

Eksperymenty badające neutrino akceleratorowe

Teraźniejszość i przyszłość

Katarzyna Grzelak

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych
Uniwersytet Warszawski

3.03.2006 / Seminarium ZFJA

PLAN

- 1 Wprowadzenie
- 2 Standardowa wiązka neutrin
- 3 Detektory
- 4 MINOS
- 5 Przyszłe eksperymenty

- Neutrino: lepton nienaładowane ν_e, ν_μ, ν_τ
- Masy neutrin \ll masy leptonów naładowanych

$$m(\nu_e) < 3\text{eV}, \quad m(\nu_\mu) < 0.19\text{MeV}, \quad m(\nu_\tau) < 18.2\text{MeV}$$

- Stany własne oddziaływań i masy są różne \rightarrow
oscylacje neutrin
 - W oddziaływaniu powstaje jeden rodzaj \rightarrow po jakimś czasie mieszanka zapachów



- Deficyt neutrin słonecznych + dane SNO i KamLAND
 - za mało ν_e ze Słońca
 - całkowity strumień zgodny z Modelem Słońca
 - deficyt $\bar{\nu}_e$ z reaktora
- Dane dla neutrin atmosferycznych + dane K2K
 - deficyt ν_μ
 - rozkłady kątowe (mniej ν_μ przychodzących z dołu detektora niż z góry)
- Dane LSND
 - nadwyżka neutrin elektronowych w wiązce neutrin mionowych z akceleratora
 - sprawdzane przez eksperyment MINIBoONE
 - jeśli wyniki LSND potwierdzone: nie wystarczą 3 zapachy neutrin

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

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

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

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

atmosferyczne

poszukiwane

słoneczne

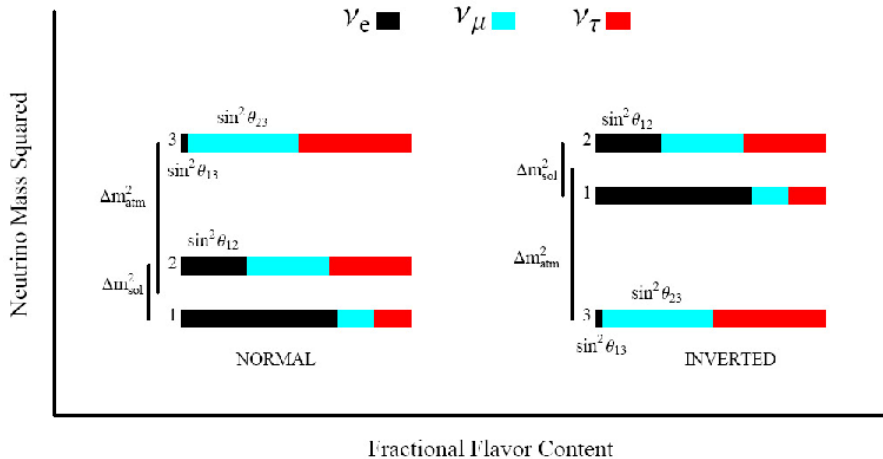
$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(L) = \sum_k |U_{\alpha k}|^2 |U_{\beta k}|^2 + 2\text{Re} \sum_{k>j} U_{\alpha k}^* U_{\beta k} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* \exp\left[-i \frac{\Delta m_{kj}^2}{2E_\nu} L\right]$$

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

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

Wyniki globalnego dopasowania do istniejących danych (z eksperymentów Super-K, K2K, CHOOZ, KamLAND), najbardziej prawdopodobne wartości:

- $\Delta m_{23}^2 = 2.4 \times 10^{-3} \text{eV}^2$
- $\sin^2 \theta_{23} = 0.44$
- $\Delta m_{12}^2 = 7.92 \times 10^{-5} \text{eV}^2$
- $\sin^2 \theta_{12} = 0.314$
- $\sin^2 \theta_{13} < 3.2 \times 10^{-2}$
- $\Delta m_{sol}^2 \equiv \Delta m_{21}^2$
- $\Delta m_{atm}^2 \equiv \Delta m_{32}^2 \simeq \Delta m_{31}^2$
- $\Delta m_{sol}^2 \ll \Delta m_{atm}^2$



CZEGO NIE WIEMY O MODELU OSCYLACJI

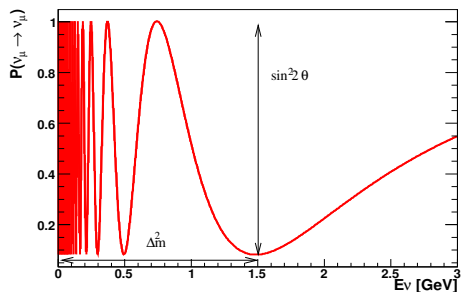
- czy na pewno tylko 3 rodzaje neutrin
- nieznany kąt θ_{13}
- nieznane δ
- brakuje precyzyjnych pomiarów pozostałych parametrów
- jaka jest hierarchia mas
- czy tylko oscylacje, czy jeszcze jakiś inny proces
- ...
- bezwzględne masy neutrin

BADANIE ZJAWISKA OSCYLACJI

W EKSPERYMENTACH AKCELERATOROWYCH

- obserwacje znikania danego rodzaju neutrin

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



Jednostki:

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

$$E_\nu [GeV]$$

$$L [km]$$

Maksimum oscylacji dla

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

- obserwacje pojawiania się nowego rodzaju neutrin

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

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

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

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

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

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

Neutrinowe eksperymenty akceleratorowe

eksperyment	ośrodek/kraj	detektor	m[kt]	daty
Przeszłość				
K2K	KEK/Japonia	wodny (Super-K)	50	1999-2004
Teraźniejszość				
MiniBooNE	Fermilab/USA	ciekły scynt.	~1	2002-
MINOS	Fermilab/USA	scynt./żelazo	5.4	2005-
Przyszłość				
ICARUS	CERN	ciekły argon	~1	2006-
OPERA	CERN	emulsje/ołów	1.65	2006-
T2K	J-Parc/Jap.	wodny (Super-K)	50	2009-
NOvA	Fermilab/USA	ciekły scynt.	30	2010-
FLARE/?	Fermilab/USA/?	ciekły argon/wodny	50/?	?

Neutrinowe eksperymenty akceleratorowe

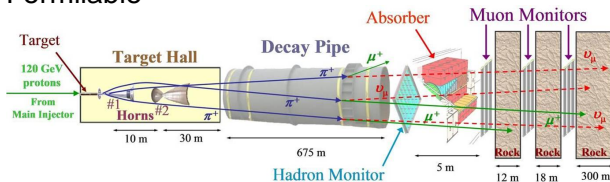
eksperyment	badany proces	L[km]	$\langle E_\nu \rangle$ [GeV]
Przeszłość			
K2K	$\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$	250	1
Terazniejszość			
MiniBooNE	$\nu_\mu \rightarrow \nu_e, \bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$	0.5	0.7
MINOS	$\nu_\mu \rightarrow \nu_{\mu,e}$	735	3
Przyszłość			
ICARUS	$(\nu_\mu \rightarrow \nu_{\tau,\mu,e})$	732	17
OPERA	$\nu_\mu \rightarrow \nu_{\tau,\mu,e}$	732	17
T2K	$\nu_\mu \rightarrow \nu_{e,\mu}$	295	0.76
NOvA	$\nu_\mu \rightarrow \nu_{e,\mu}$	810	2.22
FLARE/?	$\nu_\mu \rightarrow \nu_{e,\mu}$	820/?	2/?

STANDARDOWA WIAZKA NEUTRIN

WIĄZKA NEUTRIN

NA PRZYKŁADZIE WIĄZKI NuMI

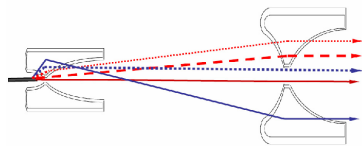
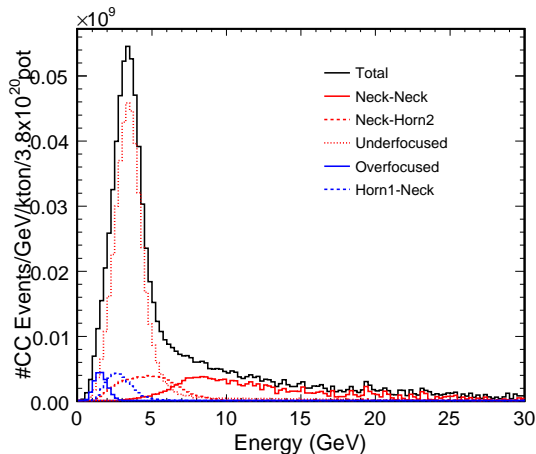
- Protony o energii 120 GeV z akceleratora Main Injector w Fermilabie



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

WIDMO NEUTRIN

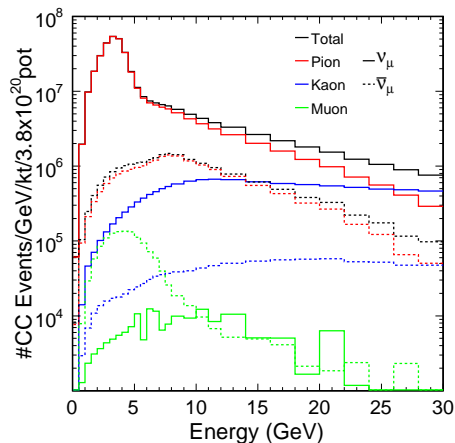
- Podstawowe źródło neutrin: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$
- Pięć podstawowych trajektorii mezonów, które przechodzą przez rogi magnetyczne
- Rysunek: wkład każdej kategorii do widma neutrin



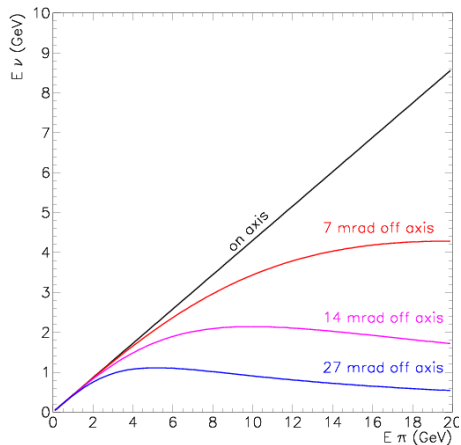
- Skład wiązki neutrin: głównie ν_μ , ale także $\bar{\nu}_\mu$
- Mały dodatek ($< \sim 1\%$) $\nu_e, \bar{\nu}_e$
z rozpadów kaonów i mionów
- Obecnie wartość strumienia neutrin w bliskim detektorze jest znana z dokładnością 15-20%
- Względny stosunek strumienia w bliskim i dalekim detektorze znany jest z dokładnością 2-10%

SKŁADOWE WIDMA NEUTRIN

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

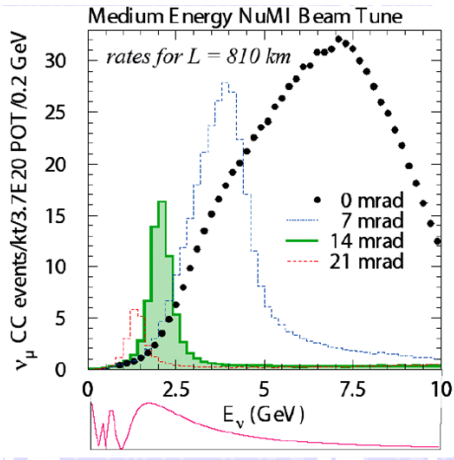


ODCHODZĄC OD OSI WIĄZKI ... cz. 1



- Dla małych kątów, E_ν bardzo słabo zależy od energii pionu
$$E_\nu = 0.43 E_\pi / (1 + \gamma^2 \theta^2)$$
 θ to kąt pomiędzy kierunkiem lotu pionu a neutrina
- Widmo off-axis węższe
- Mniej wysokoenergetycznych neutrin

ODCHODZĄC OD OSI WIĄZKI ... cz. 2



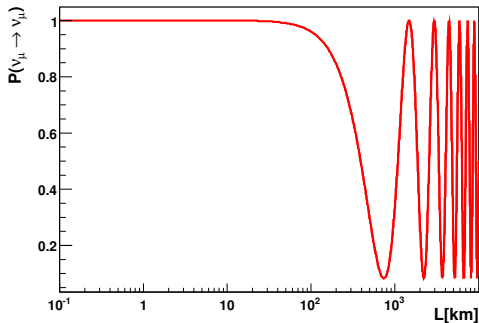
M.Messier Neutrino 2004

- Widmo neutrin można przesunąć do położenia, które odpowiada maksimum oscylacji
- Energia wiązki głównie zdeterminowana przez kąt θ (pozycja detektora względem osi wiązki)

DETEKTORY

POŁOŻENIE DETEKTORÓW

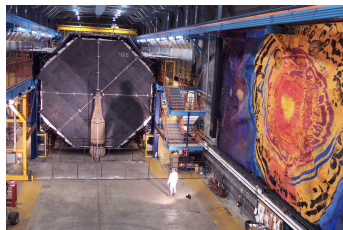
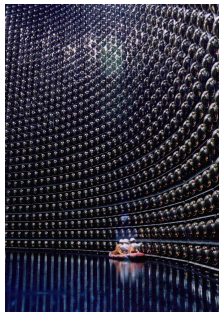
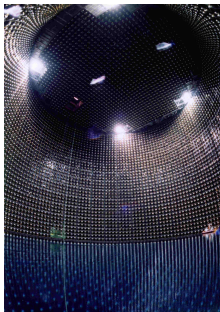
- Duży, **daleki** detektor → poszukiwanie oscylacji
- Mały, **bliski** detektor → widmo energii niezakłócone przez oscylacje



↑
Bliski detektor

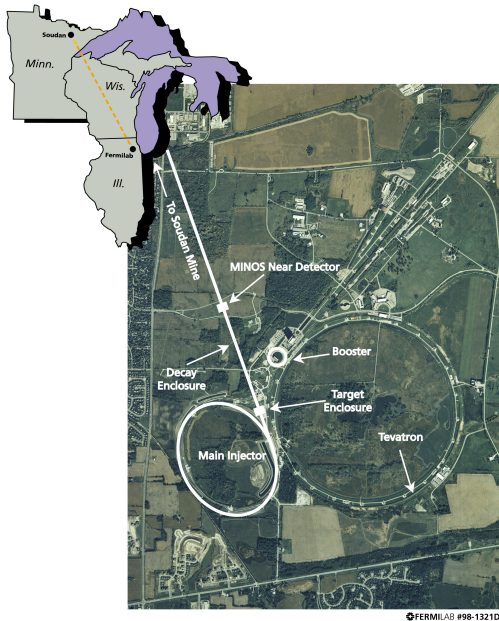
↑ Daleki detektor

DETEKTORY



EKSPERYMENT MINOS

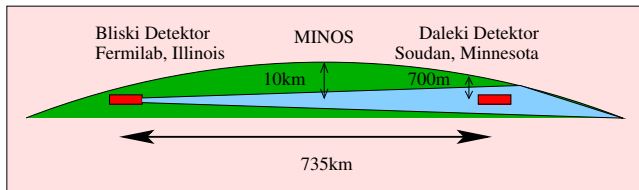
MINOS: PIERWSZY UŻYTKOWNIK WIĄZKI NuMI



SOUDAN



MINOS: PIERWSZY UŻYTKOWNIK WIĄZKI NuMI



- Drugi w historii i jedyny obecnie zbierający dane eksperyment z długą bazą
- Detektory umieszczona w osi wiązki NuMI
- Bliski Detektor (ND) (1kt) w ośrodku Fermilab pod Chicago
- Daleki Detektor (FD) (5.4 kt) znajduje się 735km dalej w kopalni Soudan, w Minnesocie
- **Pierwsze oddziaływanie neutrina z wiązką w dalekim detektorze: 7 marzec 2005**

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

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

- Przedstawienie prawdopodobieństwa zanikania ν_μ z wiązki w funkcji energii
 - potwierdzenie, że oscylacje opisują dane
 - wykluczenie na wysokim poziomie ufności innych modeli lub ...
- Precyzyjne pomiary parametrów oscylacji Δm_{23}^2 (z precyzją lepszą niż 10 %) i $\sin^2(2\theta_{23})$

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

$$\nu_e N \rightarrow e X$$

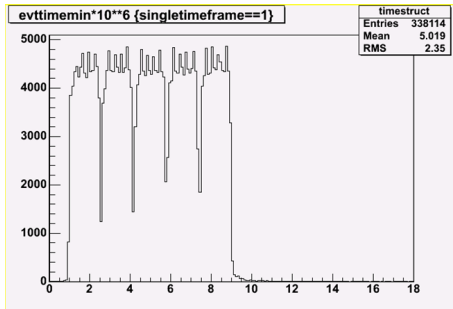
- Poszukiwania oscylacji $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$
Możliwość pierwszego wykazania niezerowej wartości θ_{13} !

również

- Pierwszy, bezpośredni pomiar oscylacji ν vs $\bar{\nu}$
poprzez badanie neutrin atmosferycznych !
(Pierwszy, namagnetyzowany podziemny detektor)

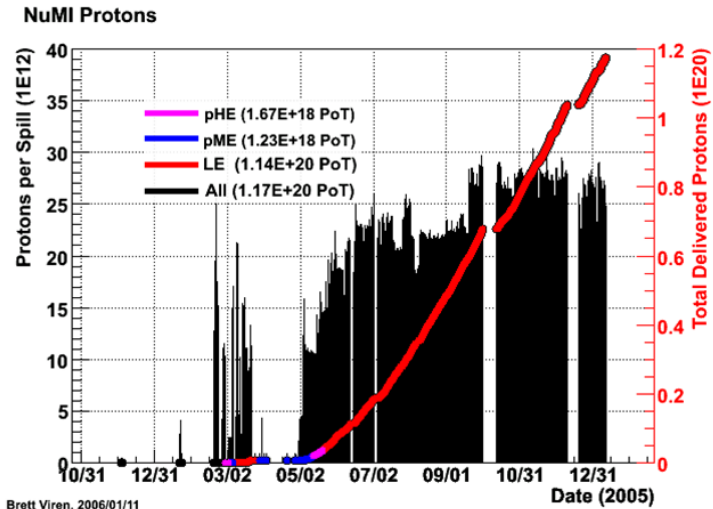
WIĄZKA PIERWOTNA - PROTONY

- Pierwotna wiązka protonów: wysyłana w 5-6 paczkach, w czasie 8-10 μs
- 2.5×10^{13} protonów/puls co 2.2s



WIĄZKA PIERWOTNA - PROTONY

LICZBA DOSTARCZONYCH PROTONÓW

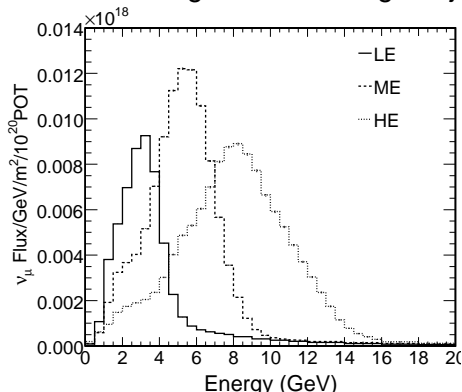


Już zebrane więcej danych niż w czasie całego działania K2K !

WIĄZKA WTÓRNA - NEUTRINA

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

Dane zbierane głównie z konfiguracją niskoenergetyczną (LE).

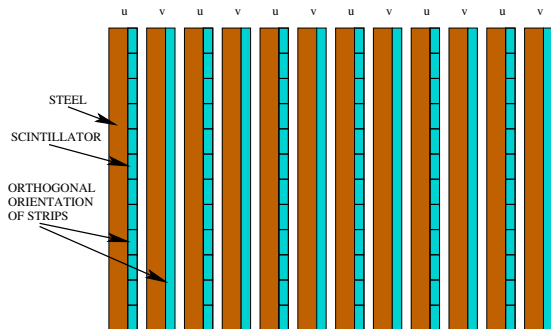


Dla 2.5×10^{20} protonów/rok, w przypadku braku oscylacji w Dalekim Detektorze oczekuje się około 1300 przypadków.

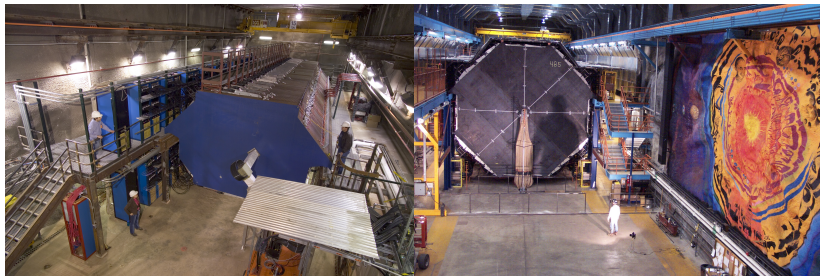
MINOS: BLISKI I DALEKI DETEKTOR

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



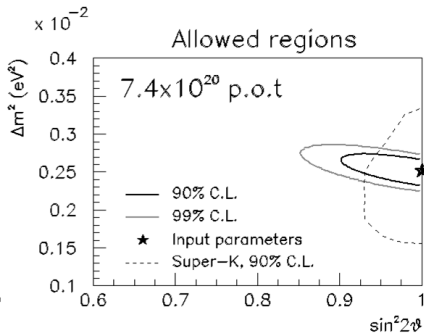
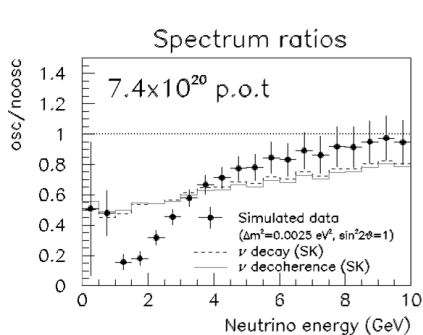
MINOS: BLISKI I DALEKI DETEKTOR



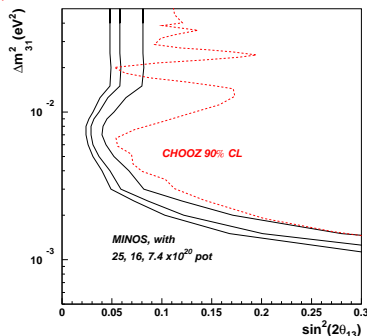
- Bliski detektor: 1kt, 282 płaszczyzny, 3.8m wysokości
- Daleki detektor: 5.4kt, 485 płaszczyzn, 8m wysokości

MINOS: PRECYZYJNE POMIARY

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



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



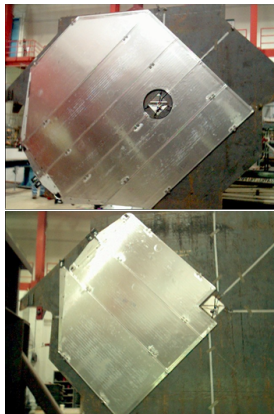
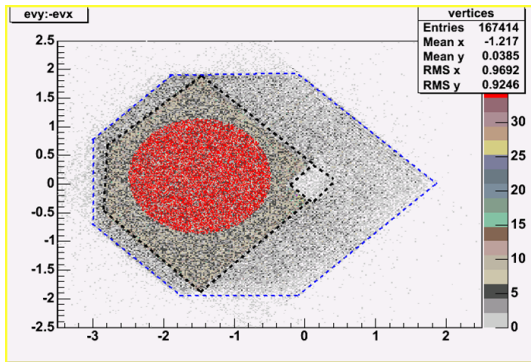
Poszukiwania ν_e w wiązce ν_μ :

możliwość znalezienia pierwszego niezerowego sygnału.

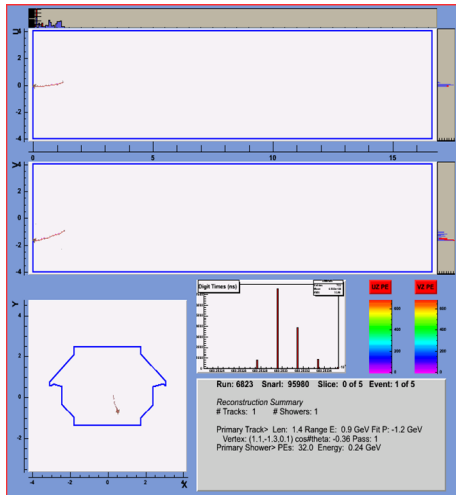
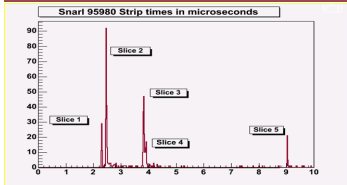
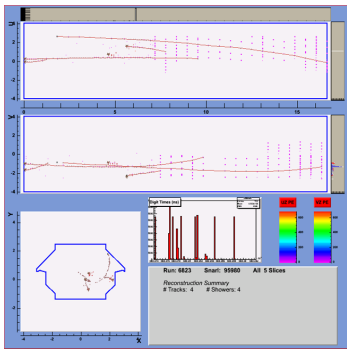
- Zabezpieczenie się przed nieumyślnym naginaniem wyników do oczekiwanego (zgodnego z wynikiem Super-Kamiokande)
- Wszystkie dane z Bliskiego Detektora są dostępne
- Część danych z Dalekiego Detektora ukryta (zgodnie z nieznaną funkcją długości przypadku i energii zdeponowanej w detektorze)
- Przed otwarciem *puszki* wszystkie procedury dotyczące analizy danych muszą zostać zamrożone
- **Otwarcie *puszki* w ten weekend !**

DANE Z BLISKIEGO DETEKTORA

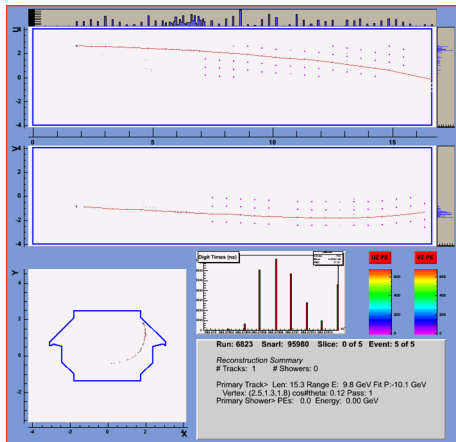
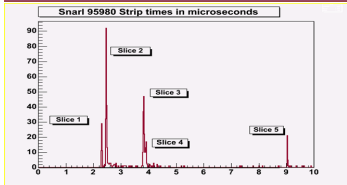
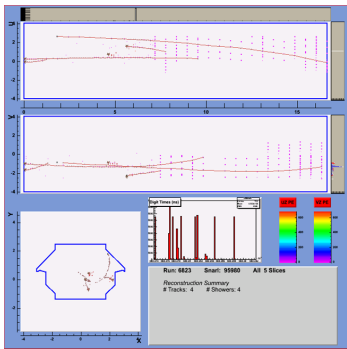
- W bliskim detektorze bardzo duża statystyka: po cięciach czyszczących około 1 mln ν dla 1×10^{20} pot
- Widoczne detale budowy detektora



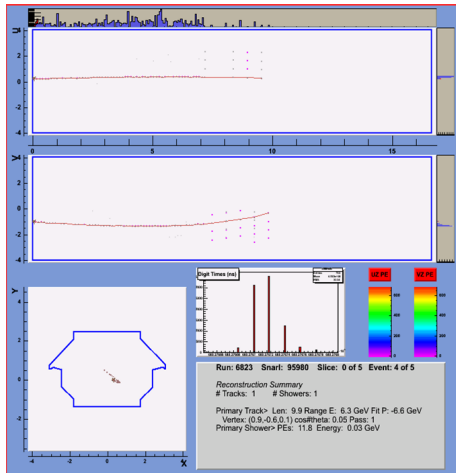
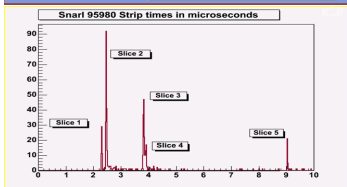
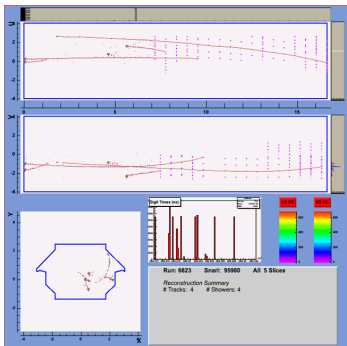
ODDZIAŁYWANIA W BLISKIM DETEKTORZE



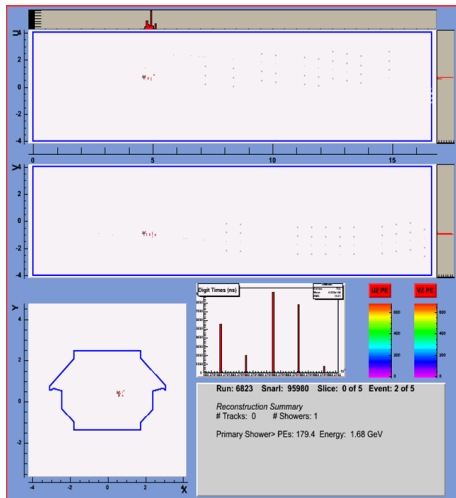
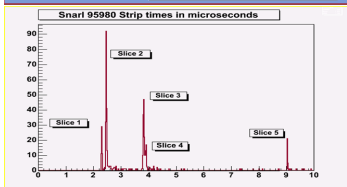
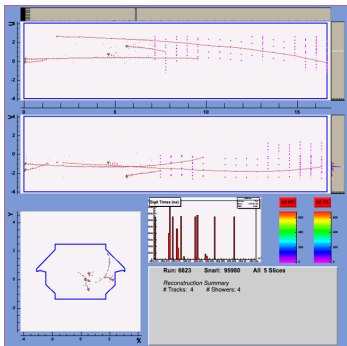
ODDZIAŁYWANIA W BLISKIM DETEKTORZE



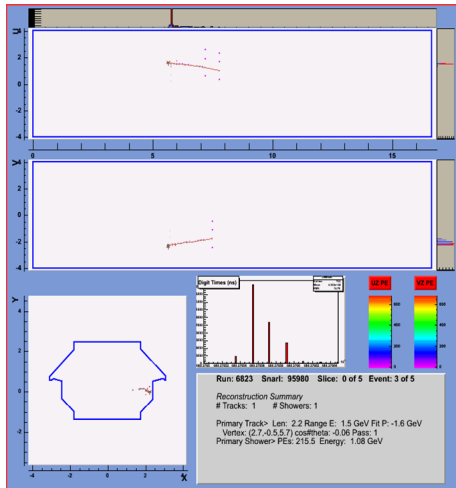
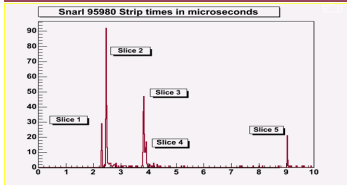
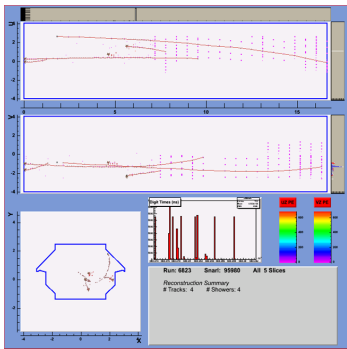
ODDZIAŁYWANIA W BLISKIM DETEKTORZE



ODDZIAŁYWANIA W BLISKIM DETEKTORZE

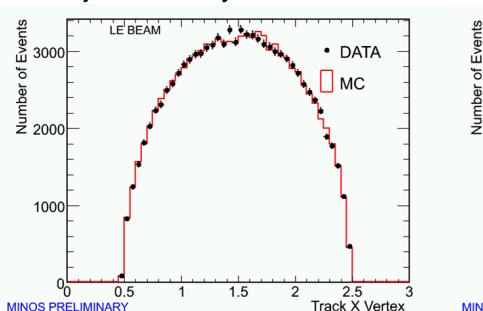
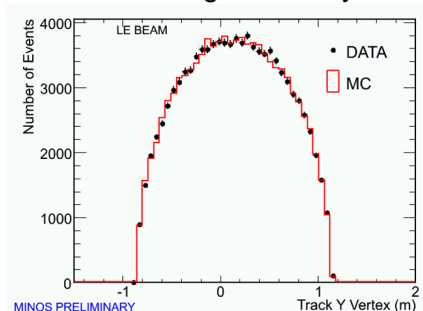


ODDZIAŁYWANIA W BLISKIM DETEKTORZE



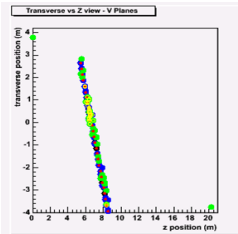
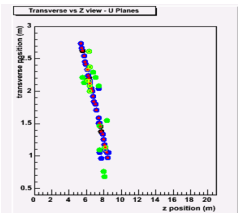
DANE Z BLISKIEGO DETEKTORA

Bardzo dobra zgodność wyników symulacji MC i danych.

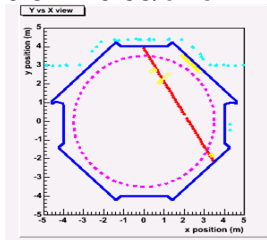


TYPOWE ODDZIAŁYWANIE W DALEKIM DETEKTORZE

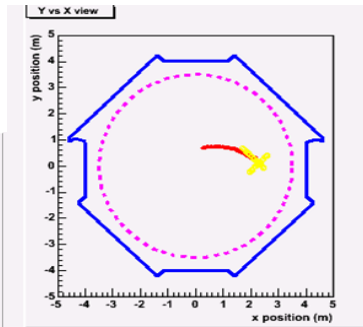
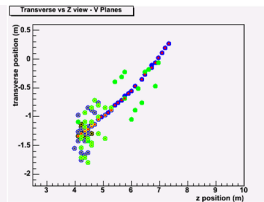
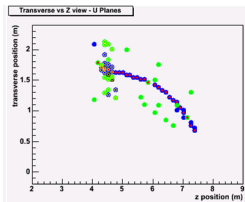
NIE Z WIĄZKI



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

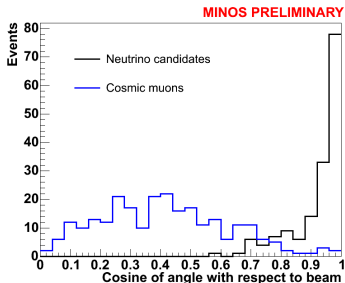
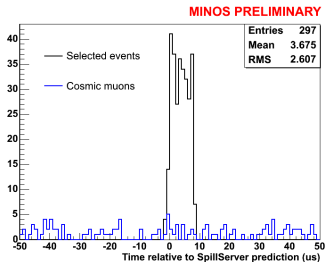


ODDZIAŁYWANIE NEUTRINA Z WIĄZKI



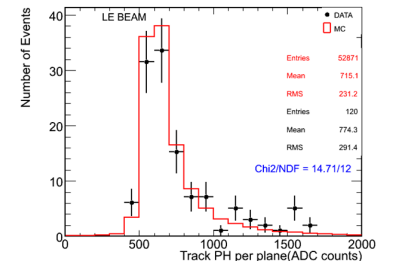
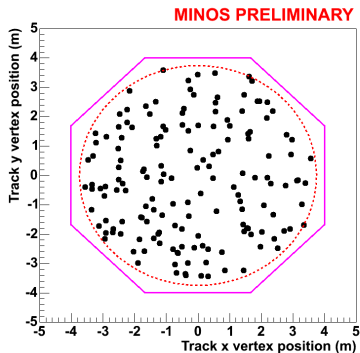
DANE Z DALEKIEGO DETEKTORA

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



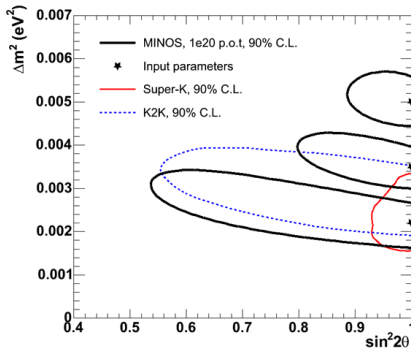
DANE Z DALEKIEGO DETEKTORA

Rozkład wierzchołków oddziaływań neutronów z wiązki w dalekim detektorze. Porównanie MC i danych. Równie dobra zgodność jak dla Bliskiego Detektora.

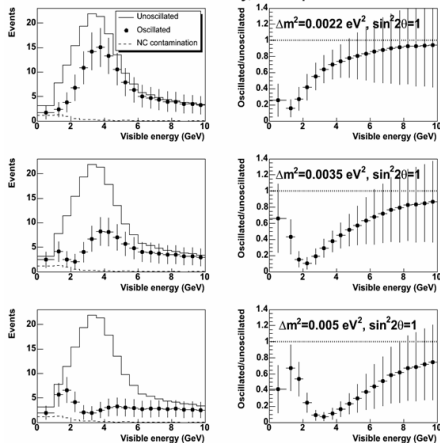


MINOS: OCZEKIWANE WYNIKI ANALIZY PIERWSZEJ PRÓBKI DANYCH DLA 1×10^{20} pot

MINOS sensitivity, $\Delta m^2=0.0022, 0.0035, 0.005 \text{ eV}^2$, $\sin^2 2\theta=1$



MINOS sensitivity, 1×10^{20} p.o.t.



$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_{e,\tau,\nu})$$

- Pierwsza obserwacja składowej ν_τ w wiązce ν_μ poprzez identyfikację oddziaływań z produkcją i rozpadem τ
- Pomiar albo ustanowienie ciasnego limitu na $\sin^2(2\theta_{13})$
- Ustalenie hierarchii mas (wykorzystując zmianę prawdopodobieństwa oscylacji związaną z wpływem materii)
- Precyzyjny pomiar Δm_{23}^2 i $\sin^2(2\theta_{23})$
- Wkład do studiów nad łamaniem CP w sektorze leptonowym (Proton Driver)

JAK OSIĄGNAĆ POWYŻSZE CELE ?

POSZUKIWANIE $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$

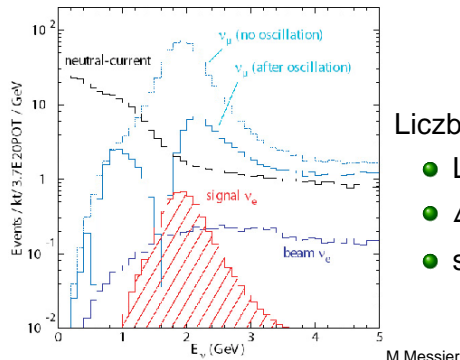
- 1) Energia wiązki wystarczająco wysoka, aby umożliwić powstanie leptonu τ
- 2) Bardzo dobra rozdzielczość przestrzenna: detektor wypełniony ciekłym argonem (ICARUS) lub emulsje fotograficzne przełożone ołowiem (OPERA)
- 3) Duża masa detektora

JAK OSIĄGNIĘ SIĘ POWYŻSZE CELE

POSZUKIWANIE $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$

- 1) Detektor umieszczony poza osią wiązki (off-axis) aby dopasować się do maksimum oscylacji i zredukować tło, które ma zwykle znacznie szersze spektrum niż sygnał

Rozkład liczby przypadków poza (off-axis) wiązką NuMI:



Liczby przypadków dla:

- $L = 810 \text{ km}$, $T = 12 \text{ km}$
- $\Delta m_{23}^2 = 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$
- $\sin^2 2\theta_{23} = 1$, $\sin^2 2\theta_{13} = 0.01$

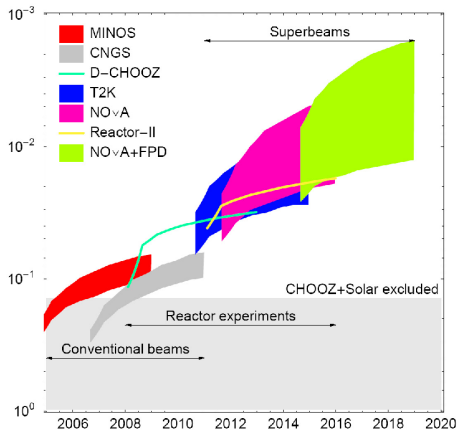
JAK OSIĄGNIĘ SIĘ POWYŻSZE CELE

POSZUKIWANIE $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ cd

- 2) Zwiększenie masy detektora
 - rozważane rozmiary: 50 kt, 30 kt, 100kt
- 3) Wymagania dla detektora:
 - 1) dobra zdolność rozdzielcza (żeby zredukować tło od składowej ν_e wiązki)
 - 2) bardzo dobra rozdzielczość e/π^0 (żeby zredukować tło)
 - Detektor wodny (Super-K)
 - Ciekły scyntylator + PCV (NOvA)
 - Ciekły argon (FLARE ...)

MOŻLIWOŚĆI POMIARU $\sin^2 2\theta_{13}$

W PRZYSZŁYCH I OBECNYCH EKSPERYMENTACH AKCELERATOROWYCH I REAKTOROWYCH



- Eksperyment MINOS - jedyny eksperyment akceleratorowy z długą bazą dostarczający obecnie nowych danych
- Analiza pierwszego zbioru danych ($\sim 1 \times 10^{20}$ pot) jest prowadzona jako *blind analysis*: otwarcie *puszki* w ten weekend !
- Dziedzina ciesząca się bardzo dużym zainteresowaniem: w najbliższych kilku latach oczekiwane cztery nowe eksperymenty, a wiele innych jest planowanych