

Neutrinowy eksperyment MINOS

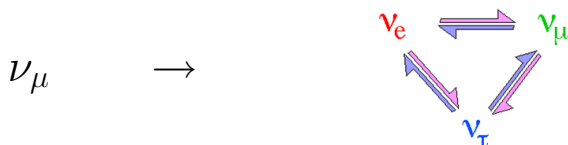
Katarzyna Grzelak

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



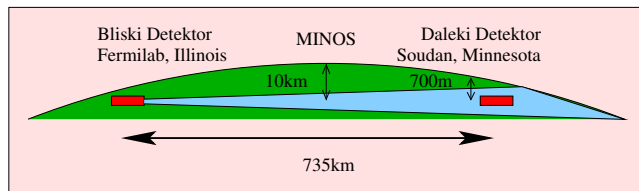
- MINOS: eksperyment zbudowany w celu potwierdzenia hipotezy oscylacji neutrin i zmierzenia parametrów modelu oscylacji
- Kontrolowana wiązka neutrin z akceleratora
- Pierwsze oddziaływanie neutrina z wiązki w dalekim detektorze: 7 marzec 2005
- Wyniki dla do tej pory przeanalizowanych danych, odpowiadające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

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





- 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
- Czas przelotu neutrina z Fermilab'u do Soudan: $\sim 2.5ms$

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 ($\delta = 0$):

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

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

neutrina
atmosferyczne



poszukiwane



deficyt
neutrin słonecznych



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

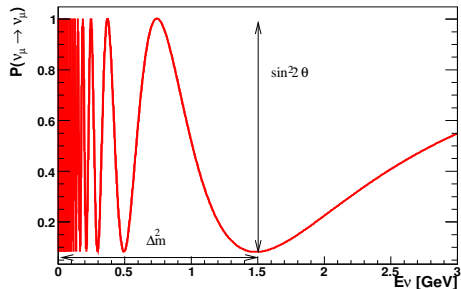
$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(L) = \sum_k |U_{\alpha k}|^2 |U_{\beta k}|^2 + 2\text{Re} \sum_{k>j} U_{\alpha k}^* U_{\beta k} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* \exp\left[-i \frac{\Delta m_{kj}^2}{2E_\nu} L\right]$$
$$\Delta m_{kj}^2 \equiv m_k^2 - m_j^2$$

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 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

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

- 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

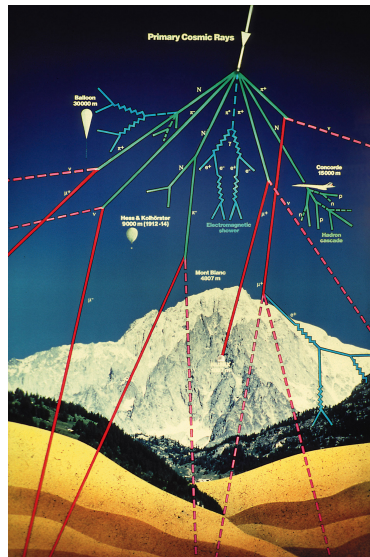
- **Weryfikacja hipotezy oscylacji $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ i precyzyjny pomiar (<10%) parametrów modelu neutrin Δm_{23}^2 and $\sin^2 2\theta_{23}$**
- Poszukiwania jeszcze nie zaobserwowanych przy tej skali mas, oscylacji $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ (poszukiwanie θ_{13})
- Poszukiwanie/wykluczenie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

Neutrina akceleratorowe

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

Neutrina atmosferyczne

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

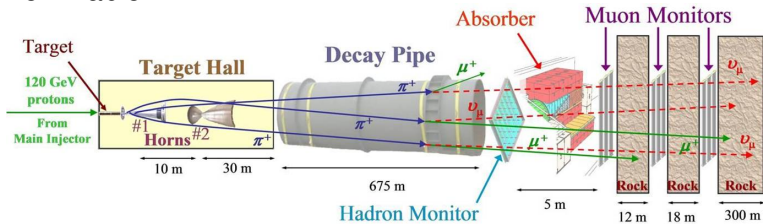


Miony z promieniowania kosmicznego

- pomiar N_{μ^+}/N_{μ^-}
- 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 $\sim 10 \text{ Hz}$

WIAZKA NEUTRIN NuMI

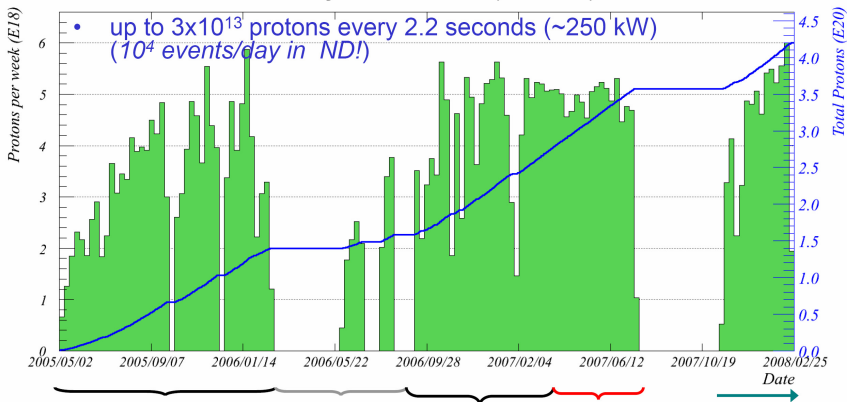
- Protony o energii 120 GeV z akceleratora Main Injector w Fermilabie



WIĄZKA PIERWOTNA - PROTONY

LICZBA DOSTARCZONYCH PROTONÓW

Total NuMI protons to 00:00 Monday 25 February 2008



RUN I - 1.27×10^{20} POT
(published in PRL)

Higher
energy
beam

RUN IIa
 1.23×10^{20} POT
(NEW)

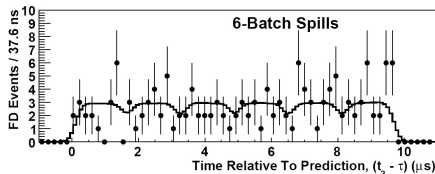
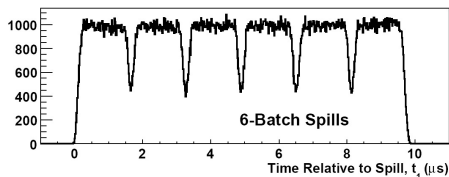
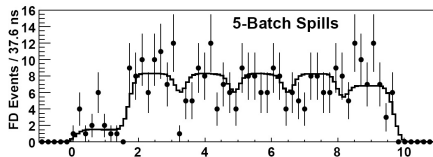
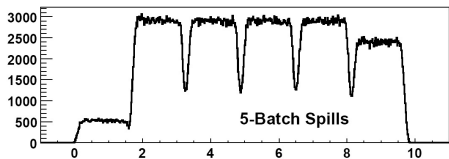
RUN IIb
 $\sim 0.75 \times 10^{20}$
POT
(in can)

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 $10 \mu\text{s}$
- 2.4×10^{13} protonów/puls co 2.2s

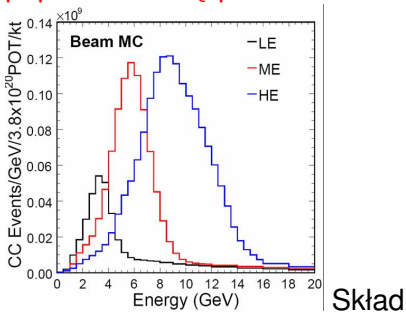


Bliski Detektor

Daleki Detektor

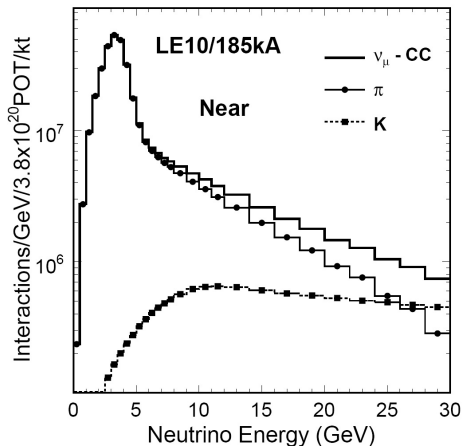
WIĄZKA WTÓRNA - NEUTRINA

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 % ($\nu_e + \bar{\nu}_e$)

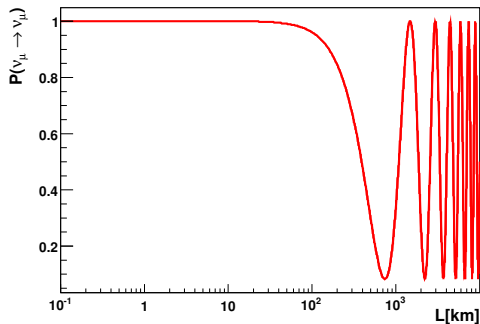
ν_μ głównie z rozpadów $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$



EKSPERYMENT MINOS

POŁOŻENIE DETEKTORÓW

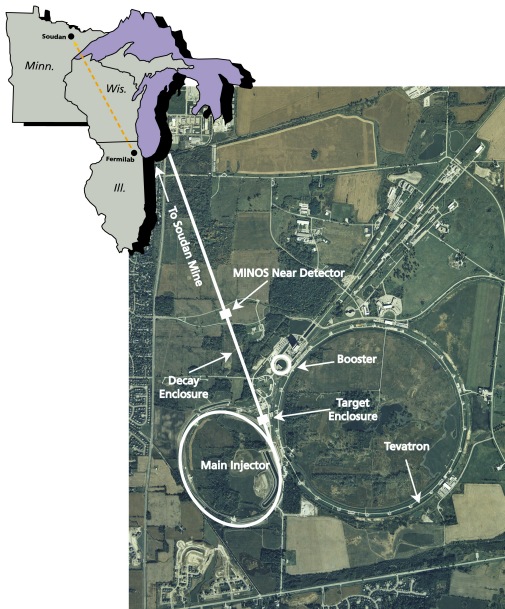
- Daleki Detektor (ND) → poszukiwanie oscylacji
- Bliski Detektor (FD) → widmo energii niezakłócone przez oscylacje



↑
Bliski detektor

↑ Daleki detektor

MINOS: POŁOŻENIE DETEKTORÓW



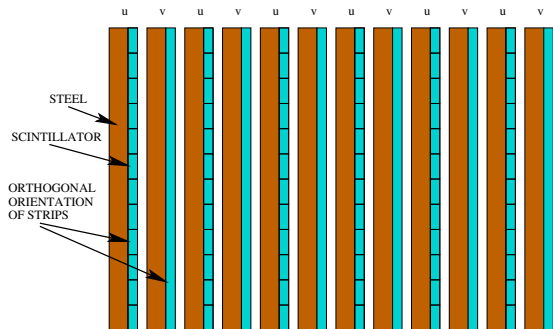
DALEKI DETEKTOR: KOPALNIA SOUDAN



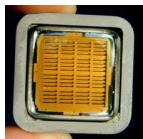
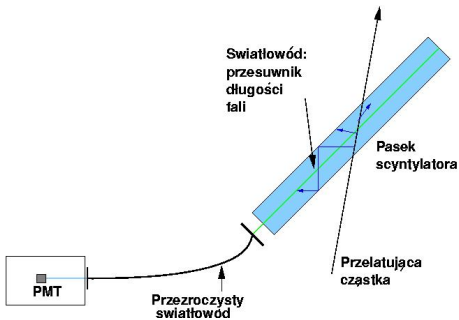
MINOS: BLISKI I DALEKI DETEKTOR

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

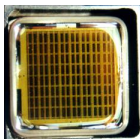
- naprzemiennie: stalowe płyty (2.54 cm) i paski scyntylatora (1cm)
- paski w co drugiej płaszczyźnie są do siebie prostopadłe



MINOS: BLISKI I DALEKI DETEKTOR



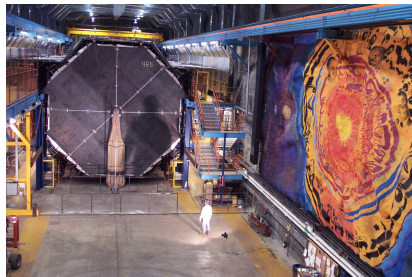
PMT M16 (FD)



PMT M64 (ND)



MINOS: BLISKI I DALEKI DETEKTOR



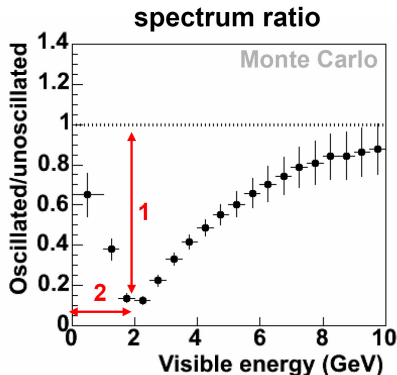
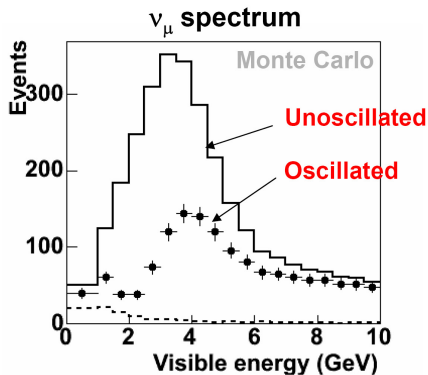
- Bliski Detektor: 1kt, 282 płaszczyzny, 3.8m × 4.8m × 15m
100m pod powierzchnią ziemi
- Daleki Detektor: 5.4kt, 484 płaszczyzny, 8m × 8m × 30m
710m pod powierzchnią ziemi
- $B \sim 1.3$ T w obu detektorach

OSCYLACJE NEUTRIN AKCELERATOROWYCH w MINOS'ie

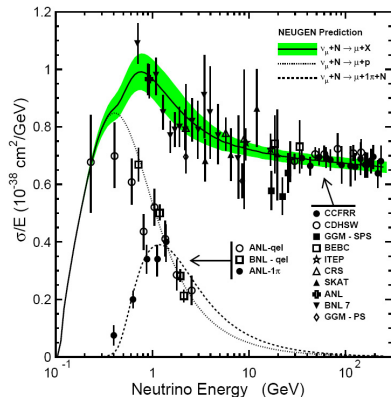
PRZYKŁAD ANALIZY ZNIKANIA ν_μ

Symulacja Monte Carlo

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



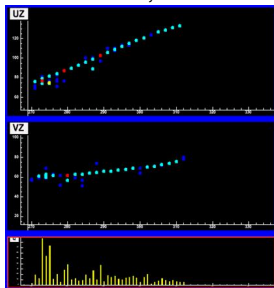
TYPY ODDZIAŁYWAŃ NEUTRIN w MINOS'ie



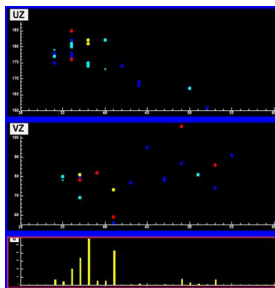
- $\nu_\mu N \rightarrow \mu X$
- Sygnaturą oddziaływania CC ν_μ jest obecność długiego toru mionu
- $E_\nu = E_{shower} + E_\mu$
- Rozdzielczość energetyczna $55\% \sqrt{E}$
- Dokładność pomiaru pędu mionu (6% z zasięgu, 11% z krzywizny)

TOPOLOGIE PRZYPADKÓW Z WIĄZKI NuMI

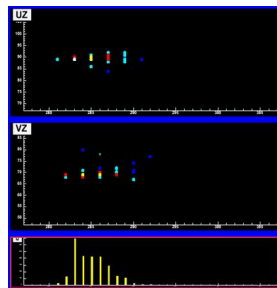
Monte Carlo, Daleki Detektor



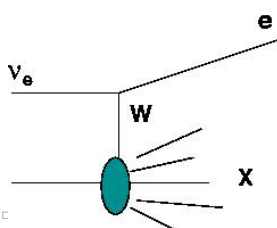
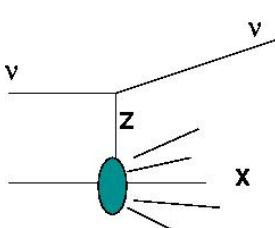
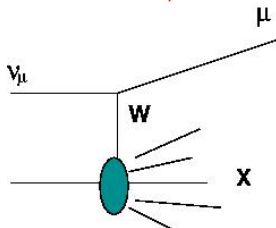
CC ν_μ



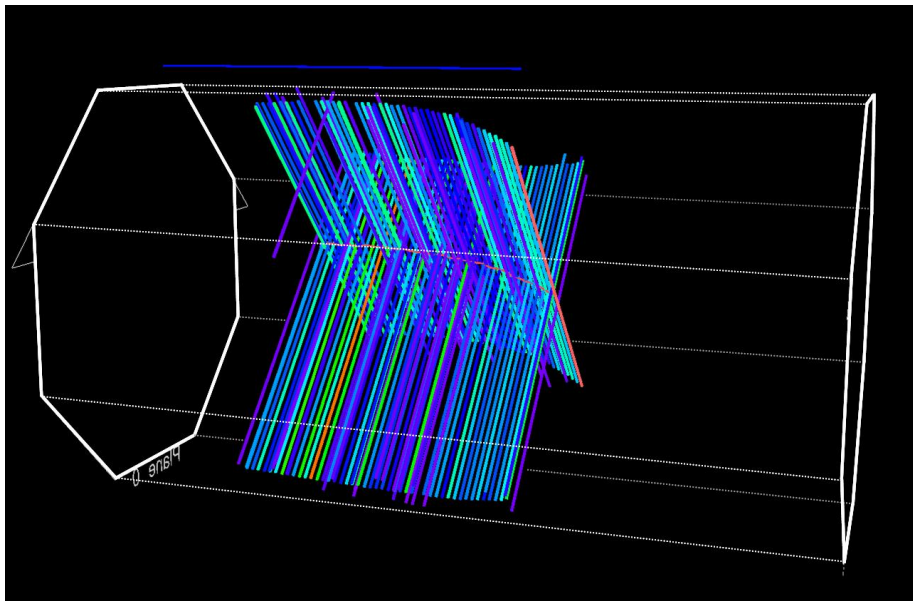
NC



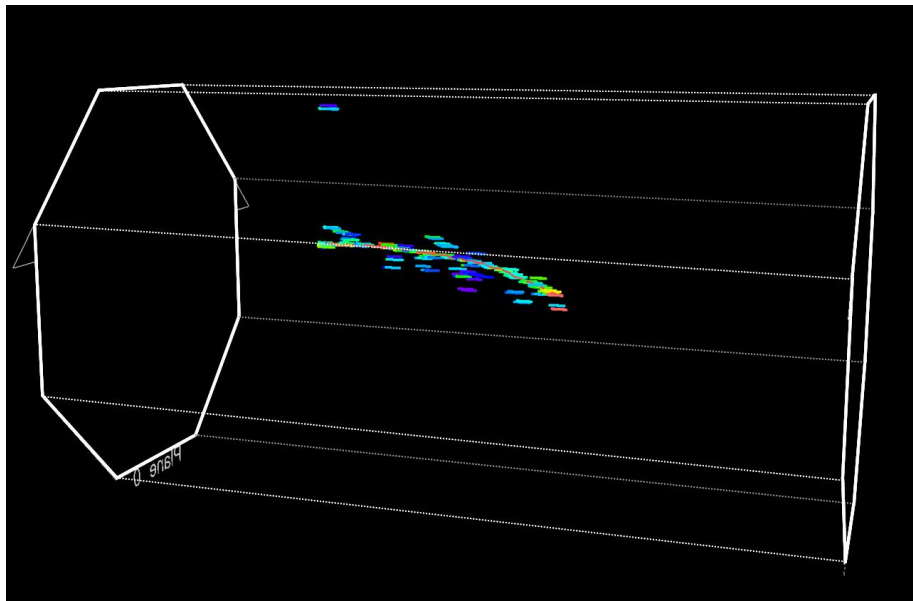
CC ν_e



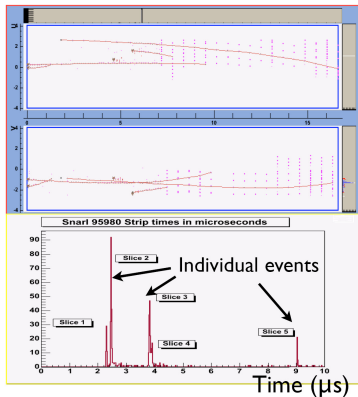
REKONSTRUKCJA w MINOS'ie



REKONSTRUKCJA w MINOS'ie

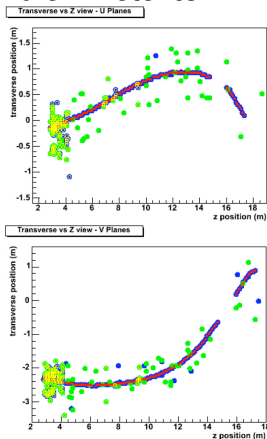


Bliski Detektor



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

Daleki Detektor

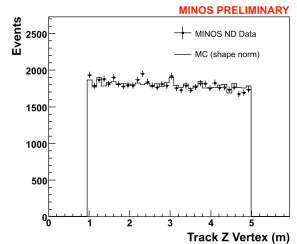
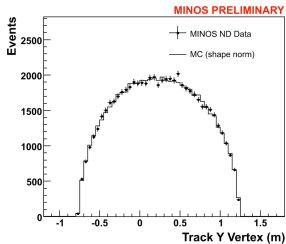
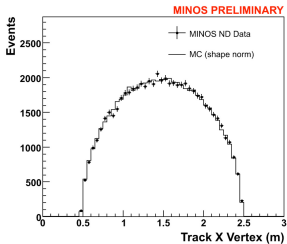


Częstość oddziaływań w FD znacznie niższa ($\sim 10^{-6} \times$ częstość w ND)

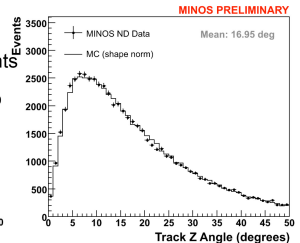
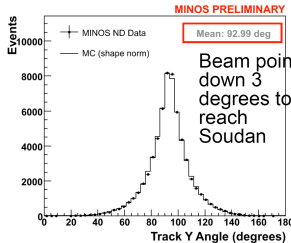
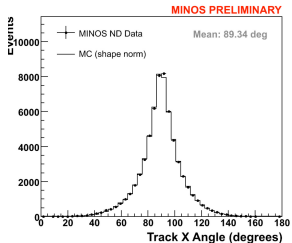
- Zabezpieczenie się przed nieumyślnym naginaniem wyników do oczekiwanego
- Wszystkie dane z Bliskiego Detektora są dostępne
- Część danych z Dalekiego Detektora ukryta (zgodnie z nieznaną funkcją długości przypadku i energii zdeponowanej w detektorze)
- Przed otwarciem *puszki* wszystkie procedury dotyczące analizy danych muszą być zamrożone
- Po otwarciu *puszki* dla pierwszej analizy, część danych z FD na nowo ukryta przy użyciu nowej funkcji

BLISKI DETEKTOR: PORÓWNANIE DANE/MC

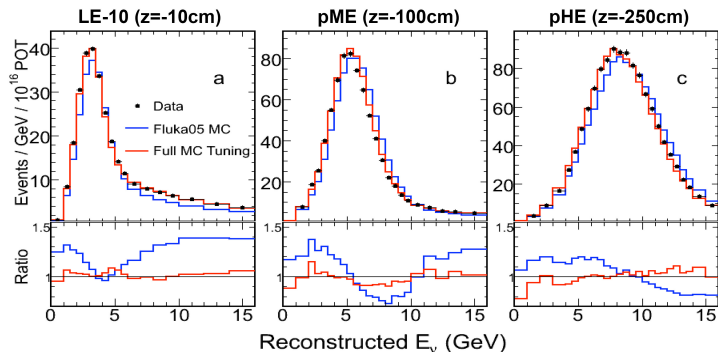
TRACK VERTICES



TRACK ANGLES



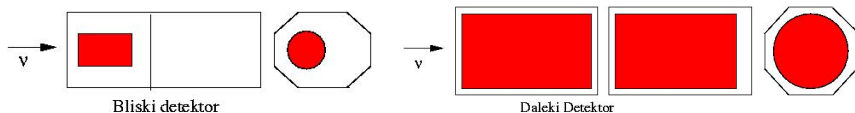
WIDMA ENERGII W BLISKIM DETEKTORZE



- 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

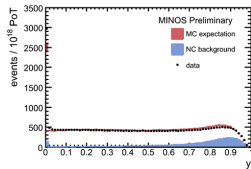
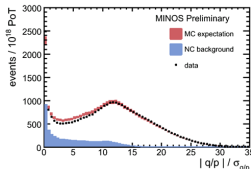
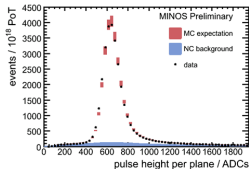
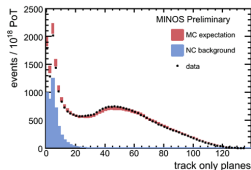
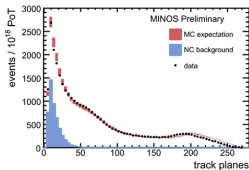
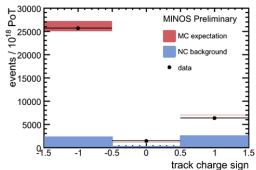
SELEKCJA PRZYPADKÓW CC ν_μ

- 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

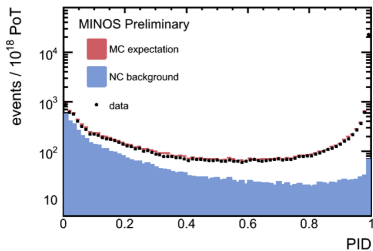


- 3 Miony z ujemnym ładunkiem (wybór ν_μ)
- 4 Cięcie na parametrze PID (Particle IDentification), używanym do selekcji oddziaływań NC i CC

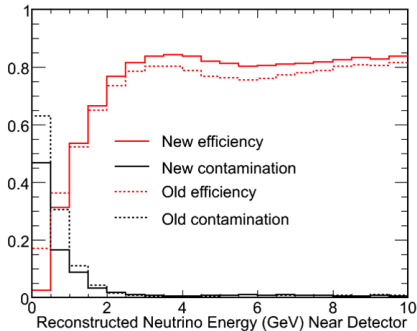
Wielkości które różnicują oddziaływania CC ν_μ i NC



ODRÓŻNIANIE ODDZIAŁYWAŃ CC ν_μ i NC



Cięcie na CC ν_μ : PID > 0.85



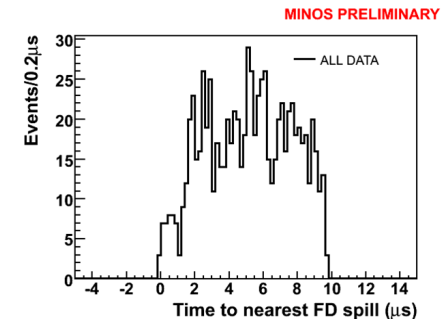
Efektywności i czystości dla ND

SELEKCJA ODDZIAŁYWAŃ Z WIĄZKI W FD

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

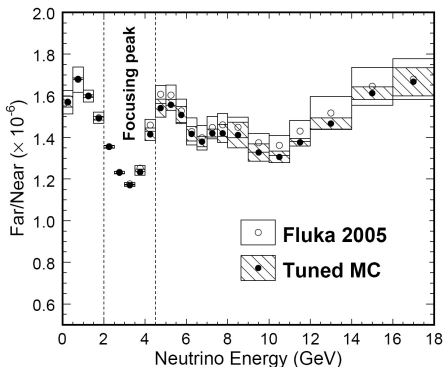
- Czas rejestracji oddziaływań musi być w koincydencji z czasem wiązki NuMI (w $50 \mu\text{s}$ oknie)
- Kierunek neutrin musi być zgodny z osią wiązki (kąt toru względem osi wiązki $< 50^\circ$)

Oczekiwane tło z mionów z promieniowania kosmicznego:
 < 0.5 przypadków



EKSTRAPOLACJA ND \rightarrow FD

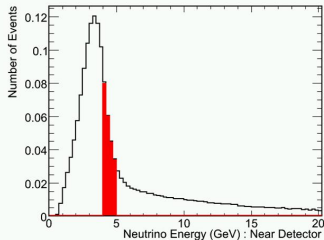
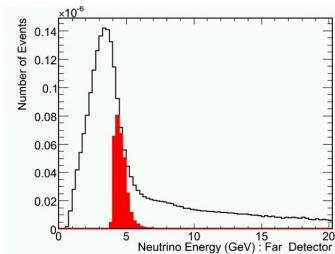
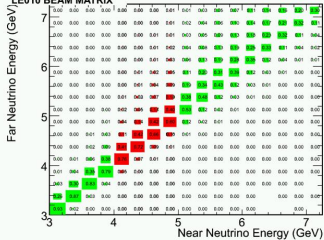
- Dane z Bliskiego Detektora są używane do przewidywania rozkładów energii w Dalekim Detektorze
- Niepewności związane z modelowaniem wiązki i przekrojami czynnymi, wspólne dla ND i FD, istotnie się skracają



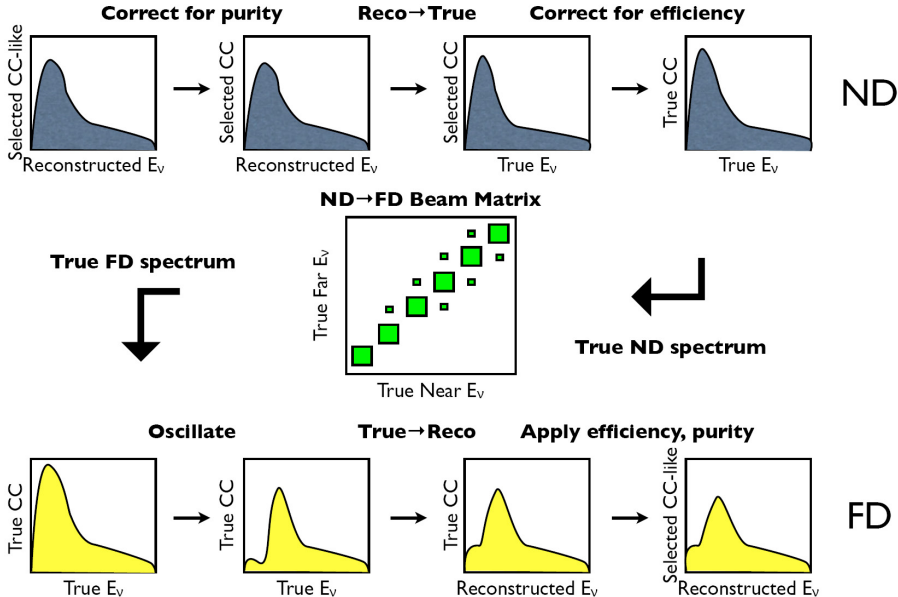
- ND widzi wiązkę ν jako źródło rozciągnięte, FD - jako punktowe
- ← Funkcja przejścia wiąże ze sobą prawdziwą energię ν w ND z prawdziwą energią w FD

Metoda BEAM MATRIX

LE010 BEAM MATRIX



Kolejne kroki w metodzie **BEAM MATRIX**



Błędy systematyczne na Δm_{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)

Błąd systematyczny	Shift in Δm_{23}^2	Shift in $\sin^2 2\theta_{23}$
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
Całkowity błąd systematyczny	0.10	0.008

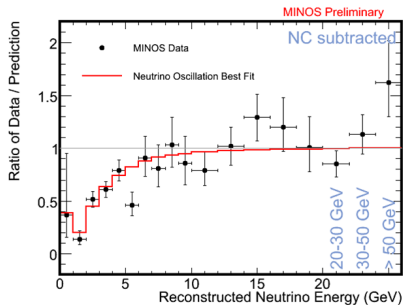
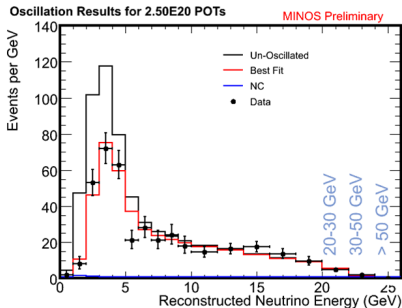
Wpływ kolejnych cięć na danych z FD

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 ≤ 0	672
Parametr PID > 0.85	564
Zrekonstruowana $E_\nu < 200 \text{ GeV}$	563

Zaobserwowana vs oczekiwana liczba zdarzeń

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

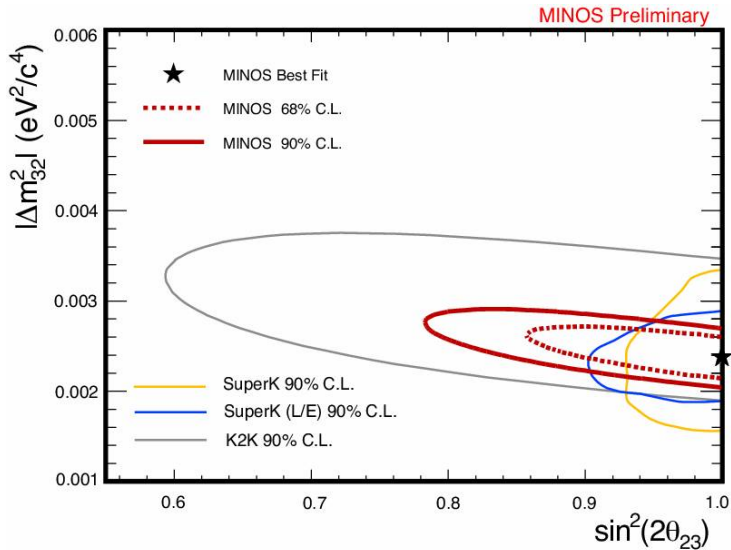
Widmo energii w FD i krzywa oscylacyjna



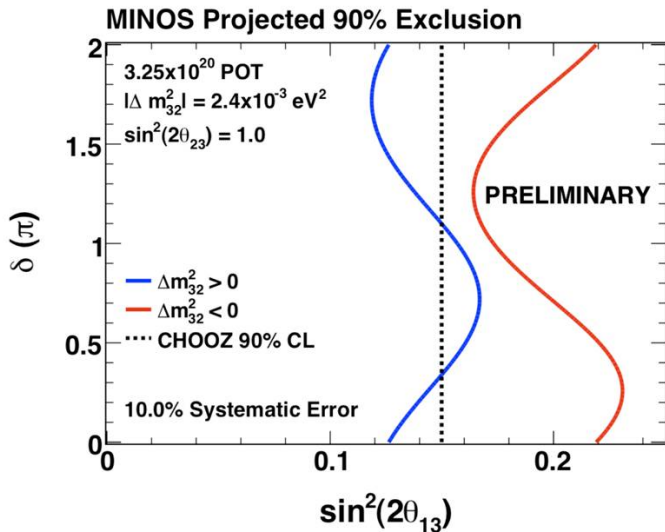
Parametry oscylacji z najlepszego dopasowania:

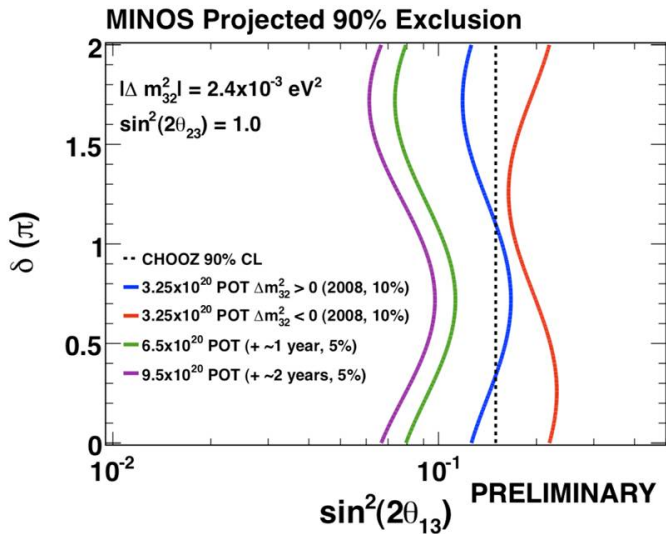
- $\Delta m_{23}^2 = 2.38_{-0.16}^{+0.20} \times 10^{-3} eV^2$
- $\sin^2 2\theta_{23} = 1.00_{-0.08}$

Dozwolony obszar



Przewidywania dla θ_{13}





- 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