

Pierwsze wyniki dotyczące poszukiwań oscylacji $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ w eksperymencie MINOS

Katarzyna Grzelak

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych
IFD UW

17.04.2009

PLAN

- 1 Wprowadzenie
- 2 Wiązka neutrin NuMI
- 3 Eksperyment MINOS
- 4 Poszukiwanie oscylacji $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ w MINOS'ie

WPROWADZENIE

Pomiar kąta mieszania θ_{13} z modelu oscylacji neutrin \rightarrow jeden z priorytetów fizyki neutrin

- brakujący element do modelu oscylacji neutrin
- związek θ_{13} z łamaniem CP \rightarrow asymetria materia/antymateria
- przyszłość: eksperymenty dedykowane do pomiaru θ_{13} (T2K, NOvA, eksperymenty reaktorowe)
- teraźniejszość: **MINOS** (prawdopodobieństwo pojawiania się ν_e w wiązce ν_μ zależy od θ_{13})

Najlepsze ograniczenie na

θ_{13} z eksperymentu

CHOOZ: $\sin^2(2\theta_{13}) < 0.15$

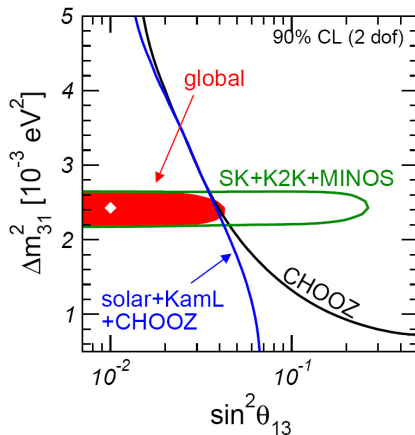
dla $|\Delta m_{32}^2| = 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$

Wyniki globalnego

dopasowania: T.Schwetz,

M. Tortola, J.W.F. Valle, New

J.Phys.10:113011,2008



MACIERZ MIESZANIA DLA NEUTRIN

Trzy zapachy neutrin jako kombinacja trzech stanów własnych masy.

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

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

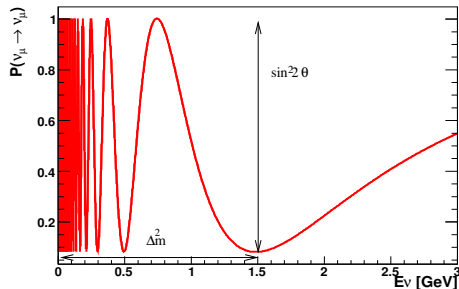
$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(L) = \sum_k |U_{\alpha k}|^2 |U_{\beta k}|^2 + 2\text{Re} \sum_{k>j} U_{\alpha k}^* U_{\beta k} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* \exp\left[-i \frac{\Delta m_{kj}^2}{2E_\nu} L\right]$$
$$\Delta m_{kj}^2 \equiv m_k^2 - m_j^2$$

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 →
pomiar/granica na θ_{13}

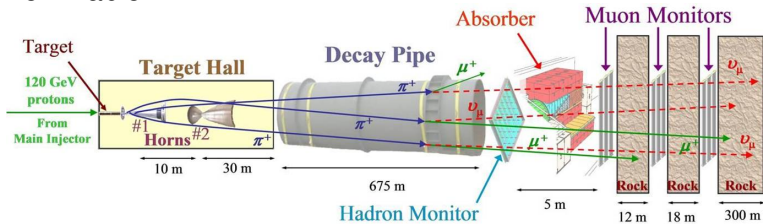
$$\begin{aligned}P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) &\simeq \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{23} \sin^2 \Delta \\ &\mp \alpha \sin 2\theta_{13} \sin \delta_{CP} \cos \theta_{13} \sin 2\theta_{12} \sin 2\theta_{23} \sin^3 \Delta \\ &+ \alpha \sin 2\theta_{13} \cos \delta_{CP} \cos \theta_{13} \sin 2\theta_{12}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

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

Dokładnie mierzy się tylko kombinację parametrów, a nie tylko samo $\sin^2 2\theta_{13}$ Wzór dla oscylacji w próżni.

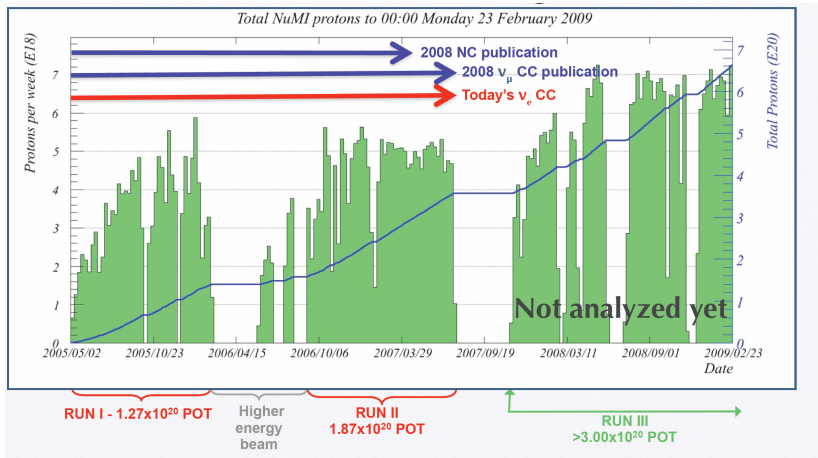
WIAZKA NEUTRIN NuMI

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



WIĄZKA PIERWOTNA - PROTONY

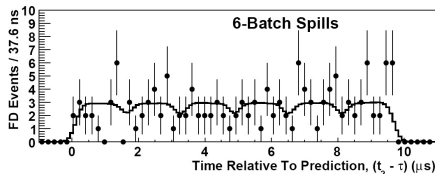
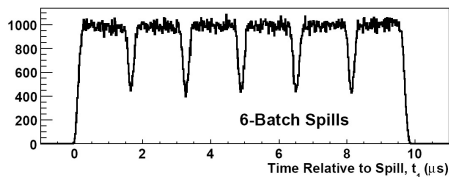
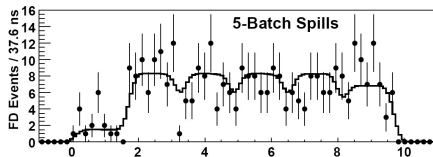
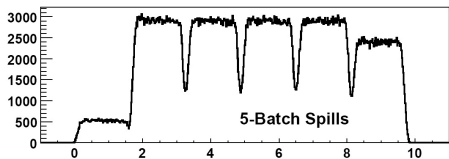
LICZBA DOSTARCZONYCH PROTONÓW



Prezentowane wyniki dla $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$ dla 3.14×10^{20} pot (protonów na tarczę) (do chwili obecnej zebrane 7×10^{20} pot !)

STRUKTURA WIĄZKI PIERWOTNEJ WIDZIANA W ND i FD

- Pierwotna wiązka 120 GeV protonów: wysyłana w 5-6 paczkach, w czasie $10 \mu\text{s}$
- 3×10^{13} protonów/puls co 2.2s

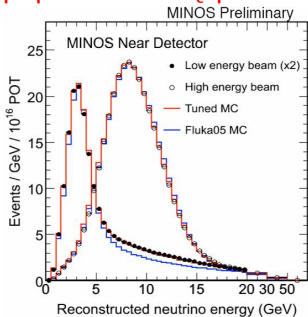


Bliski Detektor

Daleki Detektor

WIĄZKA WTÓRNA - NEUTRINA

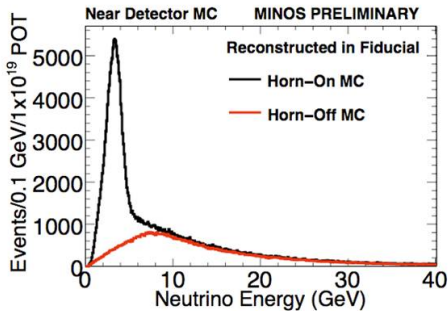
Unikalną cechą wiązki NuMI jest możliwość zmiany widma neutrin poprzez zmianę położenia tarczy.



Skład

wiązki neutrin (LE-10): 98.7 %
($\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$) (6.5 % $\bar{\nu}_\mu$), 1.3 % ($\nu_e + \bar{\nu}_e$)

Widma energii po wyłączeniu rogów magnetycznych (horn off)



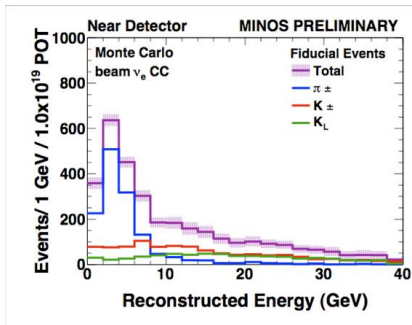
SKŁADOWA ν_e WIĄZKI NEUTRIN

- W wiązce ν_μ jest 1.3% ν_e z rozpadu pionów i kaonów
- W obszarze 1-8 GeV, ν_e głównie z rozpadów mionów:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ \bar{\nu}_\mu \nu_e$$

- Więzy na widma ν_e z porównania różnych konfiguracji wiązki (każdemu ν_e z rozpadu μ^+ towarzyszy $\bar{\nu}_\mu$)



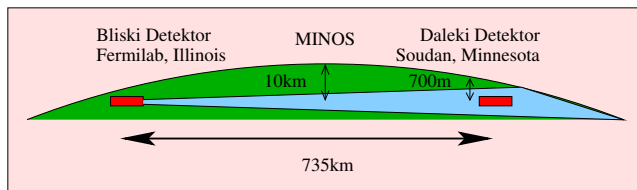
EKSPERYMENT MINOS

Eksperyment MINOS:

30 instytucji, 147 fizyków

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

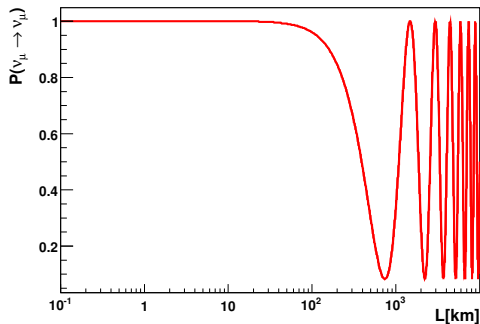




- MINOS: drugi w historii i jedyny obecnie zbierający dane eksperyment z długą bazą
- Bliski Detektor (ND) (1kt) w ośrodku Fermilab pod Chicago
- Daleki Detektor (FD) (5.4 kt) znajduje się 735km dalej w kopalni Soudan, w Minnesocie
- Czas przelotu neutrina z Fermilab'u do Soudan: $\sim 2.5ms$

POŁOŻENIE DETEKTORÓW

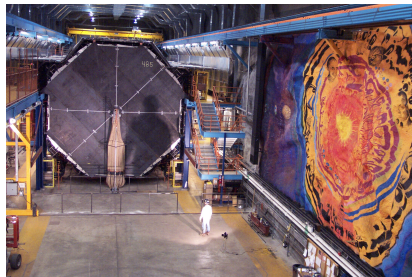
- Daleki Detektor (FD) → poszukiwanie oscylacji
- Bliski Detektor (ND) → widmo energii niezakłócone przez oscylacje



↑
Bliski detektor

↑ Daleki detektor

MINOS: BLISKI I DALEKI DETEKTOR

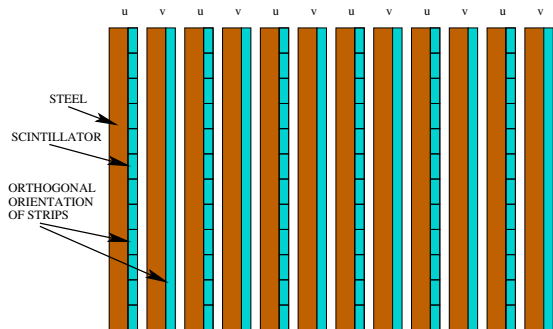


- Bliski Detektor: 1kt, 282 płaszczyzny, 3.8m × 4.8m × 15m
100m pod powierzchnią ziemi
- Daleki Detektor: 5.4kt, 484 płaszczyzny, 8m × 8m × 30m
710m pod powierzchnią ziemi
- $B \sim 1.3$ T w obu detektorach

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



Wyzwania:

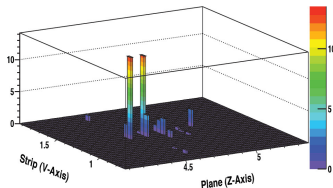
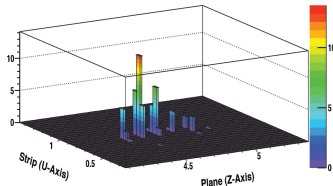
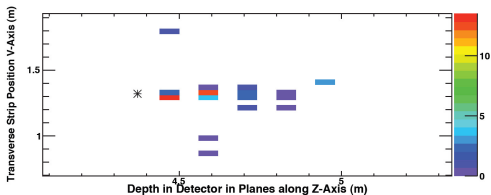
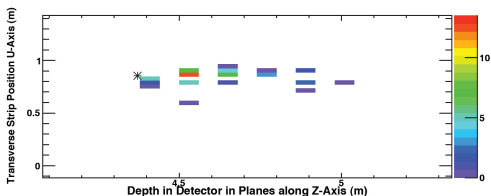
- detektor nie optymalizowany do odróżniania kaskad elektromagnetycznych i hadronowych
- wiązka neutrin ma domieszkę ν_e

Poszukiwanie neutrin elektronowych w MINOS'ie

Kandydat na oddziaływanie ν_e w FD. Dane

- Typical EM shower characteristics:
 - steel thickness: 2.54cm $\sim 1.44X_0$
 - strip width: 4.12cm (Moliere rad ~ 3.7 cm)

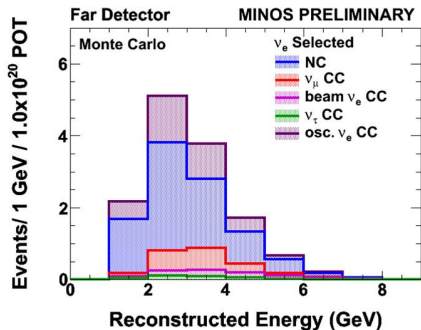
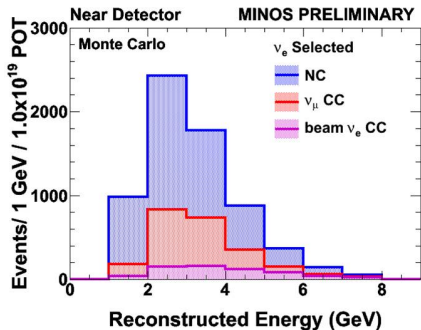
Run: 32687 Snarl: 90343
Reco Energy: 4.6 GeV



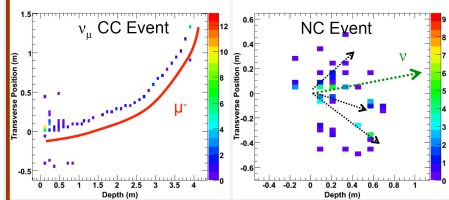
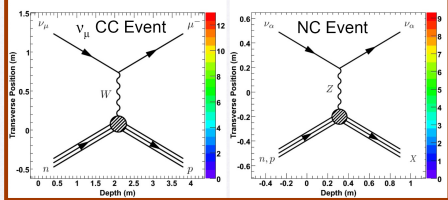
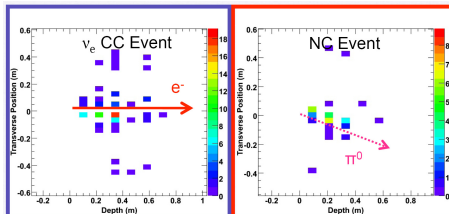
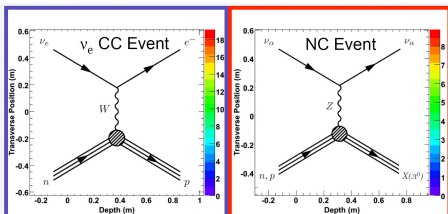
POSZUKIWANIE OSCYLACJI $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ w MINOS'ie

- **Selekcja oddziaływań ν_e** (poszukiwanie kandydatów na elektrony)
- **Pomiar tła w Bliskim Detektorze (ND)** (przypadki, które przeszły selekcję ν_e)
- **Separacja** głównych składników tła w ND
- **Ekstrapolacja** do Dalekiego Detektora (FD)
- **Poszukiwanie nadmiaru przypadków ν_e w FD**

ELEMENTY ANALYZY



ODDZIAŁYWANIA NEUTRIN W MINOS'ie



Selekcja oddziaływań ν_e CC = poszukiwanie zwartych kaskad

Selekcja oddziaływań ν_e

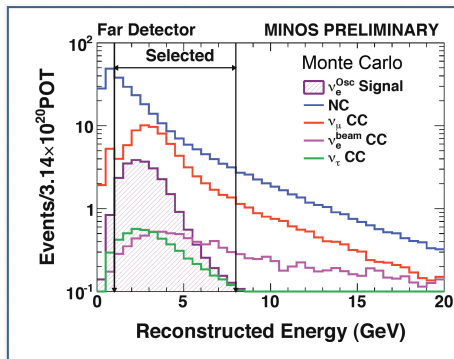
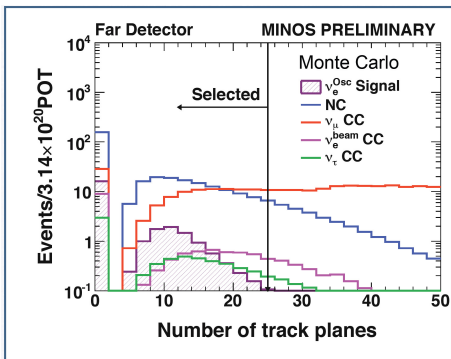
Selekcja oddziaływań ν_e ogólnie

- **Cięcia wstępne** (zapewnienie dobrej jakości danych):
 - dobra jakość wiązki, sprawny detektor
 - wiarygodny obszar detektora (fiducial volume)

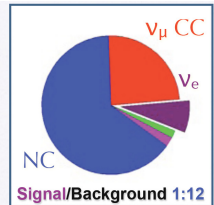
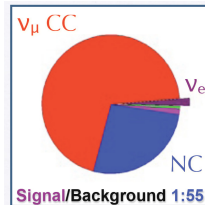


- usuwanie promieniowania kosmicznego (nachylenie)
- **Preselekcja** (redukcja tła)
- **Selekcja** (charakterystyka kaskady elektromagnetycznej)

Preselekcja



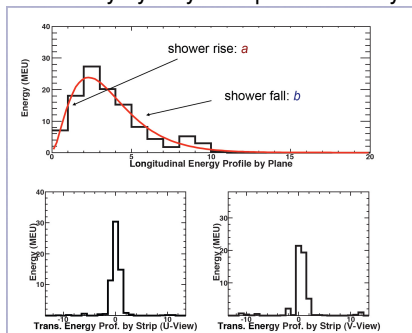
- Długość toru < 25 płaszczyzn
- Liczba płaszczyzn track-like < 16
- Zrekonstruowana energia 1-8 GeV
- Min 1 kaskada, 4 sąsiednie płaszczyzny z energią > 0.5 MIP



Selekcja za pomocą sieci neuronowych, zmienne wejściowe

Podstawowa selekcja: ANN (Artificial Neural Network)

Kandydaci na ν_e : kompaktowa kaskada;
charakterystyczny E-M profil kaskady

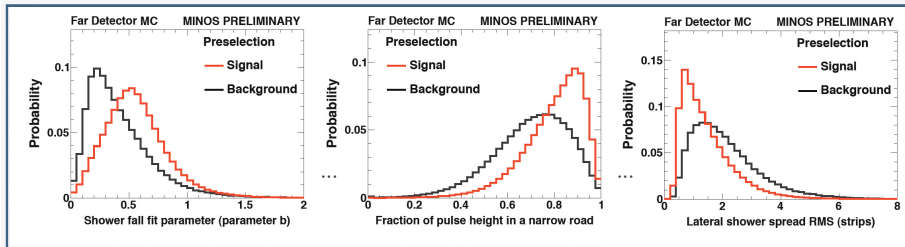


- profil podłużny:

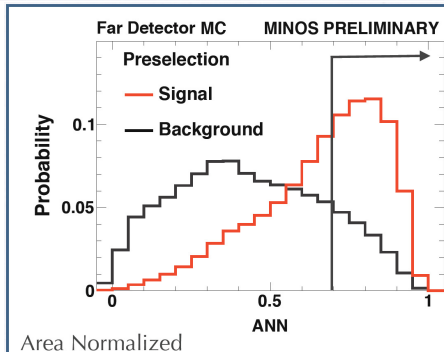
$$\frac{dE}{dt} = E_0 b \frac{(bt)^{a-1} e^{-bt}}{\Gamma(a)}$$

- część energii pozostawionej w 2,4,6 płaszczyźnie
- podłużny, energetyczny profil kaskady
- profil poprzeczny:
 - promień, w którym zawiera się 90% energii kaskady
 - miara szerokości (RMS)
 - procent energii pozostawionej w 3 paskach wokół osi kaskady

Selekcja za pomocą sieci neuronowych



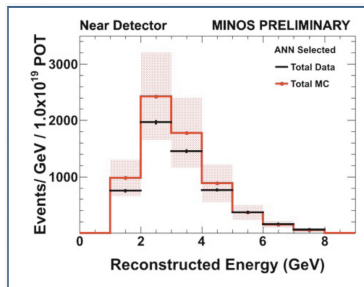
- 11 zmiennych wejściowych opisujących długość, szerokość i kształt kaskady
- efektywność selekcji 41%
- redukcja przyp. NC > 92.3%
- redukcja przyp. CC > 99.4%
- stosunek sygnału do tła 1:4



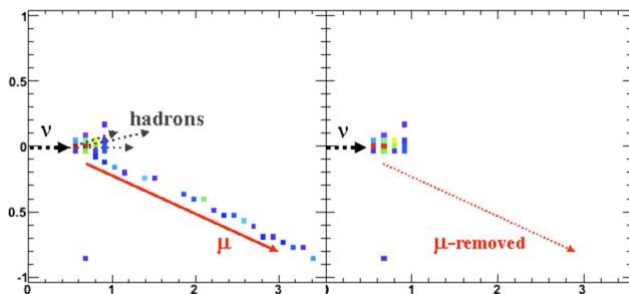
Tłó

Wyniki selekcji ν_e w Bliskim Detektorze (ND)

- Mało zewnętrznych danych w obszarze kinematycznym MINOS'a, do których można porównać Monte Carlo
- **Dwie metody oparte o dane**, pozwalające poprawić zgodność modelu z danymi:
 - **metoda MRCC** (Muon Removed Charged Current) pozwalająca na badanie kaskad hadronowych
 - **metoda Horn on/off** wykorzystująca różnicę w proporcjach składowych tła dla dwóch różnych konfiguracji rogów magnetycznych



Badanie kaskad hadronowych za pomocą metody MRCC

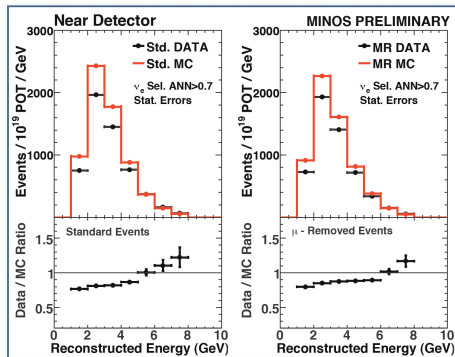


- Tor mionu usuwany z przypadków ν_{μ} CC; reszta traktowana jak przypadek czysto hadronowy

- Używane przypadki, które przeszły standardową selekcję ν_{μ} CC
- Dobrze znane rozkłady, efektywności, czystości z analizy znikania ν_{μ} z wiązki

Badanie kaskad hadronowych za pomocą metody MRCC

- Selekcja ν_e zastosowana do standardowych danych i MC, jak również do danych i MC z usuniętym mionem (ND)
- Podobna rozbieżność w energii i kształcie kaskad \Rightarrow modelowanie kaskady hadronowej jest głównym odpowiedzialnym za niezgodność danych i MC

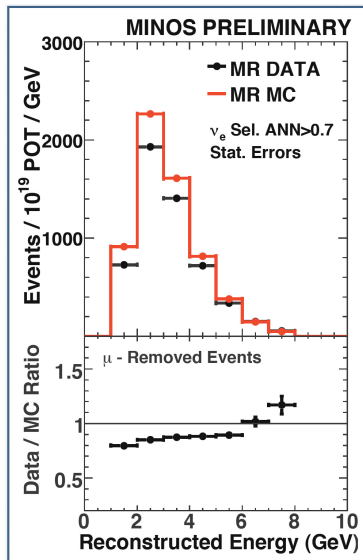


Poprawka do modelu przy użyciu danych MRCC

- Poprawka dla przypadków NC w funkcji energii:

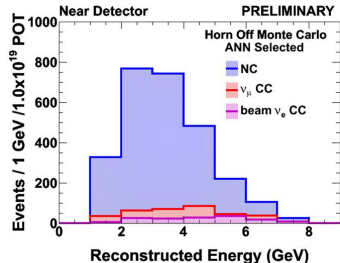
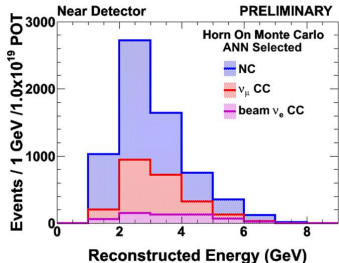
$$NC_i^{corr} = \frac{MRCC_i^{data}}{MRCC_i^{MC}} \times NC_i^{MC}$$

- Liczba przypadków ν_μ CC = liczba przypadków w danych - poprawione NC - liczba ν_e z wiązki
- Trudny do oceny błęd systematyczny \Rightarrow pomocnicza metoda separacji



Ocena tła przy użyciu danych horn on/off

- Po zastosowaniu selekcji ν_e do danych (ND), skład wybranych przypadków jest bardzo różny dla włączonych i wyłączonych rogów magnetycznych



- Dla wyłączonych rogów głównie przypadki NC \Rightarrow lepszy pomiar tej składowej tła

Ocena tła przy użyciu danych horn on/off

- Dwie główne składowe tła (ν_μ CC i NC) mogą zostać oszacowane dzięki znajomości liczby przypadków przy włączonych i wyłączonych rogach magnetycznych

$$N_{on} = N_{NC} + N_{CC} + N_e \quad (1)$$

$$N_{off} = r_{NC}N_{NC} + r_{CC}N_{CC} + r_eN_e \quad (2)$$

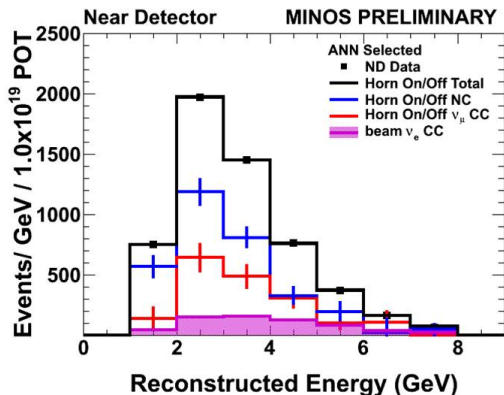
$$r_{NC} = \frac{N_{NC}^{off,MC}}{N_{NC}^{MC}}$$

$$r_{CC} = \frac{N_{CC}^{off,MC}}{N_{CC}^{MC}}$$

$$r_e = \frac{N_e^{off,MC}}{N_e^{MC}}$$

- Składowe N_{NC} i N_{CC} z rozwiązania układu równań (1) i (2)

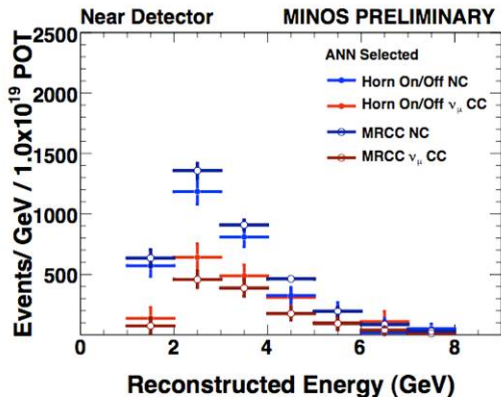
Ocena tła przy użyciu danych horn on/off



Suma składowych NC i ν_μ CC jest z definicji równa danym po odjęciu tła od ν_e z wiązki

Ocena tła przy pomocy danych

Separacja tła: porównanie dwóch metod (MRCC i horn on/off)



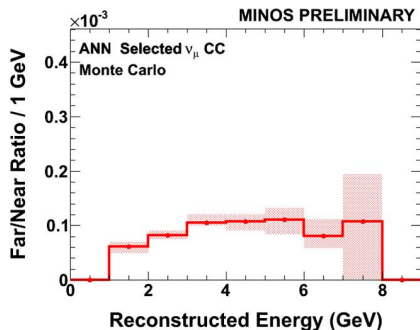
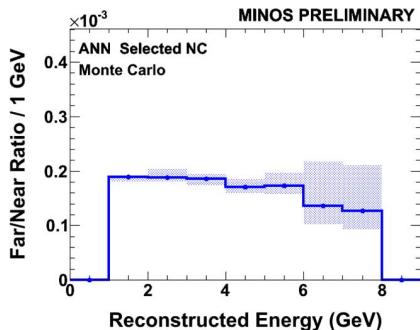
- Następny krok: ekstrapolacja każdej klasy przypadków do Dalekiego Detektora

Ekstrapolacja do Dalekiego Detektora

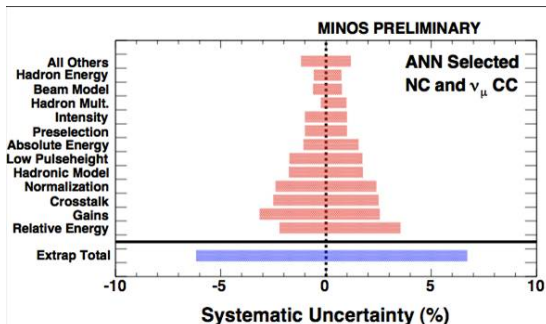
Tła w Dalekim Detektorze - przewidywania

Poprawka dla przypadków tła NC i ν_μ CC, wyselekcjonowanych w Bliskim Detektorze

$$FD_i^{\text{przewidywane}} = \frac{FD_i^{MC}}{ND_i^{MC}} ND_i^{\text{Dane}}$$



Tło w Dalekim Detektorze - błędy systematyczne



- Całkowity błąd systematyczny: **7.3%**
- Główny wkład do błędu systematycznego ma niepewność ekstrapolacji: **6.4%**
- Błąd statystyczny: **19%**

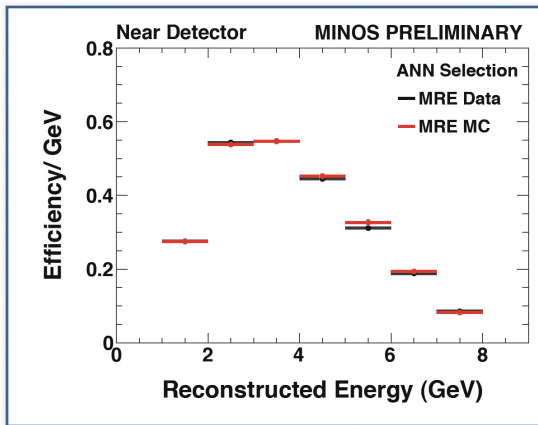
Tło w Dalekim Detektorze - wyniki

| | Total | NC | $\nu_{\mu} CC$ | $\nu_{\tau} CC$ | ν_e beam |
|-------------|-------|------|----------------|-----------------|--------------|
| Horn on/off | 27 | 18.2 | 5.1 | 1.1 | 2.2 |
| MRCC | 28 | 21.1 | 3.6 | | |

- Dwie metody wyznaczania tła (oparte na danych) są ze sobą w bardzo dobrej zgodności
- Podstawowa metoda separacji: horn on/off
- Przewidywana liczba przypadków tła dla 3.14×10^{20} pot : $27 \pm 5(stat) \pm 2(sys)$

Efektywność rejestracji sygnału

- Ocena efektywności rejestracji oddziaływań ν_e :
 - przypadki oddziaływań ν_μ CC z mionem zastąpionym przez elektron (MRE) symulują oddziaływania ν_e CC
 - Selekcja ν_e zastosowana do danych MRE i MC:



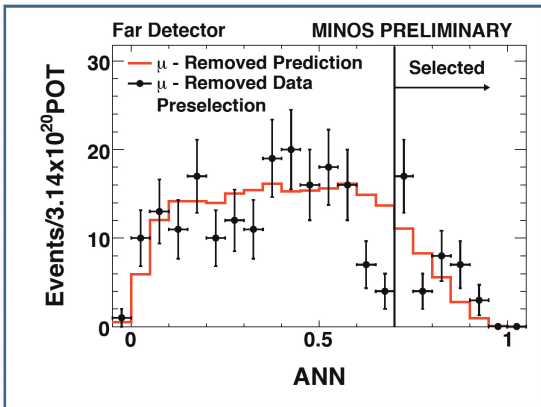
Oczekiwany sygnał

- Oczekiwany sygnał zależy od δ_{CP} i hierarchii mas
- Przewidywana liczba przypadków sygnału dla 3.14×10^{20} , dla maksymalnej wartości θ_{13} dozwolonej przez eksperyment CHOOZ: **6-12 przypadków**

Dane poza obszarem sygnału

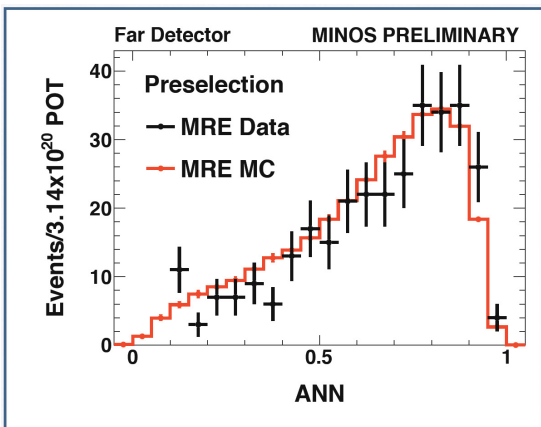
- Przed jakimkolwiek użyciem danych z Dalekiego Detektora w obszarze sygnału, wszystkie etapy analizy zostały sfinalizowane (włączając wyznaczenie błędów systematycznych)
→ *Blind Analysis*
- Badano trzy dopełniające grupy danych:
 - MRCC w Dalekim Detektorze
 - MRE w Dalekim Detektorze
 - Przypadki z selekcji ν_e , poniżej cięcia wybierającego sygnał

Dane poza obszarem sygnału: MRCC



Obserwuje się 39
przypadków
Oczekiwane
 $29 \pm 5(\text{stat}) \pm 2(\text{sys})$
przypadków

Dane poza obszarem sygnału: MRE



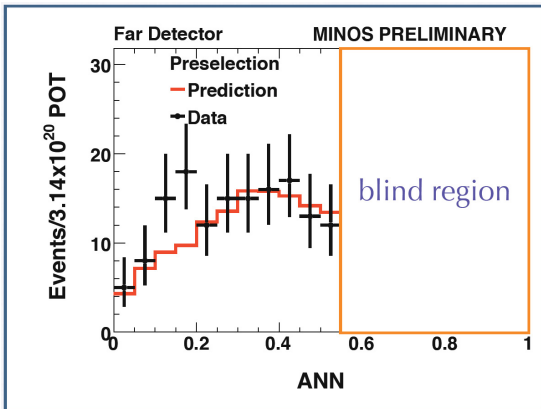
Dodanie elektronu do przypadków z usuniętym mionem powoduje dobrą zgodność pomiędzy danymi i MC

Obserwuje się 159 przypadków

Oczekiwane

$152 \pm 13(stat) \pm 12(sys)$ przypadków

Dane poniżej cięcia wybierającego sygnał



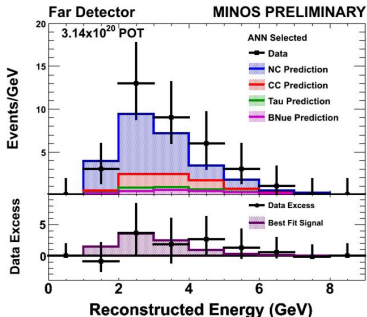
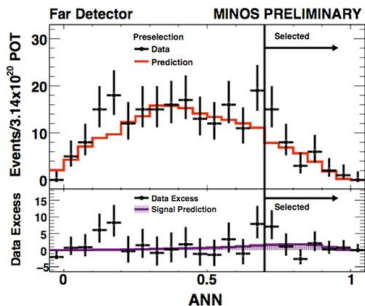
Obserwuje się 146
przypadków
Oczekiwane
 $132 \pm 12(stat) \pm 8(sys)$
przypadków

Poszukiwanie oscylacji $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$

Wyniki

Wyselekcjonowane oddziaływania ν_e w FD

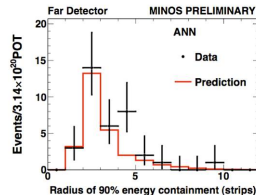
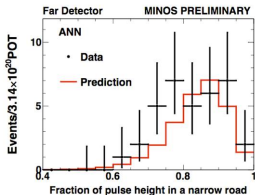
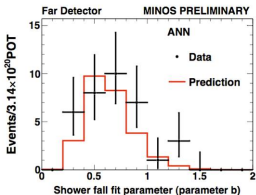
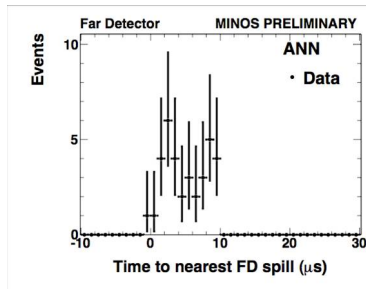
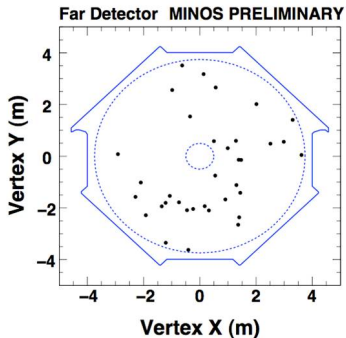
Dane w Dalekim Detektorze po preselekcji porównane do poprawionego Monte Carlo.



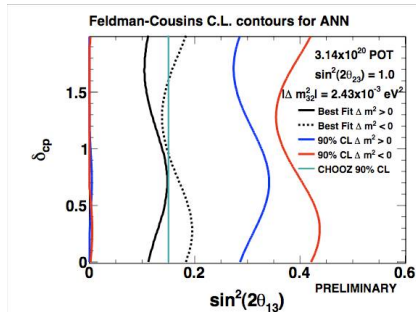
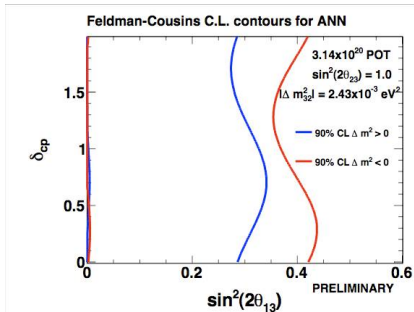
Obserwuje się **35 przypadków**. Oczekiwane $27 \pm 5(stat) \pm 2(sys)$ przypadków

Wynik 1.5σ powyżej oczekiwanego tła

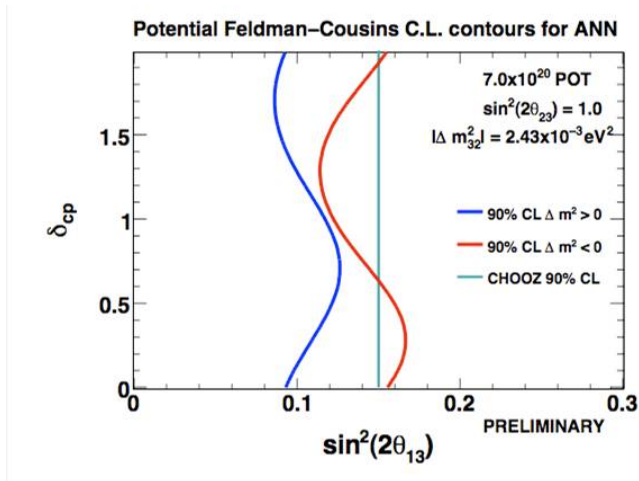
Wyselekcjonowane oddziaływania ν_e w FD



Kontury 90%CL dla $3.14 \times 10^{20} \text{pot}$



Oczekiwane kontury 90%CL dla 7×10^{20} pot



Jeśli nadwyżka danych zniknie wraz ze wzrostem statystyki

- Przy statystyce 3.14×10^{20} pot MINOS obserwuje **35** kandydatów na oddziaływania ν_e przy oczekiwanym tle **$27 \pm 5(stat) \pm 2(sys)$** przypadków
- W chwili obecnej dostępna już dwa razy większa statystyka, 7×10^{20} pot !