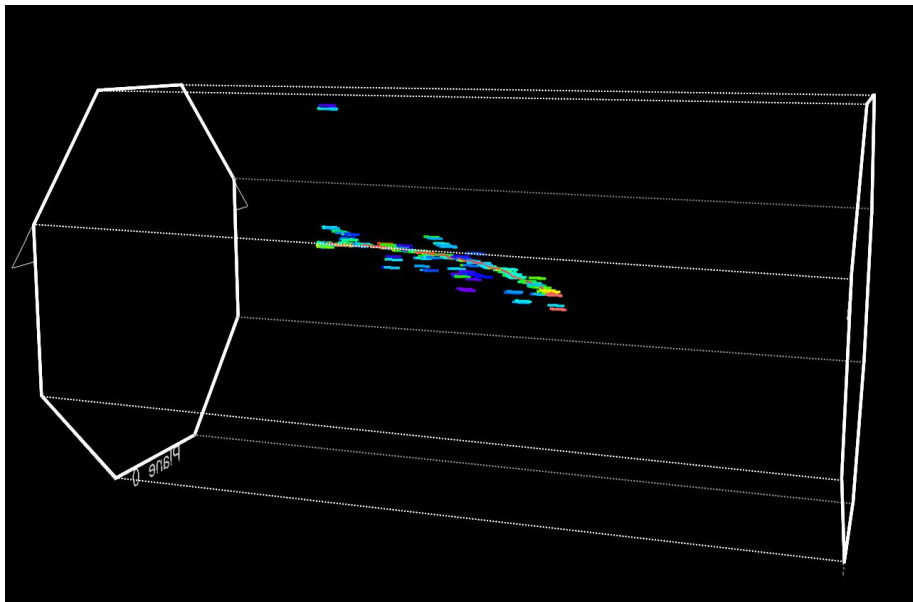
CC  $\nu_e$



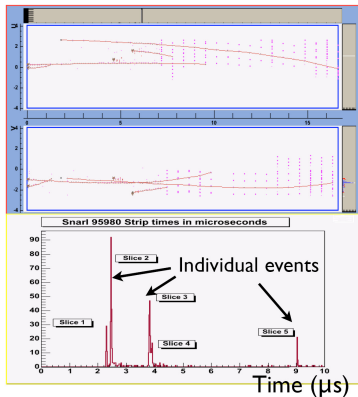
# REKONSTRUKCJA w MINOS'ie



# REKONSTRUKCJA w MINOS'ie

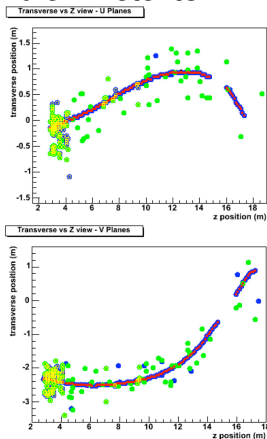


## Bliski Detektor



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

## Daleki Detektor

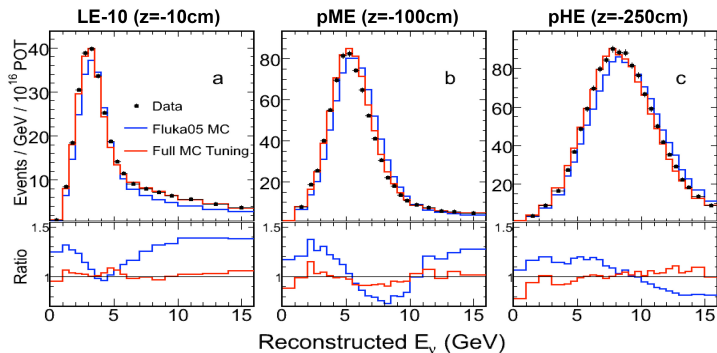


Częstość oddziaływań w FD znacznie niższa ( $\sim 10^{-6} \times$  częstość w ND)

- 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



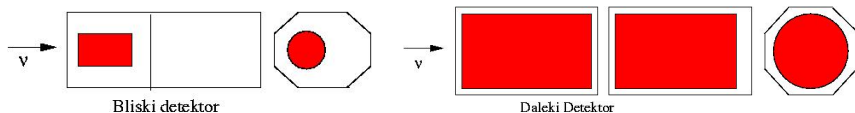
# WIDMA ENERGII W BLISKIM DETEKTORZE



- 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  $\Rightarrow$  to sugeruje że źródłem rozbieżności są niedoskonałości w modelowaniu wiązki, a nie nieznanymi przekrojów czynnych

# SELEKCJA PRZYPADKÓW CC $\nu_\mu$

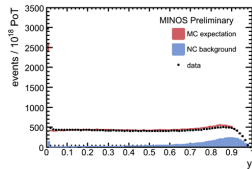
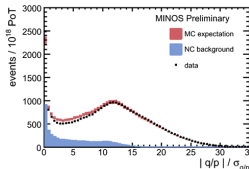
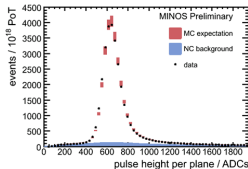
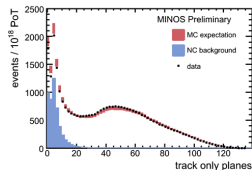
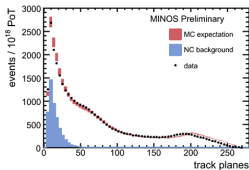
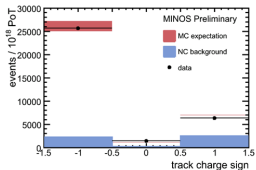
- 1 Co najmniej jeden dobrze zrekonstruowany tor (kandydat na mion)
- 2 Wierzchołek oddziaływania w wiarygodnym obszarze detektora (fiducial volume):
  - ND:  $1\text{m} < z < 5\text{m}$  ,  $R < 1\text{m}$  od środka wiązki
  - FD:  $z > 20\text{cm}$  od pierwszej płaszczyzny,  $z > 2\text{m}$  od ostatniej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



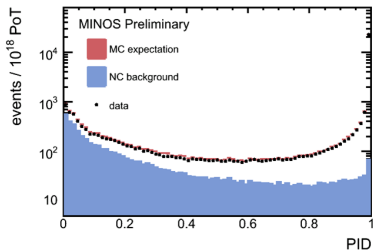
- 3 Miony z ujemnym ładunkiem (wybór  $\nu_\mu$ )
- 4 Cięcie na parametrze PID (Particle IDentification), używanym do selekcji oddziaływań NC i CC

# Bliski Detektor: porównanie danych i MC

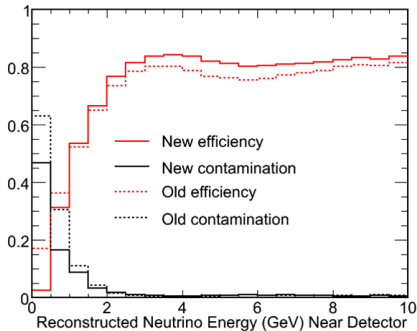
## Wielkości które różnicują oddziaływania CC $\nu_\mu$ i NC



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



Cięcie na CC  $\nu_\mu$  : PID > 0.85



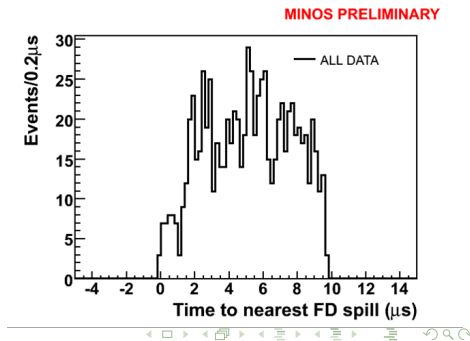
Efektywności i czystości dla ND

# SELEKCJA ODDZIAŁYWAŃ Z WIĄZKI W FD

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

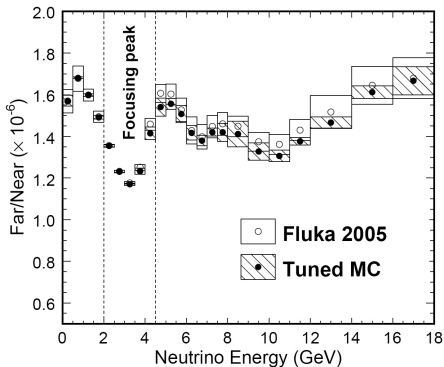
- Czas rejestracji oddziaływań musi być w koincydencji z czasem wiązki NuMI (w  $50 \mu s$  oknie)
- Kierunek neutrin musi być zgodny z osią wiązki (kąt toru względem osi wiązki  $< 50^\circ$ )

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



# EKSTRAPOLACJA ND $\rightarrow$ FD

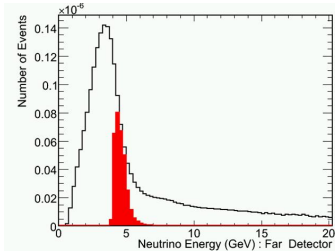
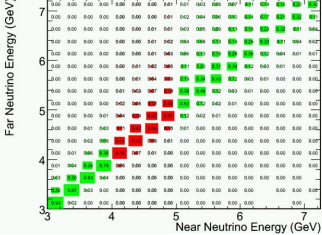
- Dane z Bliskiego Detektora są używane do przewidywania rozkładów energii w Dalekim Detektorze
- Niepewności związane z modelowaniem wiązki i przekrojami czynnymi, wspólne dla ND i FD, istotnie się skracają



- 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

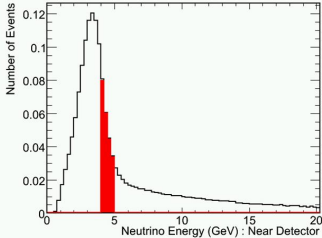
# Metoda BEAM MATRIX

LE010 BEAM MATRIX

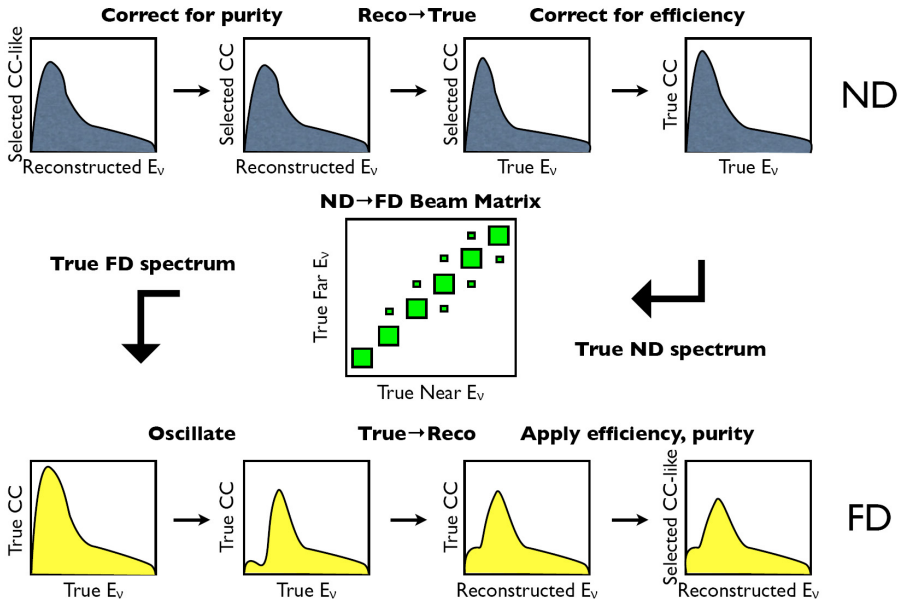


→

↑



# 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>

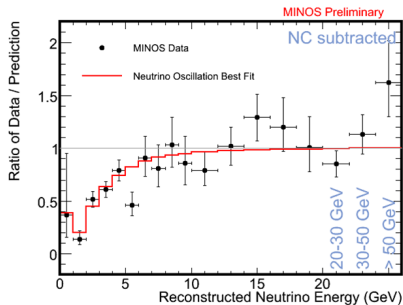
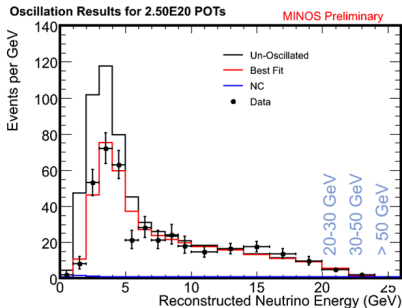
# Wpływ kolejnych cięć na danych z FD

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 $E_\nu < 200 \text{ GeV}$	563

# Zaobserwowana vs oczekiwana liczba zdarzeń

<b>Próbka danych</b>	<b>FD Dane</b>	<b>Przewidywanie (bez osc.)</b>	<b>Dane/Przewidywanie (Beam Matrix)</b>
$\nu_\mu CC_{like}$	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

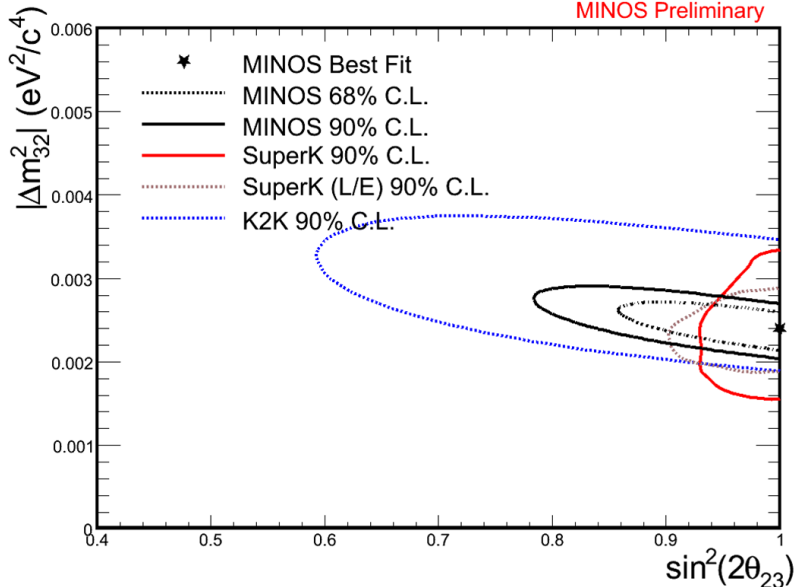


## Parametry oscylacji z najlepszego dopasowania:

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

# Dozwolony obszar

MINOS Preliminary



# Neutrino z akceleratora: plany na przyszłość

- Dalsza poprawa dokładności pomiaru  $\Delta m_{23}^2$  and  $\sin^2 2\theta_{23}$
- Potencjał do zaobserwowania przejścia  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  albo poprawa limitu na  $\theta_{13}$  o czynnik 2-3
- Pomiary NC ( $\nu_\mu \rightarrow \nu_s$ , pojawianie się  $\tau$ ) będą możliwe dla większej liczby danych

# WYSOKOENERGETYCZNE MIONY Z PROMIENIOWANIA KOSMICZNEGO

$$R = \mu^+ / \mu^-$$

- Pierwotne promieniowanie kosmiczne: w większości dodatnio naładowane
- Pierwotne promieniowanie kosmiczne ma dodatni ładunek  $\Rightarrow$  produkowanych jest więcej kaonów i pionów dodatnio naładowanych niż ujemnie  $\Rightarrow$  jest więcej  $\mu^+$  niż  $\mu^-$
- Celem analizy jest zmierzenie stosunku  $R = N_{\mu^+} / N_{\mu^-}$  dla wysokoenergetycznych mionów
- Pomiar istotny dla modelowania oddziaływań promieni kosmicznych w atmosferze, a także dla obliczeń strumienia neutrin atmosferycznych i testowania oczekiwanego stosunku  $\bar{\nu} / \nu$



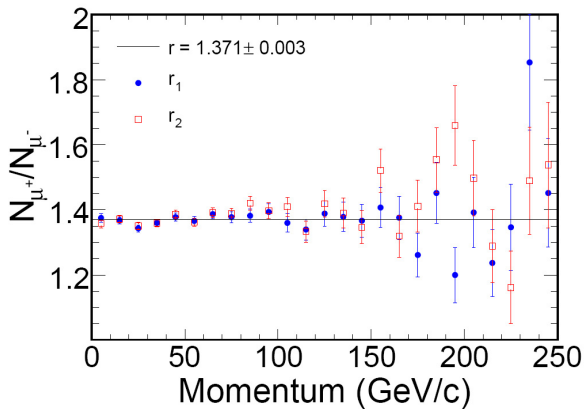
# Podsumowanie selekcji

	DF <sup>a</sup>	DR <sup>b</sup>
# events before cuts	$N=29.0 \times 10^6$	$N=8.9 \times 10^6$
cut	Fraction Remaining	
No Cuts	1.0	1.0
Pre-Analysis Cuts:		
1. no reconstruction	0.790	0.832
2. multiples	0.733	0.776
3. coil status	0.730	0.772
Analysis Cuts:		
1. 20 plane cut	0.554	0.585
2. 2m track length cut	0.551	0.582
3. fiducial cut	0.534	0.565
4. fit quality cut: $\chi^2_{fitter}/ndf < 1.5$	0.427	0.452
Charge-sign quality cuts		
1. $(q/p)/\sigma_{q/p} \geq 2.2$	0.141	0.147
2a. MIC cut	0.048	0.050
2b. BdL cut	0.033	0.031

<sup>a</sup> DF = cosmic data set, forward field

<sup>b</sup> DR = cosmic data set, reverse field

# $R = N_{\mu}^{+} / N_{\mu}^{-}$ pod powierzchnią Ziemi



Wyniki dla dwóch kierunków pola magnetycznego



## Vertical Muon Intensity



Multiplicity Correction

Number of muons observed  
in solid angle bin

$$(I_{\mu})_j = \frac{1}{T} \frac{m N_j}{(\epsilon_j A_j \Delta\Omega / \cos \theta_j)}$$

Correction to vertical for  
solid angle bin

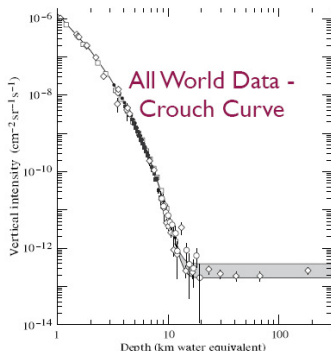
Live Time

Efficiency

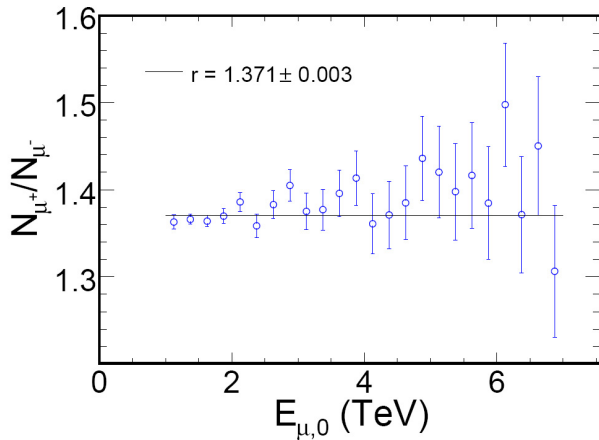
Solid Angle

Projected Area

- Sort single muons into solid angle bins
- Compute intensity for each bin
- Match value to Crouch curve to get slant depth
- Slant depth is column of rock between detector and surface



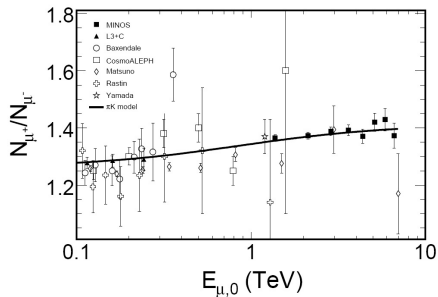
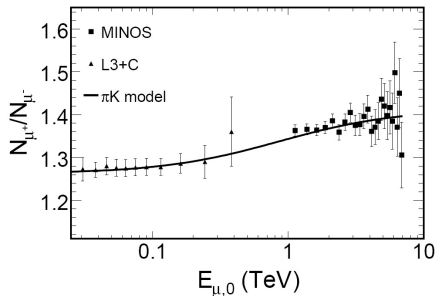
# $R = N_{\mu}^{+} / N_{\mu}^{-}$ na powierzchni Ziemi



# Wzrost R w funkcji energii

- **MINOS**:  $R = 1.371 \pm 0.003(\text{stat}) + 0.012 - 0.010(\text{sys})$   
(energie 1 - 7 TeV)
- **L3+C**:  $R = 1.285 \pm 0.003(\text{stat}) \pm 0.019(\text{sys})$   
(energie < 300 GeV)
- Stosunek liczby mionów dodatnich do ujemnych powinien rosnać w miarę jak rośnie liczba kaonów (stosunek  $K^+/K^-$  jest większy niż  $\pi^+/\pi^-$ )

# Porównanie z innymi danymi



## Wzrost $R$ w funkcji energii: Podsumowanie 2

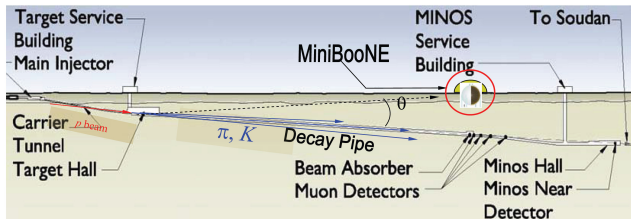
- MINOS obserwuje wzrost stosunku  $R = N_{\mu^+}/N_{\mu^-}$  dla mionów z promieniowania kosmicznego, dla energii na powierzchni Ziemi 1-7 TeV energii

# NEUTRINA z WIĄZKI NuMI w MiniBooNE

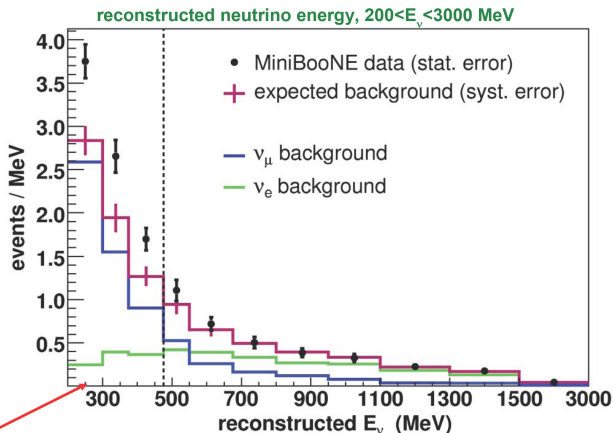


# Eksperyment MiniBooNE

- Eksperyment MiniBooNE znajduje się w Fermilabie, niedaleko Bliskiego Detektora MINOS'a
- Korzysta z innej wiązki neutrin niż MINOS (Booster Neutrino Beam), ale ... rejestruje neutrina z wiązki NuMI !
- **Pierwszy eksperyment off-axis** → ustawiony poza osią wiązki, pod kątem  $110 \text{ mrad}$  ( $6.3^\circ$ )

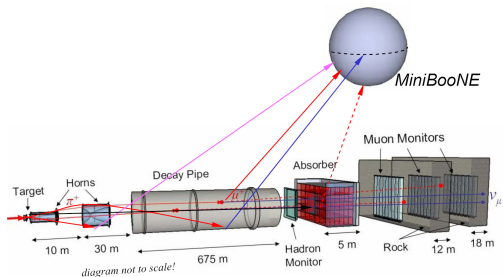


- MiniBooNE zbudowany w celu sprawdzenia wyniku LSND (oscylacje  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  dla  $\Delta m^2 > 2 \times 10^{-2} \text{eV}^2$ )
- Pierwsze wyniki (04.2007) wykluczają oscylacje typu LSND, ale niewyjaśniona nadwyżka przypadków dla niskich energii

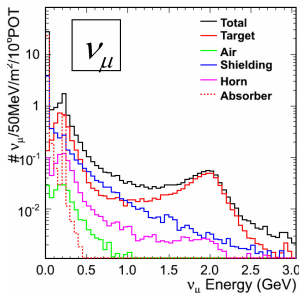
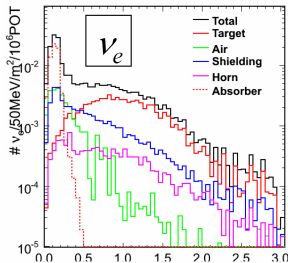


- Obserwacja i analiza wiązki *off-axis*
- Pomiar składowych wiązki pochodzących od rozpadów  $\pi$  i  $K$
- Źródło wzbogacone w  $\nu_e$  do badania rekonstrukcji i algorytmów do identyfikacji oddziaływań w MiniBooNE
- **Analiza komplementarna do oscylacyjnej analizy w MiniBooNE**

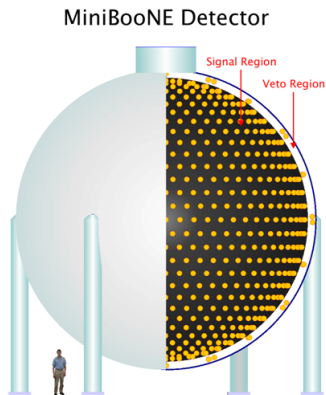
# Neutrina z NuMI w MiniBooNE



Skład wiązki NuMI w detektorze MiniBooNE: 81%  $\nu_\mu$ , 5%  $\nu_e$ , 13%  $\bar{\nu}_\mu$ , 1%  $\bar{\nu}_e$ ,



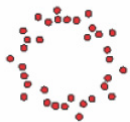
# Detektor MiniBooNE



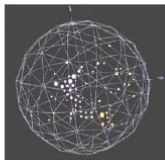
- Detektor schowany w 3 metrowym nasypie ziemnym
- Sfera o średnicy 12m
- Wypełniony 800 t czystego oleju mineralnego ( $\text{CH}_2$ ) (*Fiducial volume*: 450 t)
- Sfera jest podzielona na dwa, koncentryczne, optycznie rozdzielone obszary (**main** i **veto**)
- główny obszar jest wyposażony w 1280 fotopowielaczy, obszar veto w 240 fotopowielaczy

# Identyfikacja cząstek

Oddziaływania neutrin  
rozdzielane dzięki  
promieniowaniu  
Czerenkowa



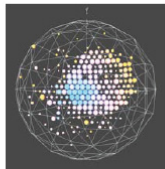
$e^-$



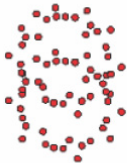
$e^-$   
candidate



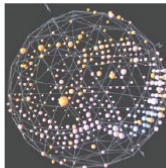
$\mu$



$\mu$   
candidate



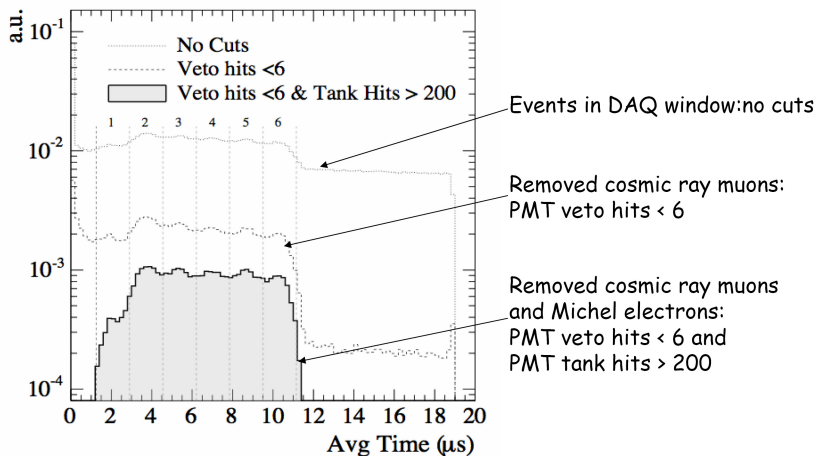
$\pi^0$



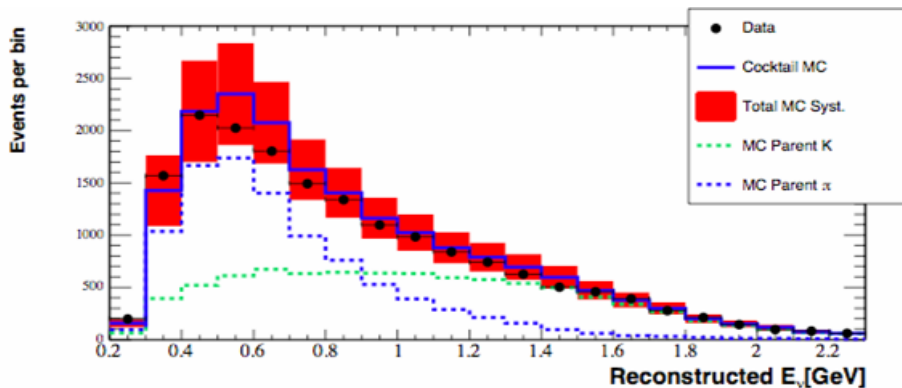
$\pi^0$   
candidate

# Selekcja oddziaływań z wiązki NuMI

- Czas rejestracji oddziaływań musi być w koincydencji z czasem wiązki NuMI (w  $20 \mu\text{s}$  oknie)



# ODDZIAŁYWANIA $\nu_\mu$ CCQE

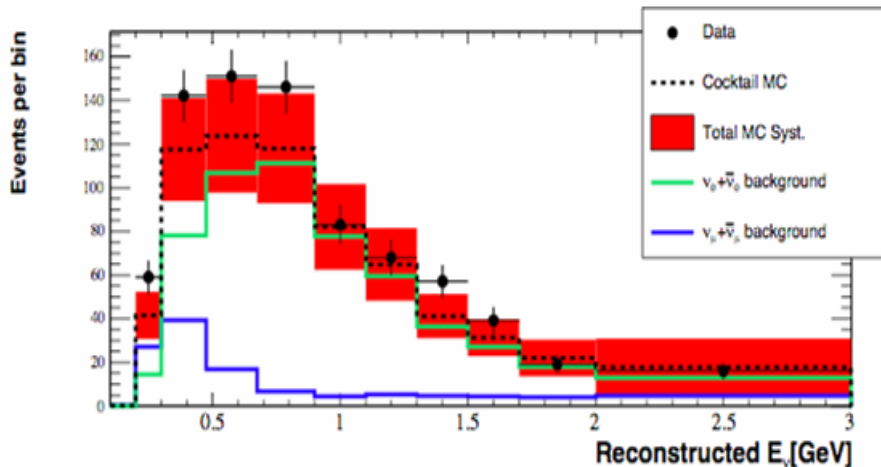


$$E_\nu^{QE} = \frac{1}{2} \frac{2M_p E_l - m_l^2}{M_p - E_l + \sqrt{(E_l^2 - m_l^2)} \cos \theta_l}$$



# ODDZIAŁYWANIA $\nu_e$ CCQE

Wyselekcjonowano 783 przypadków (MC przewiduje 662)



$$E_\nu^{QE} = \frac{1}{2} \frac{2M_p E_l - m_l^2}{M_p - E_l + \sqrt{(E_l^2 - m_l^2)} \cos \theta_l}$$

- Analiza oddziaływań neutrin z wiązki NuMI w detektorze MiniBooNE dla  $1.42 \times 10^{20} pot$
- W ramach (dużych) błędów systematycznych, zgodność pomiędzy danymi a MC dla kwazi-elastycznych oddziaływań CC  $\nu_\mu$  i CC  $\nu_e$  jest dobra
- W przyszłości prace nad zmniejszeniem efektów systematycznych i nad połączeniem tej analizy z analizą oddziaływań z wiązki MiniBooNE