



Pierwsze dane z T2K

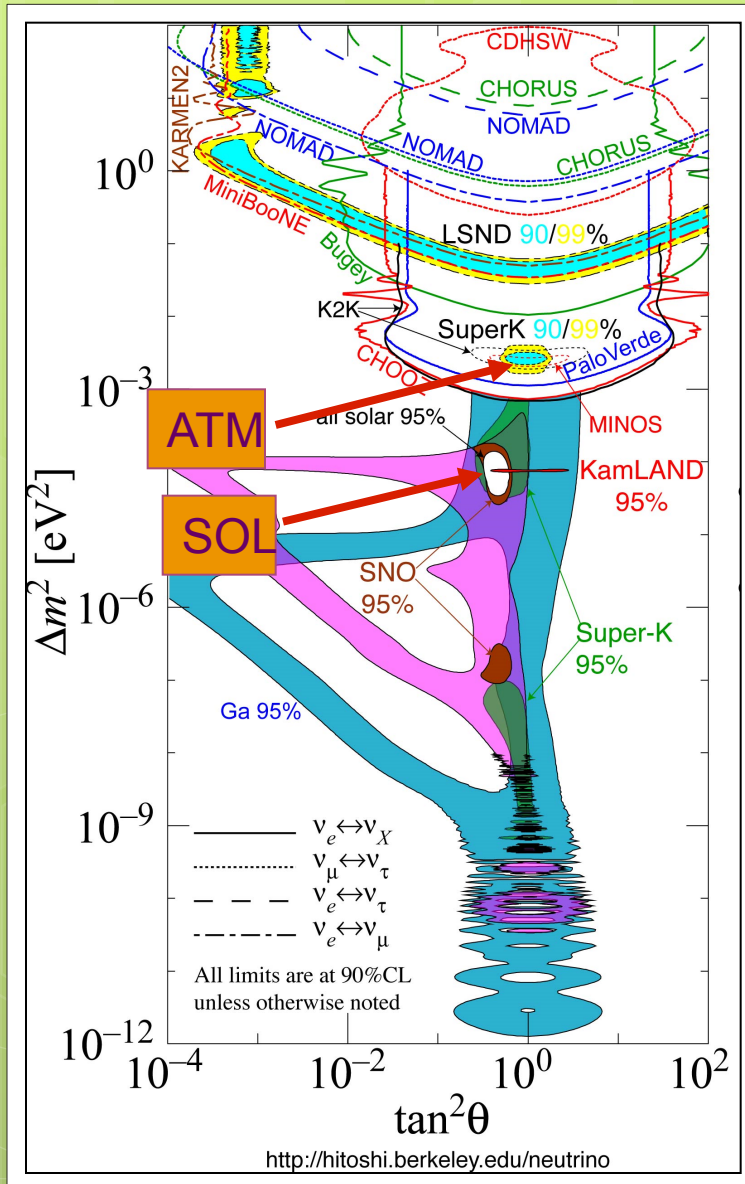
Paweł Przewłocki
Warszawska Grupa Neutrinowa
Instytut Problemów Jądrowych

18.02.2011

O czym będę mówił



- Oscylacje neutrin
- Eksperyment T2K i związana z nim fizyka neutrin
 - Układ eksperymentu
 - Jaka pomiary nas interesują?
 - Detektory i pierwsze zebrane przy ich pomocy dane
- Strategia analizy
- Czego spodziewamy się w najbliższych tygodniach



Wyniki dotychczasowych eksperymentów oscylacyjnych

- Przy założeniu oscylacji dwuzapachowych mamy dwa tzw. parametry oscylacji: kąt mieszania, kwadrat różnicy mas

$$\begin{pmatrix} \nu_x \\ \nu_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

$$P(\nu_x \rightarrow \nu_y) = \sin^2(2\theta) \sin^2\left(1.27 \frac{\Delta m^2 L}{E}\right)$$

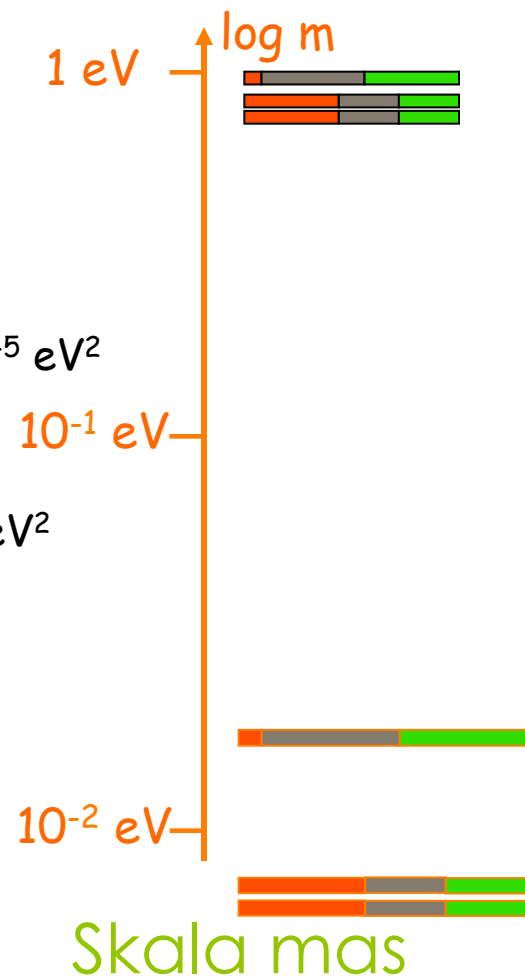
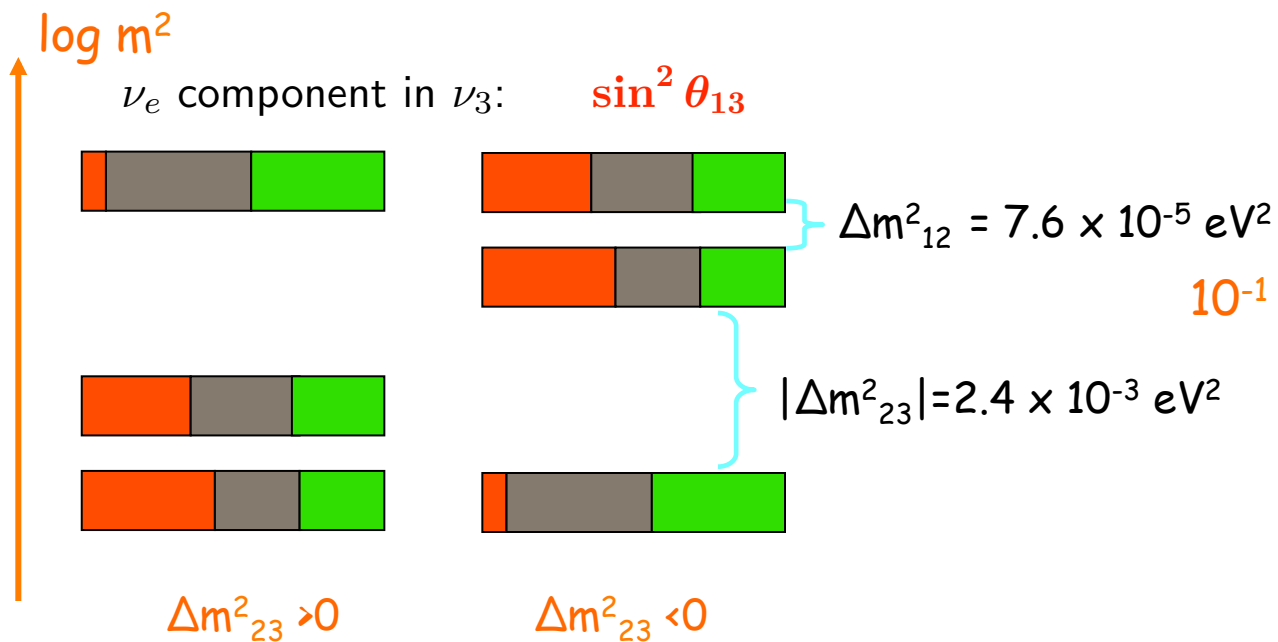
Dwa zestawy rezultatów:
'atmosferyczne' (małe L/E) i 'słoneczne' (duże L/E)



oscyłują 3 zapachy

Masy neutrin

$$40 \text{ meV} < \sum_{i=1}^3 m_i < 2 \text{ eV}$$



Hierarchia mas

Oscylacje neutrin

ZAPACH

MASA

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_{23} & \sin\theta_{23} \\ 0 & -\sin\theta_{23} & \cos\theta_{23} \end{pmatrix}}_{\text{„atmosferyczne”}} \underbrace{\begin{pmatrix} \cos\theta_{13} & 0 & \sin\theta_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_{13}e^{-i\delta} & 0 & \cos\theta_{13} \end{pmatrix}}_{\text{CHOOZ}} \underbrace{\begin{pmatrix} \cos\theta_{12} & \sin\theta_{12} & 0 \\ \sin\theta_{12} & \cos\theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\text{„słoneczne”}} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

**„atmosferyczne”
SK, K2K, MINOS**

CHOOZ

**„słoneczne”
SNO, KamLand**

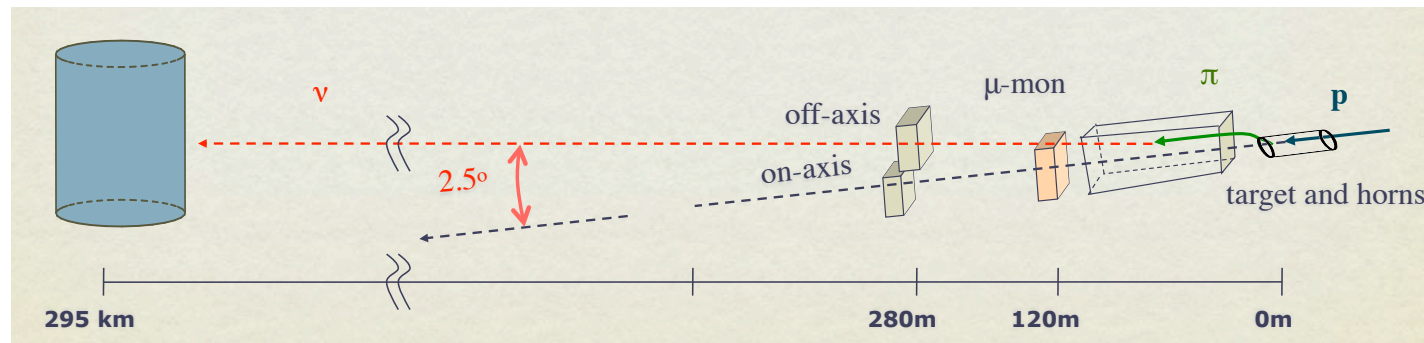
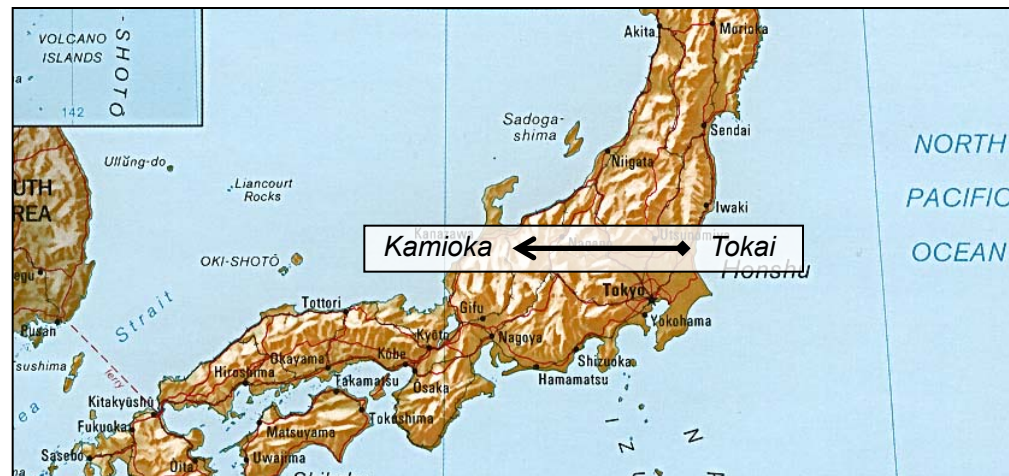
parameter	best fit	2σ	3σ
$\Delta m_{21}^2 [10^{-5} \text{eV}^2]$	$7.59^{+0.23}_{-0.18}$	7.22–8.03	7.03–8.27
$ \Delta m_{31}^2 [10^{-3} \text{eV}^2]$	$2.40^{+0.12}_{-0.11}$	2.18–2.64	2.07–2.75
$\sin^2 \theta_{12}$	$0.318^{+0.019}_{-0.016}$	0.29–0.36	0.27–0.38
$\sin^2 \theta_{23}$	$0.50^{+0.07}_{-0.06}$	0.39–0.63	0.36–0.67
$\sin^2 \theta_{13}$	$0.013^{+0.013}_{-0.009}$	≤ 0.039	≤ 0.053

Table A1. Current update of Tab. 1: Best-fit values with 1σ errors, and 2σ and 3σ intervals (1 d.o.f.) for the three-flavour neutrino oscillation parameters from global data including solar, atmospheric, reactor (KamLAND and CHOOZ) and accelerator (K2K and MINOS) experiments.

Nowa faza w rozwoju fizyki neutrin

- I etap
 - zwiększenie precyzji pomiarów uprzednio zmierzonych parametrów oscylacji
 - Pomiar θ_{13}
- II etap
 - Zbadanie symetrii CP w sektorze neutrinowym (potrzebny pomiar θ_{13})
- Realizacja celów – 2 podejścia
 - Eksperymenty reaktorowe (Double Chooz – Francja, Daya Bay – Chiny) – wyznaczenie θ_{13} gdy odpowiednio duże
 - Silne wiązki akceleratorowe (T2K – Japonia, Nova – USA) – niskie wartości θ_{13} , możliwość badania hierarchii mas (efekty materii) i CP

Experiment T2K (Tokai2Kamioka)



The T2K Collaboration

~500 members, 61 Institutions, 12 countries

Canada

TRIUMF
Univ. Alberta
Univ. Brit. Columbia
Univ. Regina
Univ. Toronto
Univ. Victoria
York Univ.

France

CEA Saclay
IPN Lyon
LLR E. Poly.
LPNHE Paris

Germany

Univ. Aachen

Italy

INFN, Univ. Rome
INFN, Univ. Naples
INFN, Univ. Padua
INFN, Univ. Bari

Japan

ICRR Kamioka
ICRR RCCN
KEK
Kobe Univ.
Kyoto Univ.
Miyagi Univ. of Educ.
Osaka City Univ.
Univ. Tokyo

Poland

Soltan Inst., Warsaw
Niewodniczanski Inst., Cracow
Technical Univ. Warsaw
Univ. Silesia, Katowice
Univ. Warsaw
Univ. Wrocław

Russia

INR

S. Korea

N. Univ. Chonnam
Univ. Dongshin
Univ. Sejong
N. Univ. Seoul
Univ. Sungkyunkwan

Spain

IFIC, Valencia
Univ. A. Barcelona

Switzerland

Univ. Bern
Univ. Geneva
ETH Zurich

United Kingdom

Imperial C. London
Queen Mary Univ. L.
Lancaster Univ.
Liverpool Univ.
Oxford Univ.
Sheffield Univ.
Warwick Univ.

STFC/RAL
STFC/Daresbury

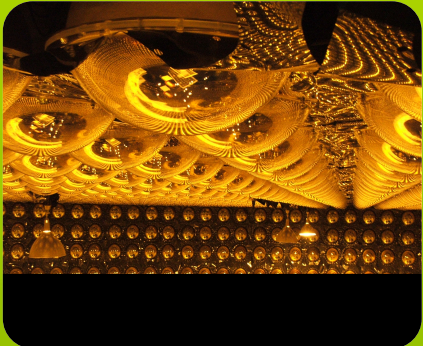
USA

Boston Univ.
BNL
Colorado St. Univ.
Duke Univ.
Louisiana St. Univ.
SUNY-Stony Brook
U. C. Irvine
Univ. Colorado
Univ. Pittsburgh
Univ. Rochester
Univ. Washington

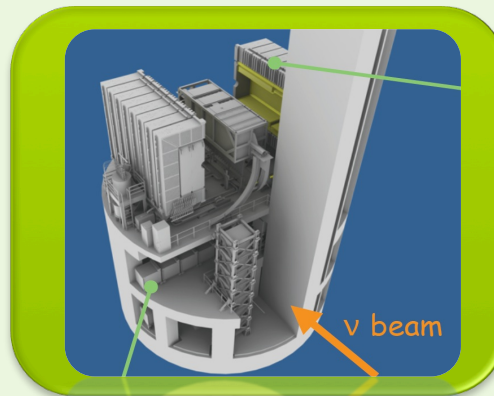


T2K

(schemat eksperymentu)



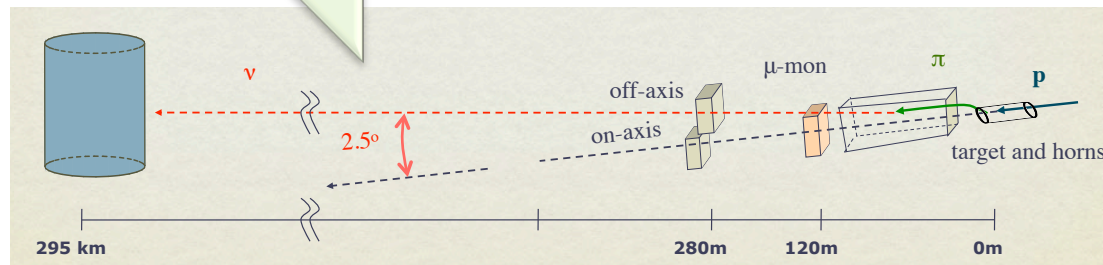
Super-Kamiokande



ND280

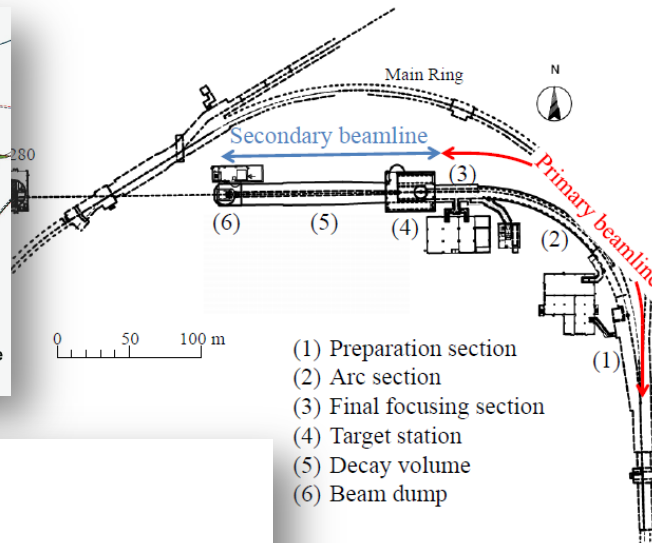
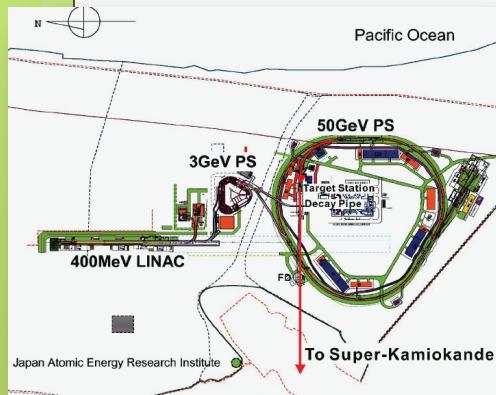


J-PARC

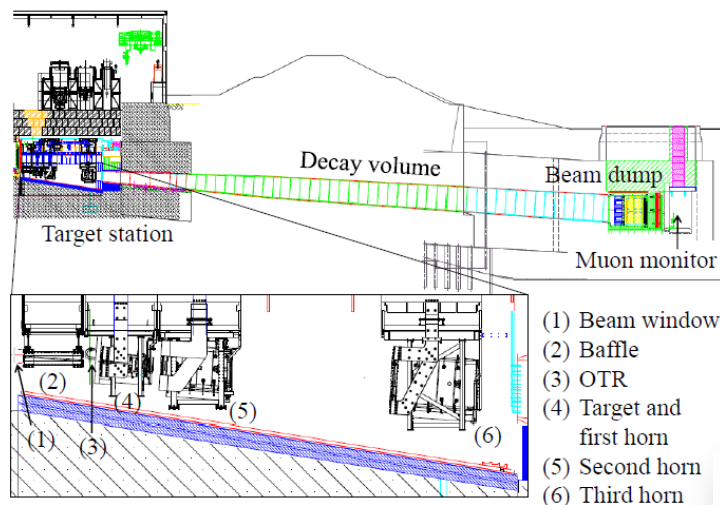


Akcelerator w J-PARC

Beam power	750 kW
Beam kinetic energy	30 GeV
Beam intensity	3.3×10^{14} p/spill
Spill cycle	~0.3 Hz
Number of bunches	8/spill
Bunch interval	581 ns
Bunch width	58 ns

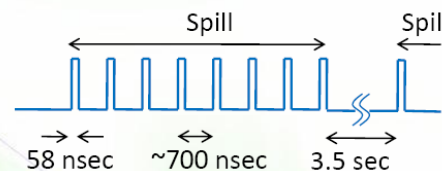


- (1) Preparation section
- (2) Arc section
- (3) Final focusing section
- (4) Target station
- (5) Decay volume
- (6) Beam dump



- (1) Beam window
- (2) Baffle
- (3) OTR
- (4) Target and first horn
- (5) Second horn
- (6) Third horn

the T2K neutrino beam line.

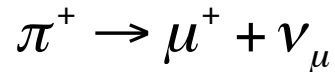


- Budowa: 2004-2009
- Przyspieszanie: LINAC, RCS (3GeV), główny pierścień (30GeV)
- 6 pakietów (bunches) na impuls wiązki (spill), od jesieni 2010 – 8
- Tarcza grafitowa (91 cm dł.)
- 3 rożki magnetyczne @ 250kA (320kA od jesieni 2010)
- Rura rozpadowa wypełniona helem (96m)
- Na końcu rury rozpadowej - absorber hadronów i monitor mionów (mierzy kierunek i intensywność mionów)
- 280m od źródła wiązki – kompleks bliskich detektorów

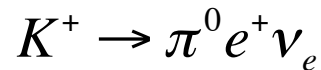
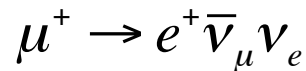
Figure 5: Side view of the secondary beamline.

Pozaosiowość

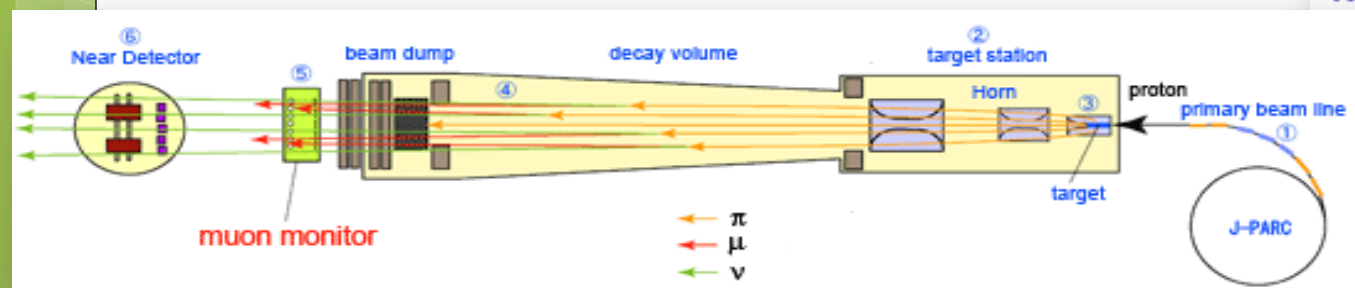
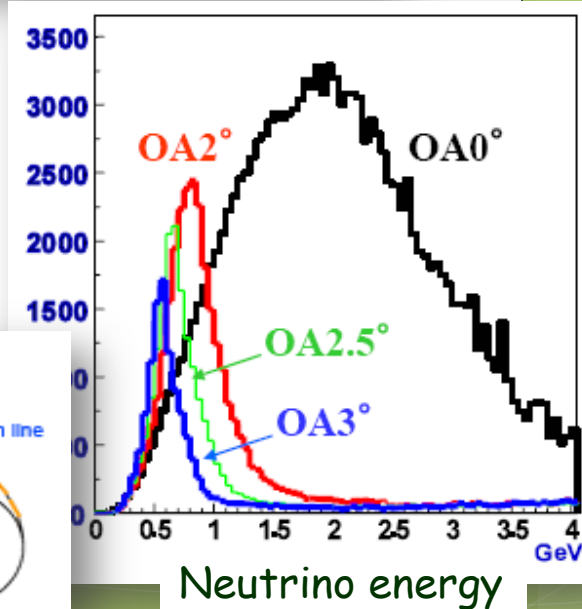
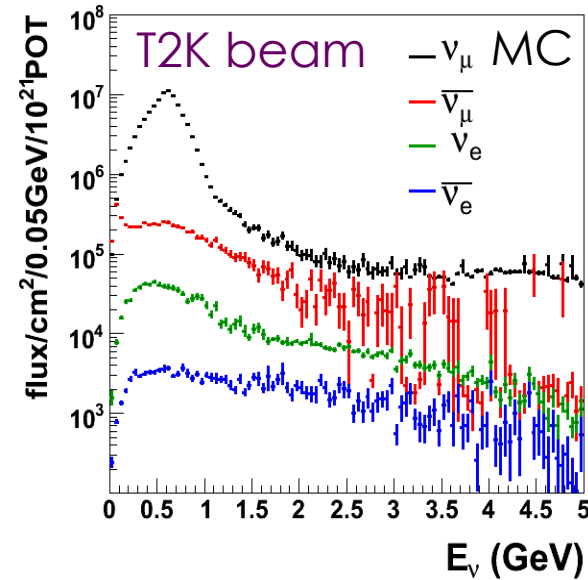
- Wiązka protonowa uderza w tarczę. Produkowane są hadrony, głównie piony
- Piony się rozpadają:



- Zanieczyszczenie wiązki:



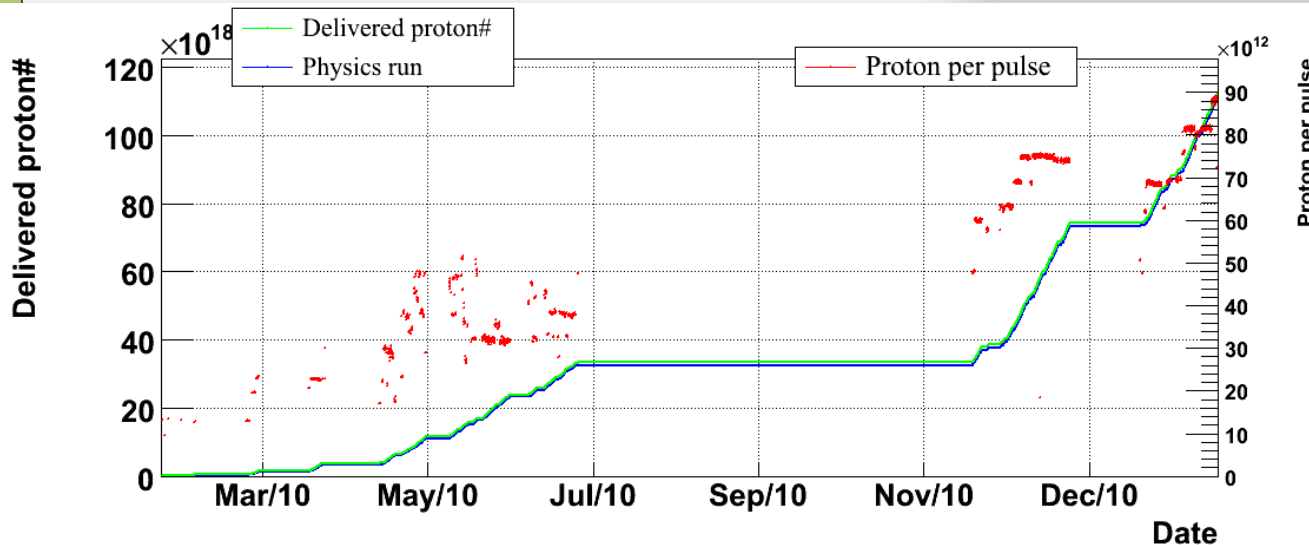
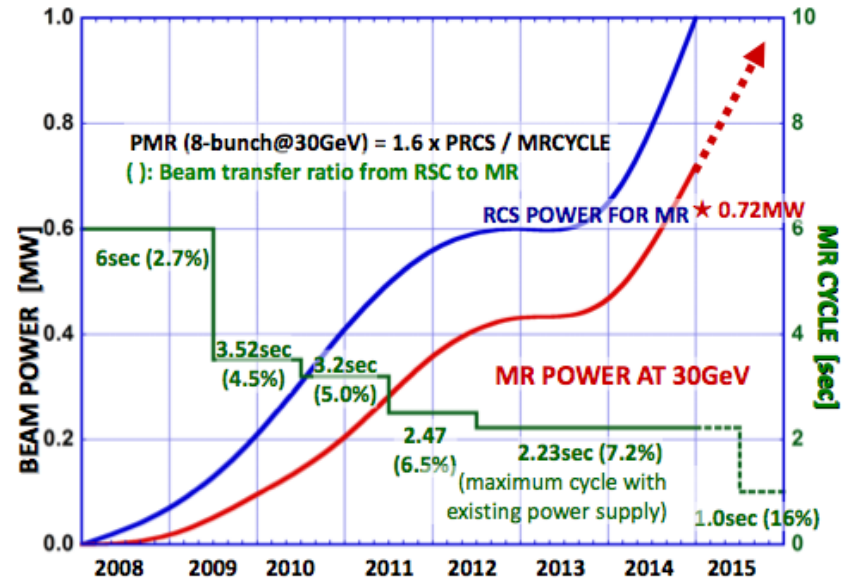
- Detektory są ustawione poza osią wiązki aby dostać korzystny kształt widma



Wiązka protonowa – stan obecny i plany

Wiązka w roku 2010

(Bieżąca moc wiązki: 125kW)



Plany na przyszłość

8.02.2011 –
10²⁰ POT!

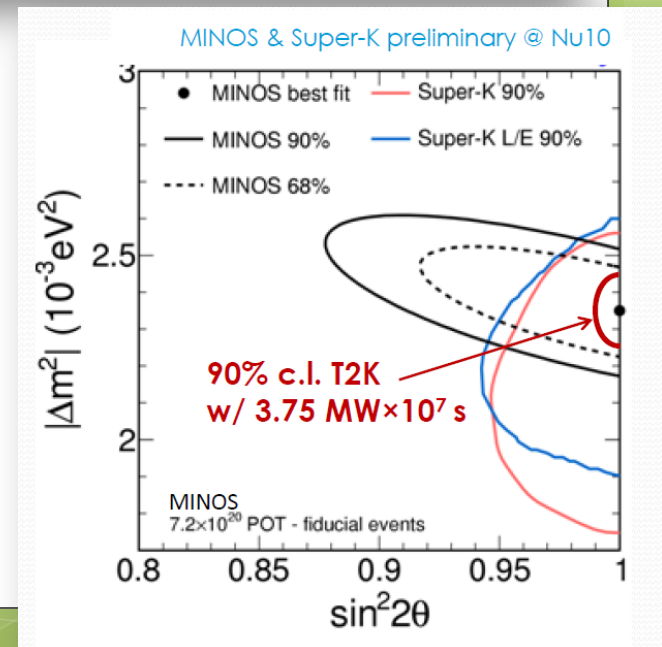
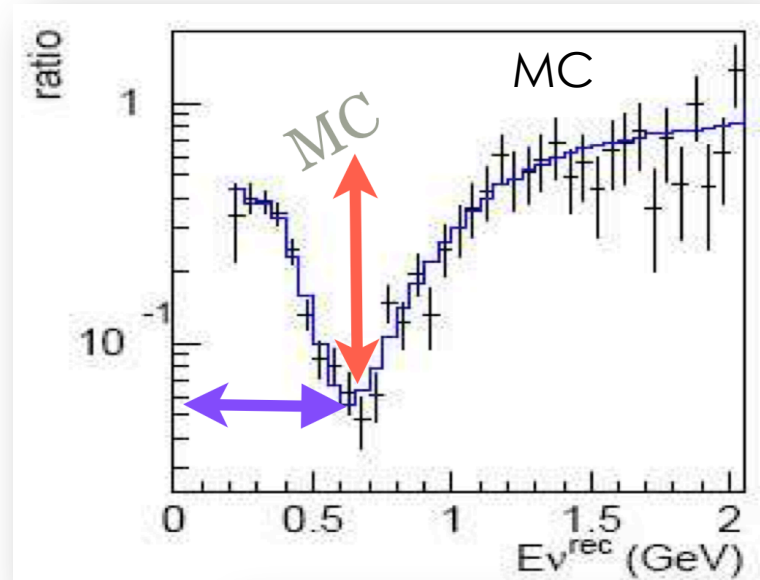
Beam group,
Masahiro Shibata

Główne pomiary: Obserwacja zanikania $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$

- Znikanie neutrin mionowych – precyzyjny pomiar θ_{23} i Δm_{23}^2
 - Pomiar przez porównanie strumienia zaobserwowanego (@SK) do wyemitowanego (@ND280) w funkcji energii

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 -$$

$$\frac{\sin^2 2\theta_{23} \cos^4 \theta_{13} \sin^2(1.27 \Delta m_{23}^2 L / E)}{-P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)}$$



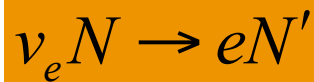
Główne pomiary: Obserwacja transformacji $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$

- Obserwacja $\nu_\mu \rightarrow \nu_e \Rightarrow \theta_{13} > 0$

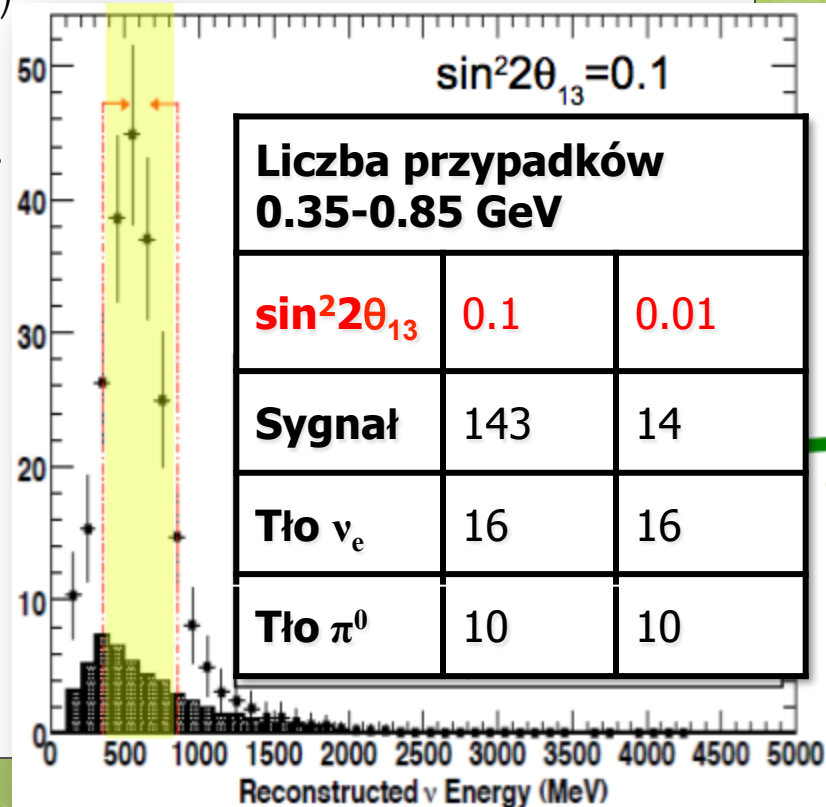
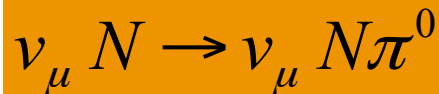
- Szukamy elektronów z reakcji $\nu_e N \rightarrow e N'$

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{23} \sin^2(1.27 \Delta m_{23}^2 L / E)$$

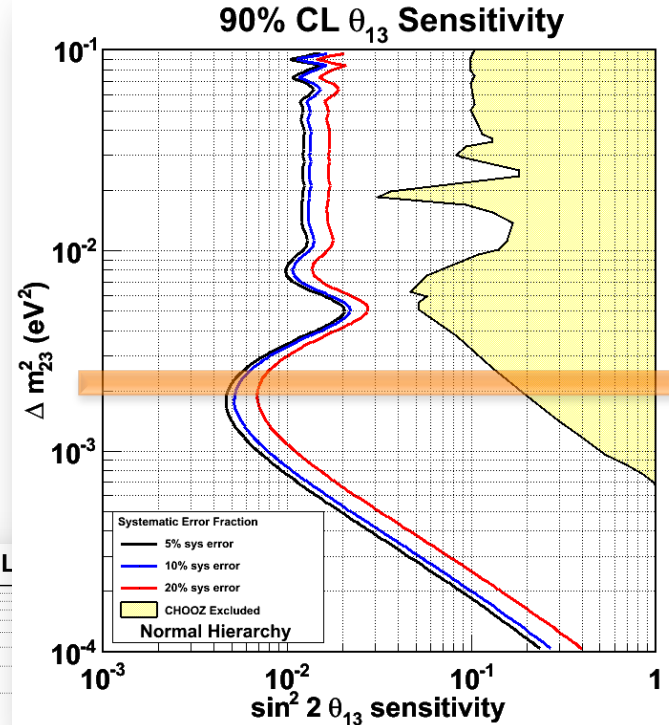
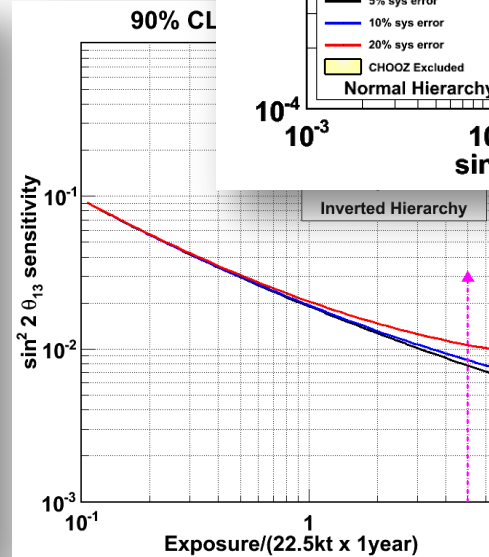
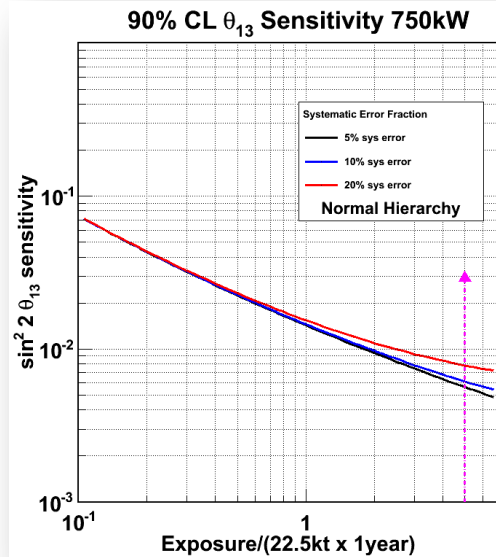
- Tło #1 – zanieczyszczenie wiązki neutronami elektronowymi (~1%, 0.2% w maksimum wiązki)



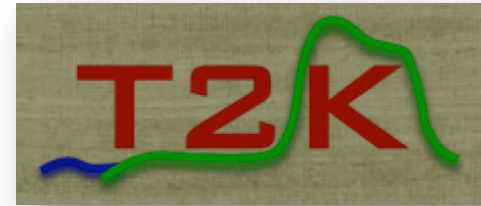
- Tło #2 – tło z oddziaływań neutron mionowych



Czułość eksperymentu T2K na θ_{13}



Strategia analizy



- Przewidywanie strumienia i widma wiązki

- Symulacja *jnubeam*
 - symulacja za pomocą modeli odzwierciedlających wcześniejsze dane
 - Dane o produkcji hadronów z NA61/SHINE



Far To Near Ratio

Weryfikacja przewidywań MC wiązki

Ekstrapolacja do SK przy użyciu Far To Near Ratio uzyskanego z MC wiązki – uzyskanie spodziewanej liczby przypadków, zależności od energii

- Pomiary w ND280

- Poznanie własności oddziaływań neutrin (przekroje czynne, pomiary ekskluzywne w różnych kanałach)
- Pomiar strumienia i widma wiązki



Porównanie z przewidywaniami -> dopasowanie danych, uzyskanie parametrów oscylacji

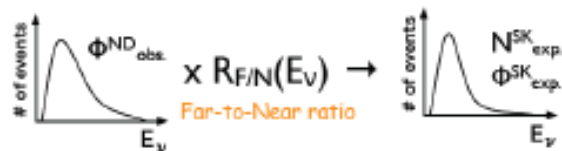
- Pomiary w detektorze dalekim

- Pomiar liczby przypadków/spektrum

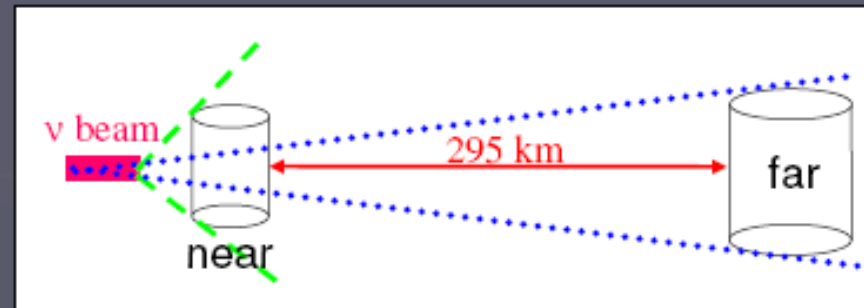


Far to near ratio

- ▶ ν spectrum at far side is different even without oscillations; effect of non-point like source
- ▶ **Near and far detectors see different solid angles:**
 - far detector point like source at 2.5°
 - near detector extended source from 1° to 3° (wide off-axis range)
- ▶ details of ν hadron production kinematics are needed in order to predict ν flux correctly

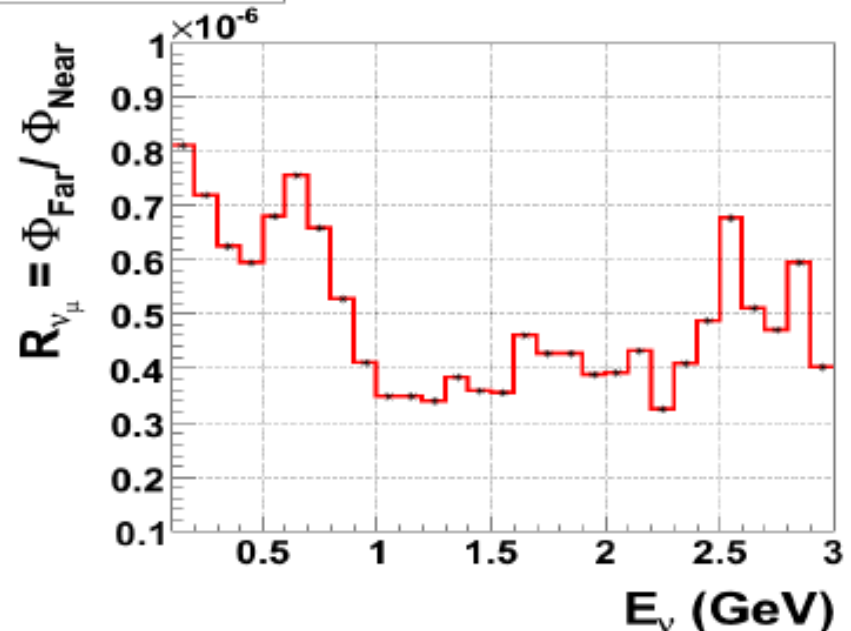


$$R_{F/N}(E_\nu) = \frac{\Phi^{\text{SK}}(E_\nu)}{\Phi^{\text{ND}}(E_\nu)} \Big|_{\text{hadron-production distribution}}$$



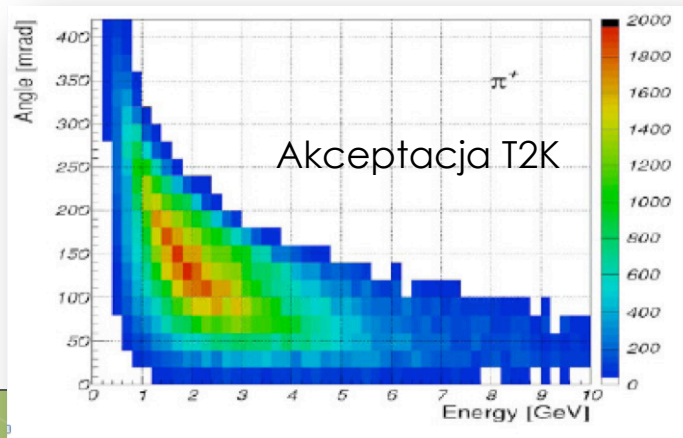
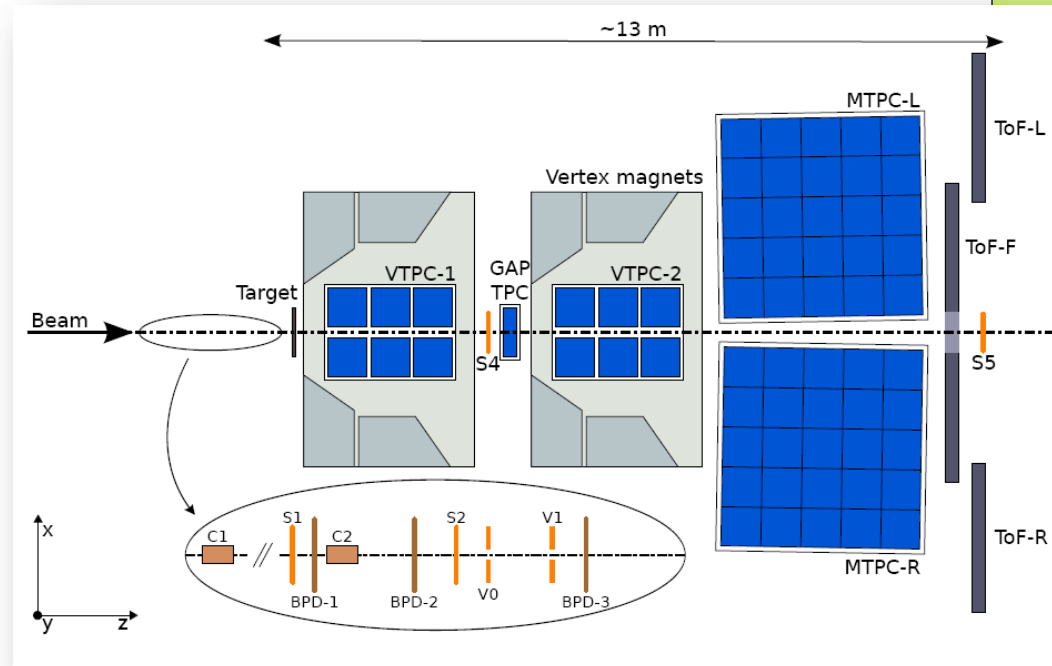
Complicated far-to-near ratio ($R_{F/N}$)

GFLUKA

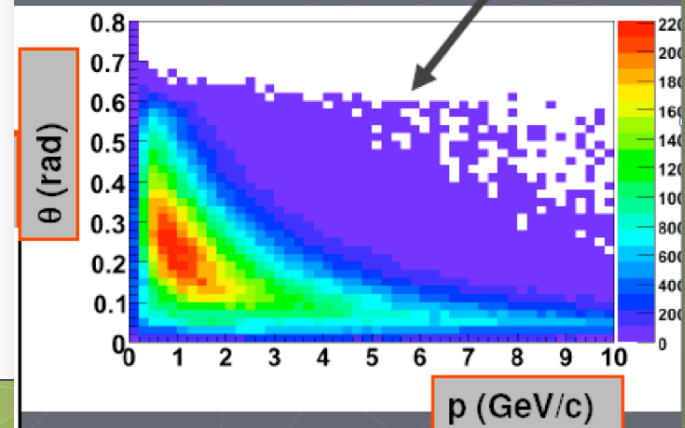


NA61 (SHINE)

- Large Acceptance Spectrometer for charged particles
- TPCs as main tracking devices
- 2 dipole magnets – 1.5T max
- New ToF-F to cover T2K acceptance
- High momentum resolution $\sigma_p/p^2 = 10^{-4} (\text{GeV}/c)^{-1}$
- Good particle identification (PID): $\sigma(dE/dx) \sim 4\%$
- Good ToF resolution: $\sigma(\text{ToF-L/R}) = 60 \text{ ps}$, $\sigma(\text{ToF-F}) \leq 120 \text{ ps}$

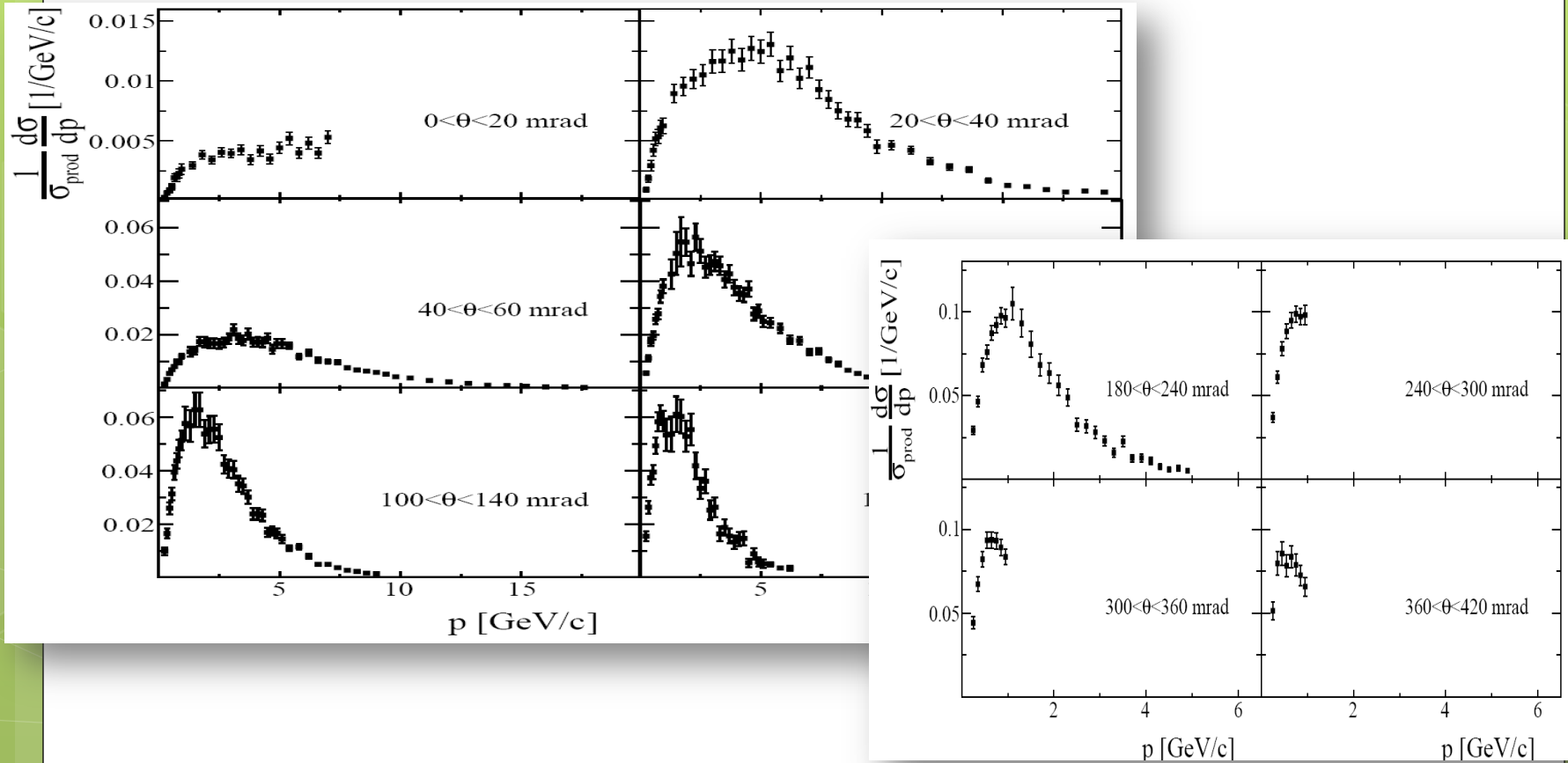


Positive particles – NA61 data from 2007 pilot run



NA61/SHINE – wyniki dla T2K

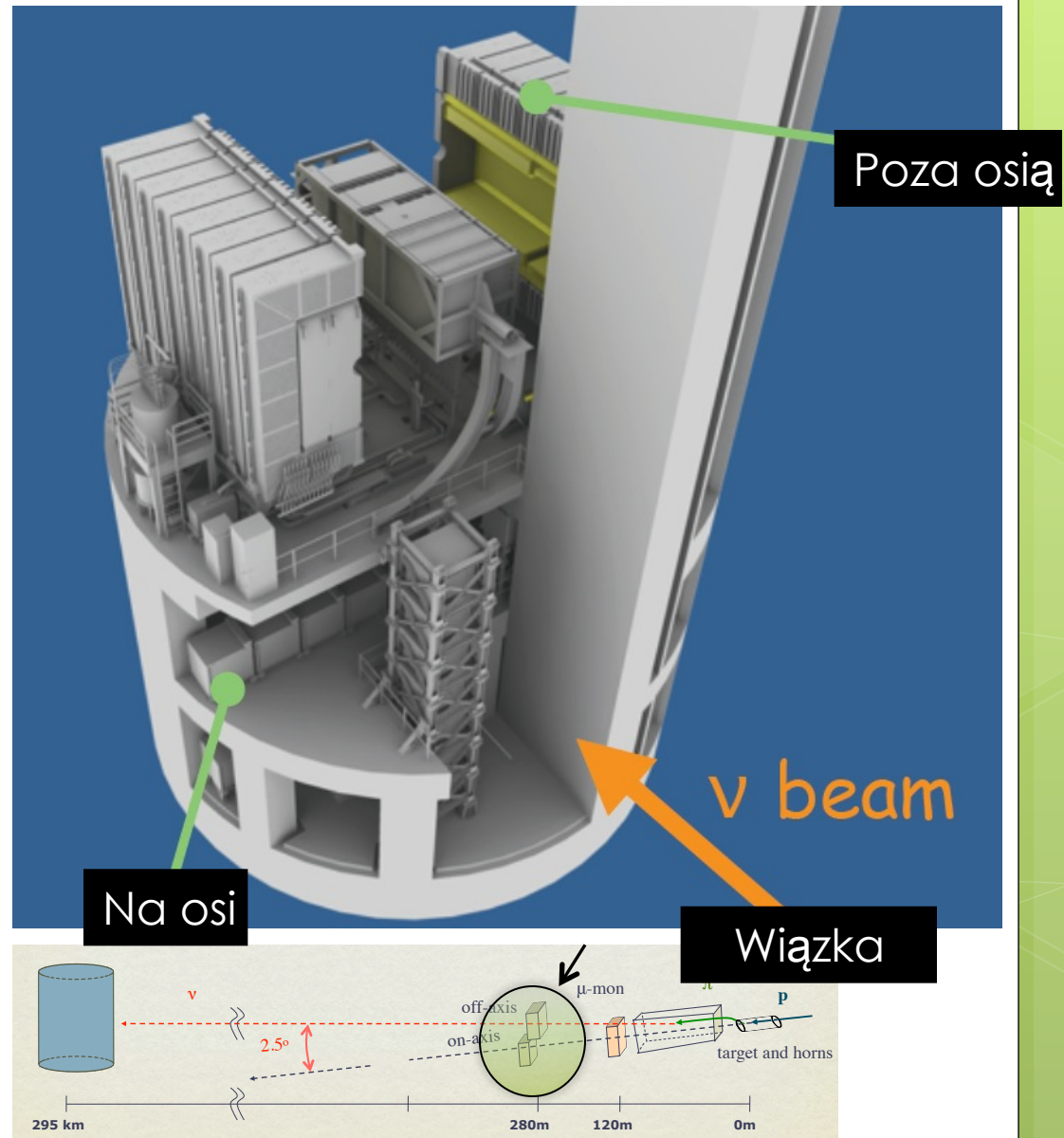
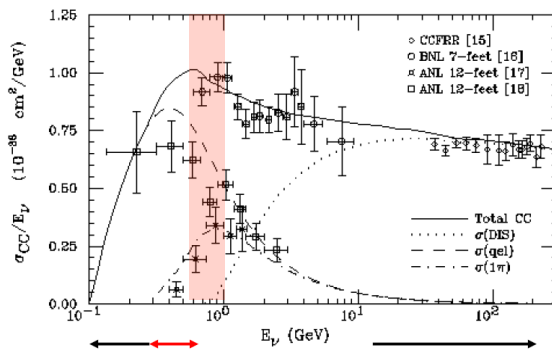
Krotności w przedziałach pędu i kąta względem osi wiązki – π^+



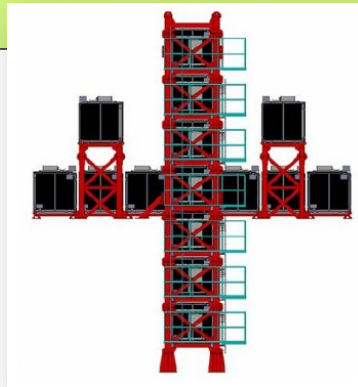
For each point total error is plotted. In addition the total normalization uncertainty is 2.3%.

Stacja bliska

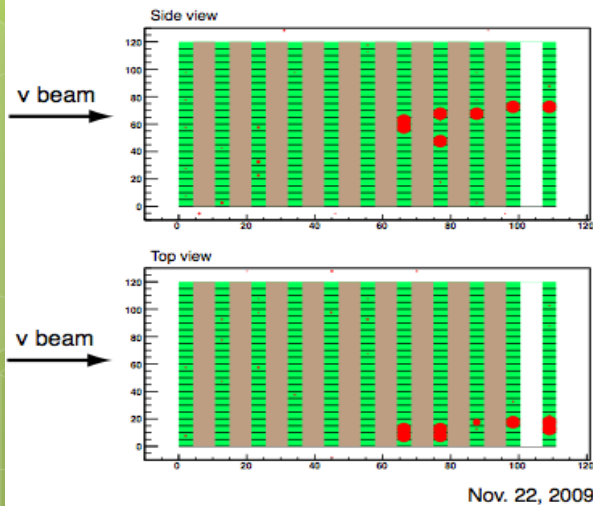
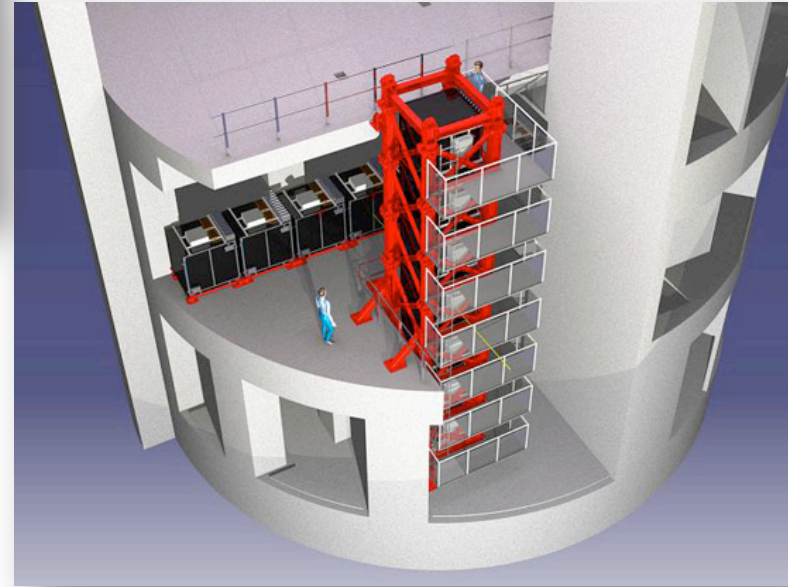
- Bliska stacja eksperymentu
- Dwie części: osiowa (INGRID) i pozaosiowa (ND280)
- Funkcje:
 - Monitorowanie wiązki
 - Pomiary przekrojów czynnych na węglu i wodzie
 - Pomiary wiązki nieoscyłowanej i jej zanieczyszczeń (wkład od neutrino elektronowych istotny dla pomiaru pojawiania się ν_e)
 - Pomiary w ND280 pozwolą na kasowanie niektórych błędów systematycznych z pomiarami w SK



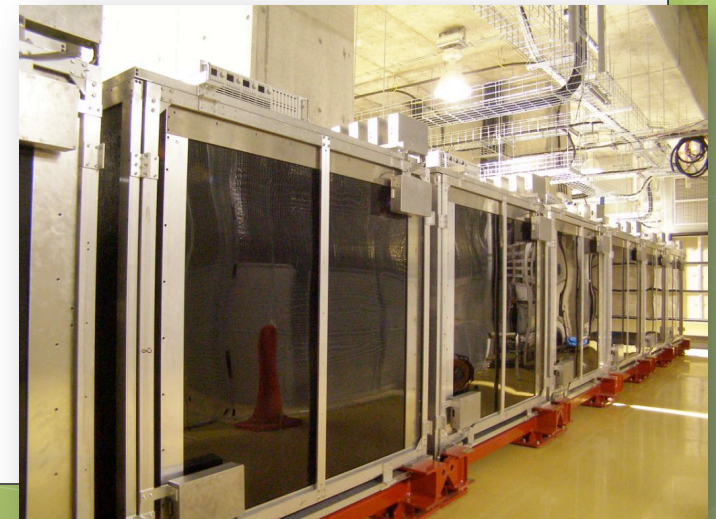
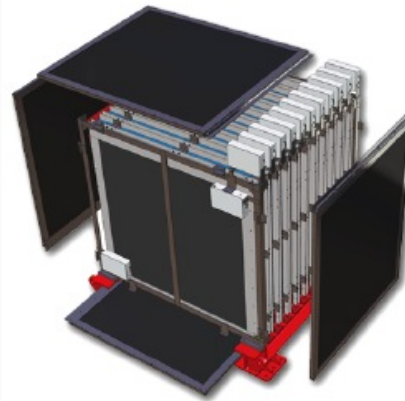
INGRID



- 16 modułów – przekładanćów scyntylatora i żelaza na osi wiązki ($1 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$)
- Mierzy profil wiązki neutrinowej, monitoruje jej kierunek (z dokładnością do 1 mrad)
- Statystyka wystarczająca do codziennej kontroli

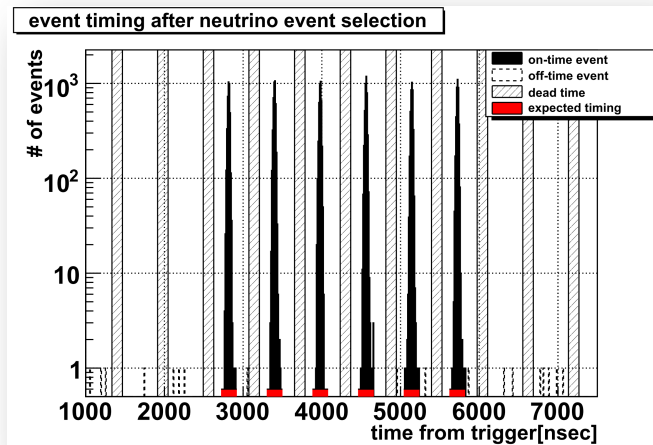


$$\nu_{\mu} n \rightarrow \mu^{-} p$$

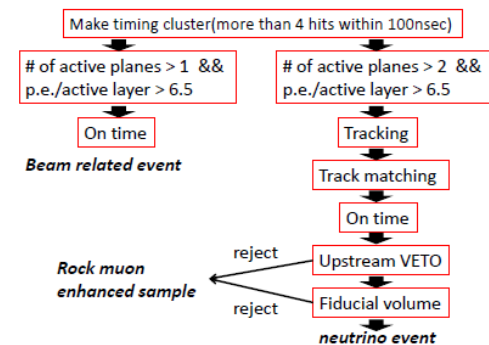


MR Shot #19655
T2K Spill# 241792

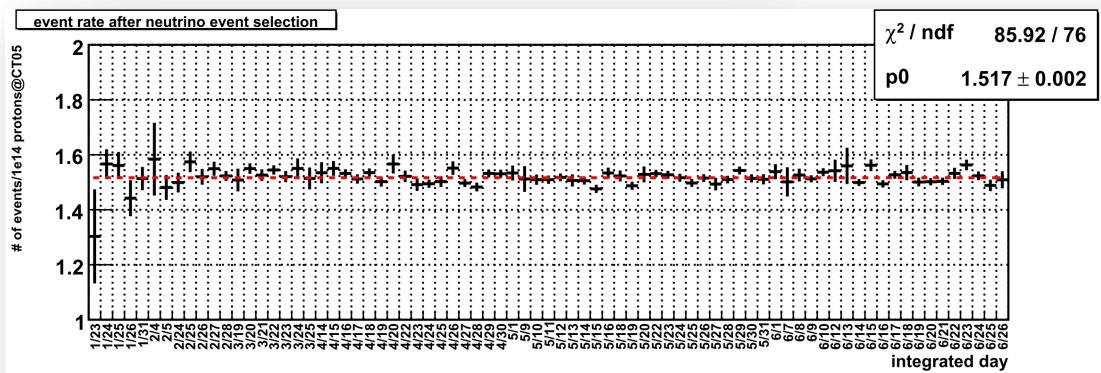
INGRID – struktura czasowa, liczba przypadków



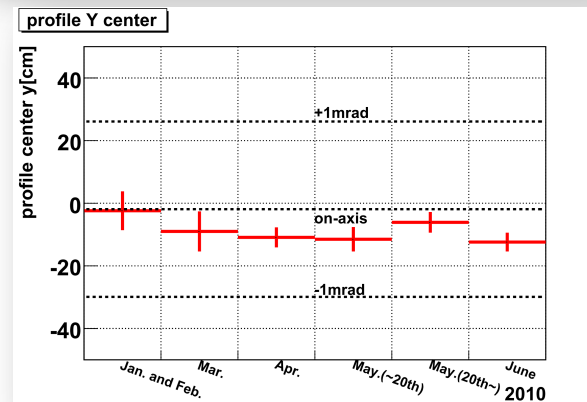
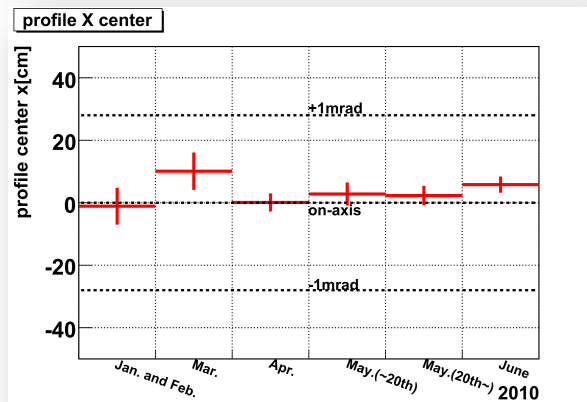
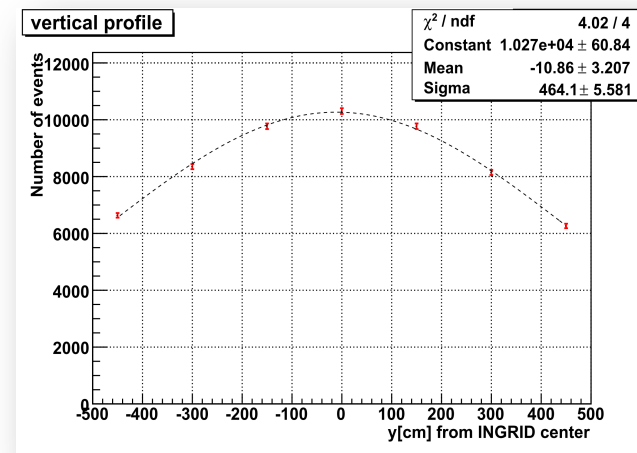
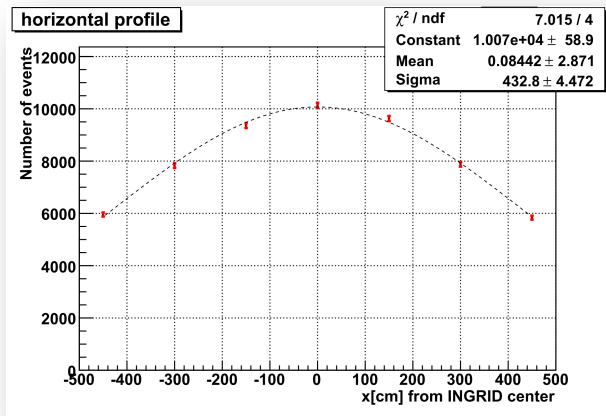
- Obserwowana struktura czasowa
 - Zastosowana selekcja przypadków neutrinowych
 - Czerwone paski – oczekiwany czas nadejścia pakietów wiązki



- Stabilność w czasie obserwowanej liczby przypadków neutrinowych



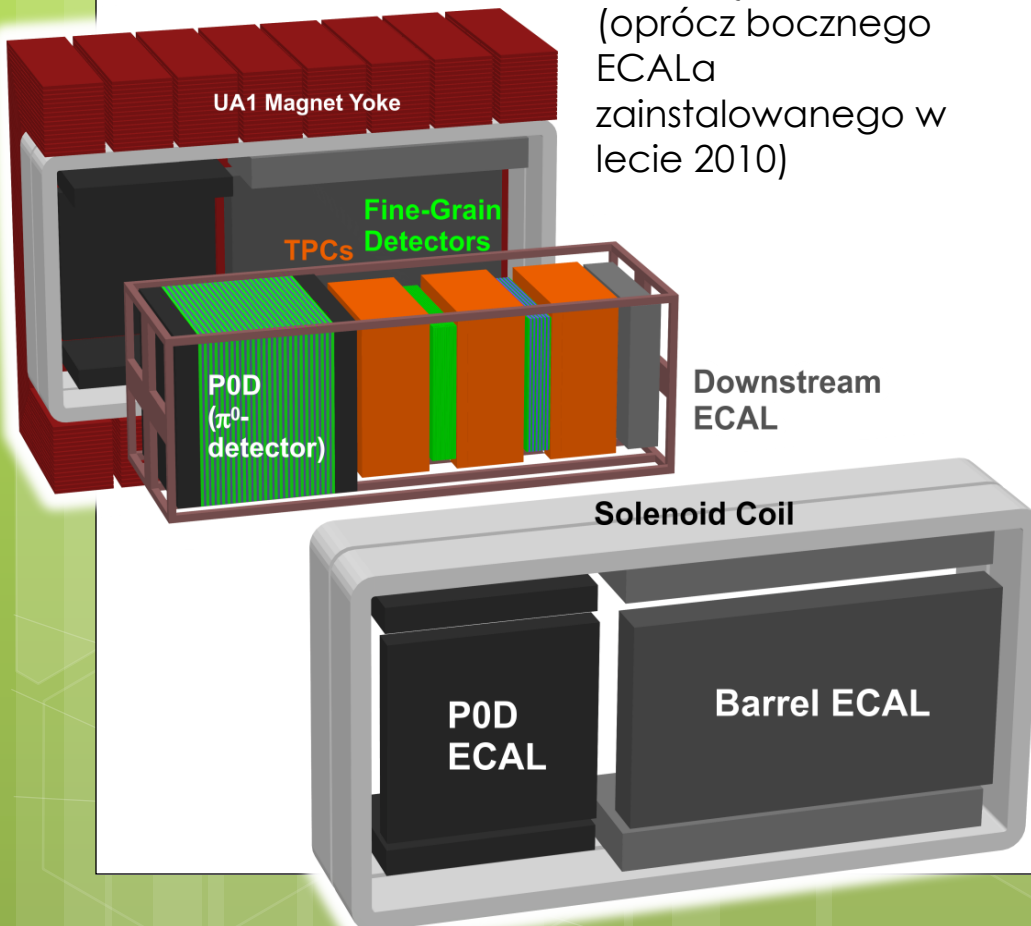
INGRID – profil i stabilność wiązki



ND280 = TOAD



Tokai Off Axis Detector

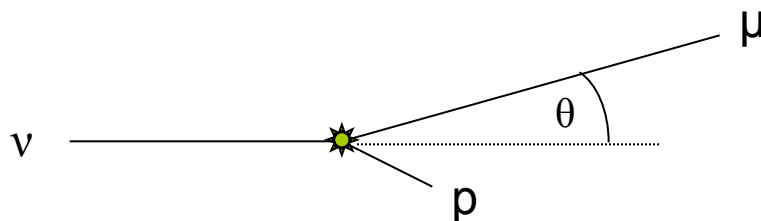


Instalacja: 2009
(oprócz bocznego ECALa zainstalowanego w lecie 2010)

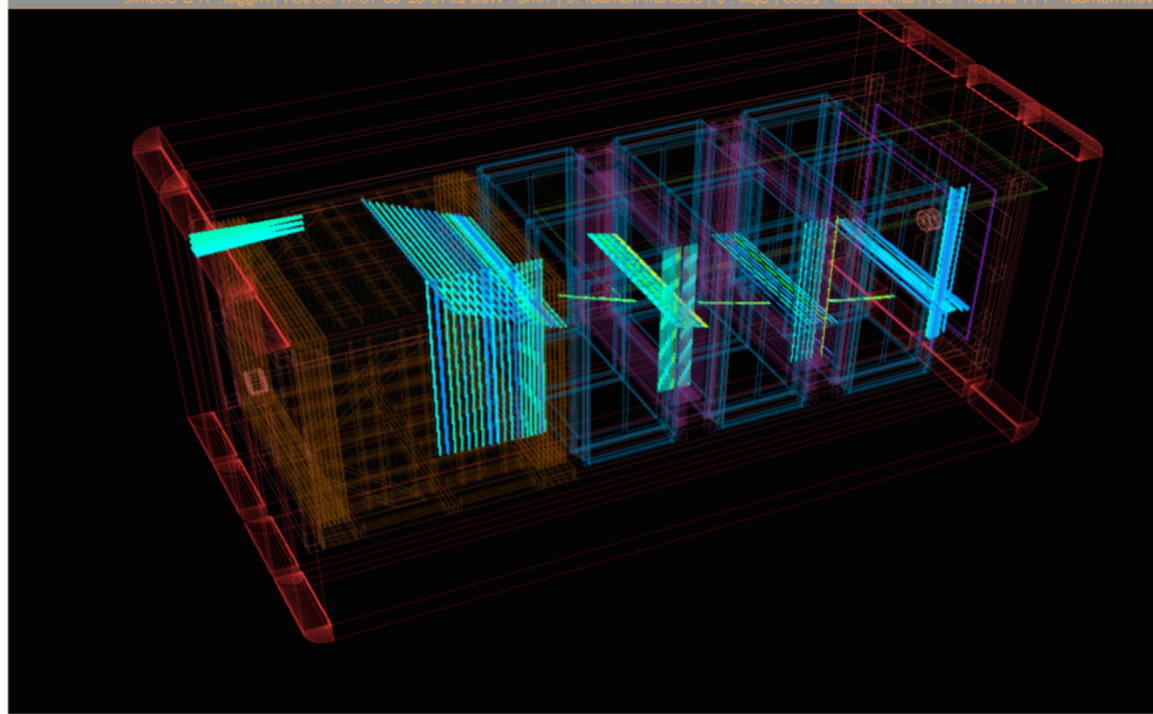
- **Magnes i cewka** (pole 0.2 T),
- **Detektory FGD** – tarcza dla oddziaływań, identyfikacja protonów
- **Komory TPC** – identyfikacja i rekonstrukcja pędu mionów, naładowanych pionów i elektronów
- **Detektor P0D** – detekcja neutralnych pionów
- Detektor wewnętrzny otoczony **kalorymetrami elektromagnetycznymi** – pomiar gamm które nie skonwertowały wewnątrz
- W jarzmie magnesu **detektor mionów SMRD (Side Muon Range Detector)** do pomiaru energii mionów wychodzących z detektorów wewnętrznych

Pomiary w ND280

- Pomiary
 - Zawartość ν_e w wiązce
 - Przekroje czynne
 - Spektrum wiązki
- Za pomocą
 - Najlepiej przez łatwo rekonstruowalne zdarzenia quasi-elastyczne CC
 - Do wyznaczenia energii neutrino wystarcza nam tylko znajomość właściwości wychodzącego mionu
 - Poniższa formuła zaniedbuje rozmycie z powodu pędu Fermiego nukleonu



$$E_{\nu}^{\text{rec}} = \frac{m_N E_{\mu} - m_{\mu}^2 / 2}{m_N - E_{\mu} + p_{\mu} \cos \theta_{\mu}}$$

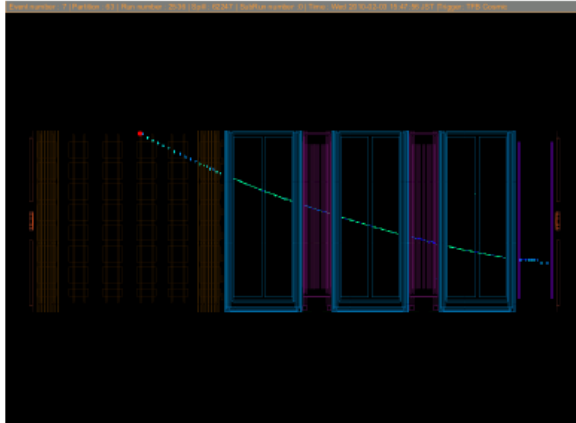


Detektor ND280 w działaniu

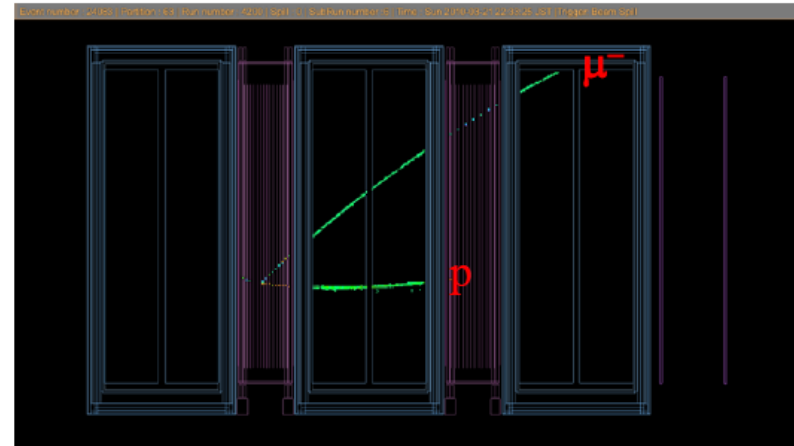
Mion kosmiczny

Galeria przypadków w ND280

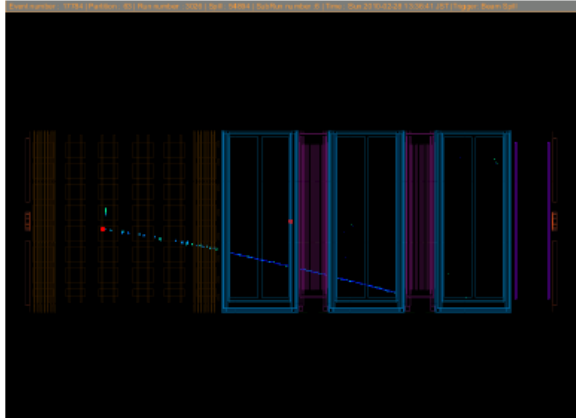
Cosmic track reconstructed across all detectors



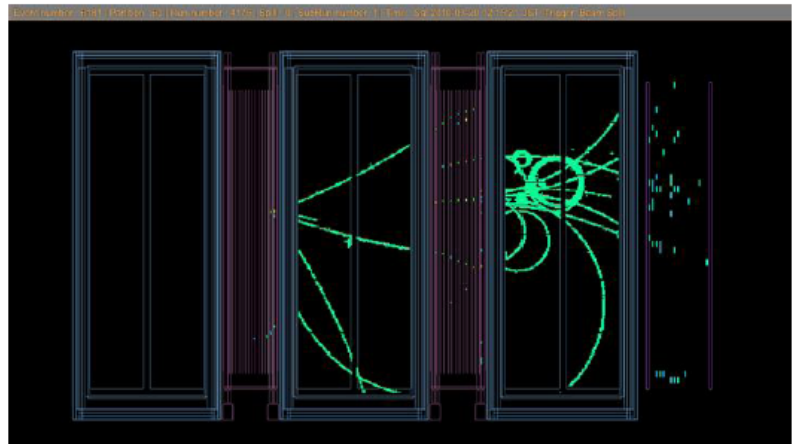
Clean CC interaction in FGD1



ν interaction in POD sending single negative track into TPC1/FGD1/TPC2



Interaction in FGD1 with shower in FGD2

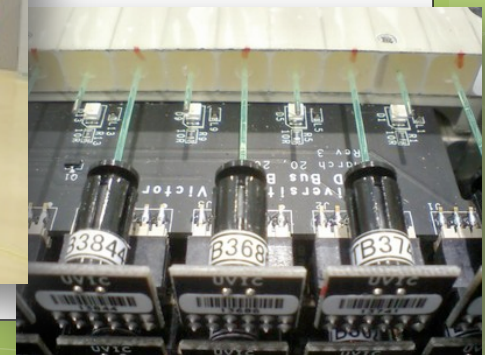


Kalorymetry elektromagnetyczne (ECALs)

- 8 modułów otaczających POD i Tracker (zamontowane w lecie 2010)
- Plus jeden na końcu detektora – ‘Downstream ECAL’ (zamontowany w 2009)
- Pomiar cząstek wychodzących z detektorów wewnętrznych, w tym pomiar fotonów z $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ które nie skonwertowały wewnątrz – wspomaganie PODa; także veto dla cząstek wchodzących z zewnątrz
- Warstwy scyntylacyjne przekładane folią ołowianą

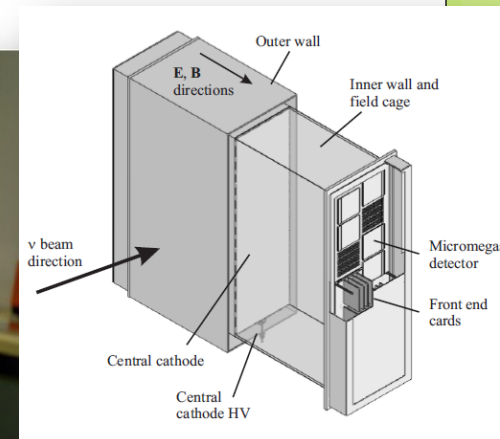
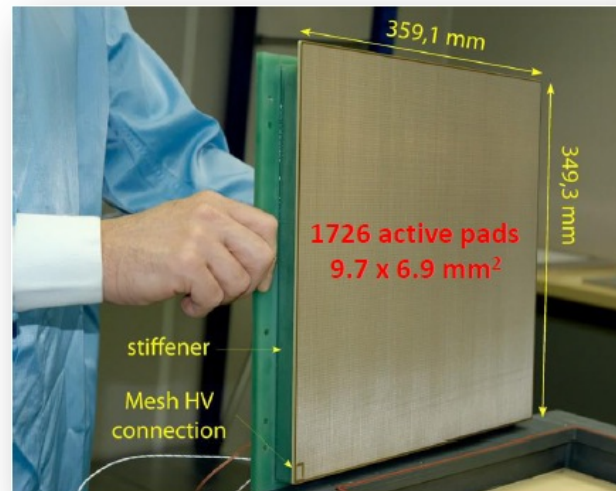
Tracker: Detektory Dużej Rozdzielczości (FGDs)

- Dwa FGD – jeden zawierający pojemniki z wodą (tarcza dla oddziaływań)
- Detektor scyntylacyjny – paski scyntylatora ze światłowodem w środku, jednostronny odczyt światła sensorami MPPC



Tracker: Komory Projektji Czasowej (TPCs)

- 3 TPC w Trackerze
- Cele: pomiar pędu, identyfikacja cząstek
- Długość robocza modułu: 720mm, maksymalna długość dryfu: 897mm
- Odczyt: detektory Micromegas (3*24 moduły takie jak na zdjęciu)
- Gaz: 95% Ar, 3%CF₄, 2% iC₄H₁₀



Wymagania:
 Rozdzielczość pędowa < 10%
 Rozdzielczość dE/dx < 10%

Identyfikacja cząstek w TPC

- Wzorzec starty energii (dE/dx) – metoda „średniej obciętej”
 - Najniższe 70% wartości używane do obliczenia średniej straty energii
 - Rozdzielczość dE/dx : 7.8%

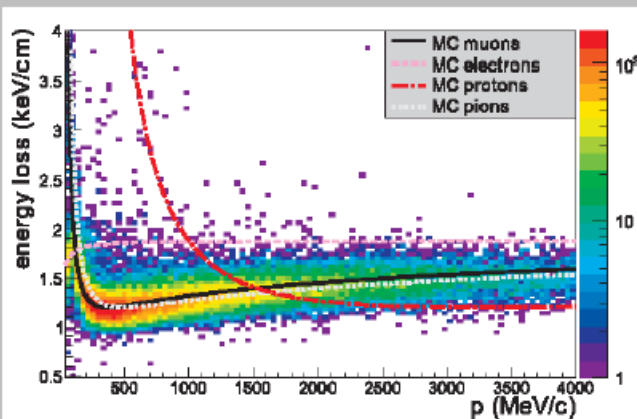
$-1 < \delta_E (e) < 2$ cut gives 0.2% probability of identifying a muon as an electron for $p < 1$ GeV/c

PID using « pull » variable:

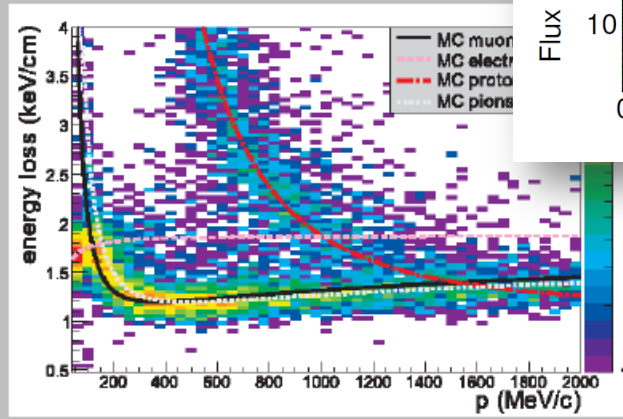
$$\delta_E(i) = \frac{C_T - C_E}{\sigma(i)} \quad (i = e, \mu, \pi, K, p)$$

C_E : expected energy loss value

Through-going muons and neutrino interactions in ND280

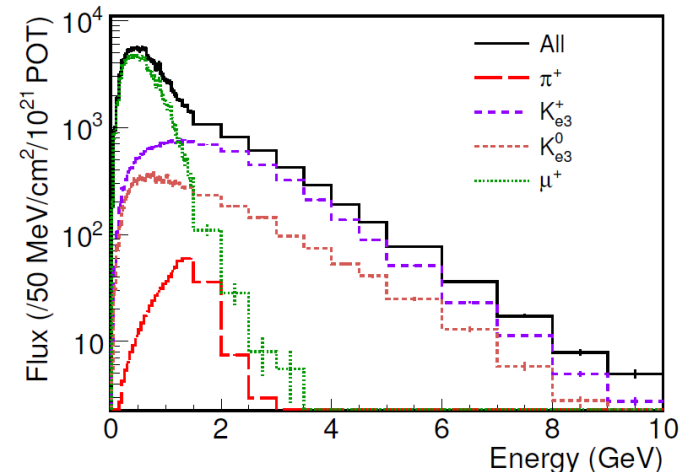


Negative tracks: μ^- , e^-



Positive tracks: p , π^+ , e^+

ν_e energy spectrum at Super-K



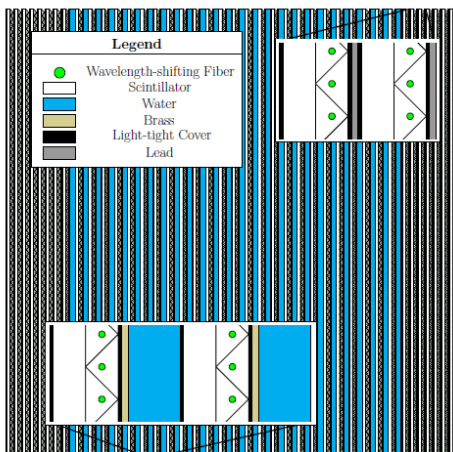
Pi zero detector (P0D)

- Detektor scyntylacyjny, poprzekładany folią ołowianą/mosiężną
- Folia ołowiana – konwersja π^0 na pary $\gamma\gamma$
- W środkowej części detektora dodatkowe pojemniki z wodą (pomiar przekrojów czynnych na wodzie)



Upstream Water Target

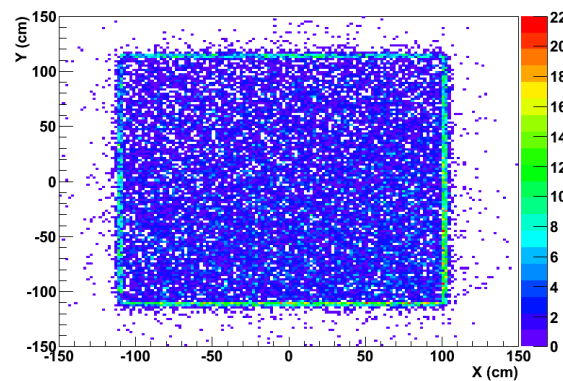
Central ECal



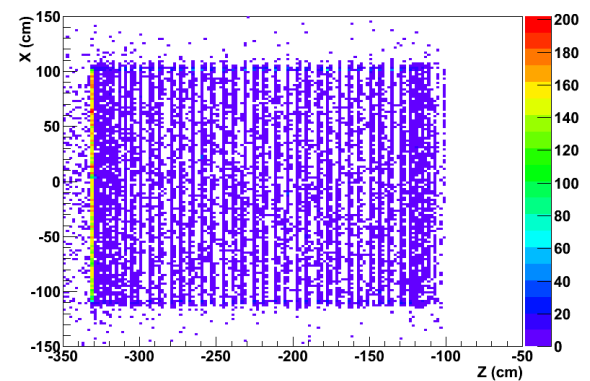
Upstream ECal

Central Water Target

XY Distribution of Vertices

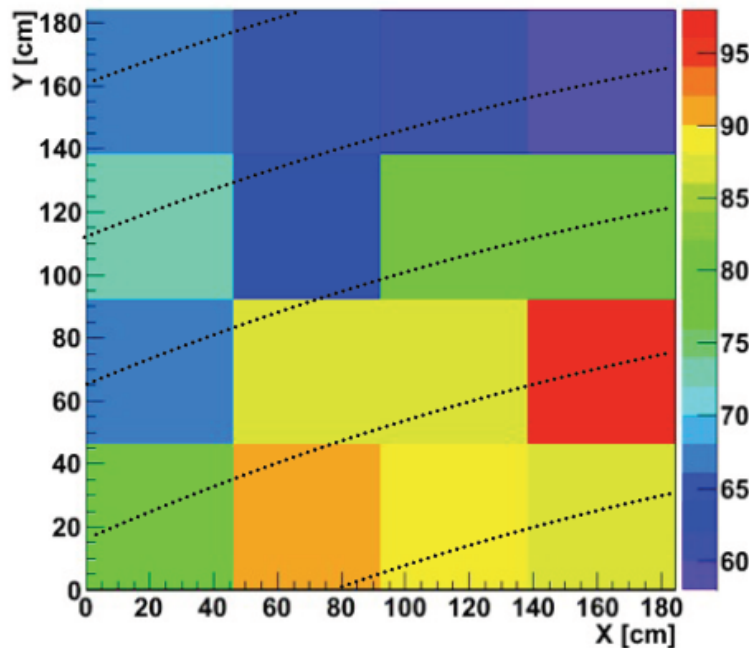


XZ Distribution of Vertices

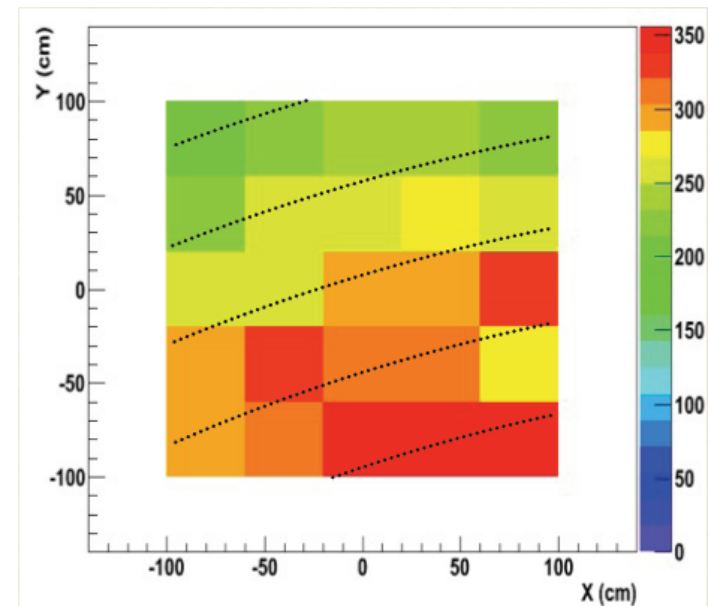


Widać że detektor faktycznie jest poza osią wiązki!

- Zrekonstruowane wierzchołki w FGD i P0D



FGD

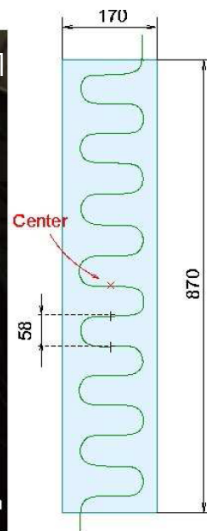
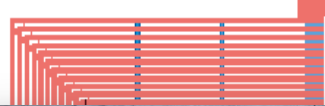


P0D

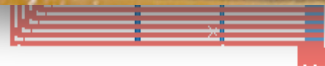
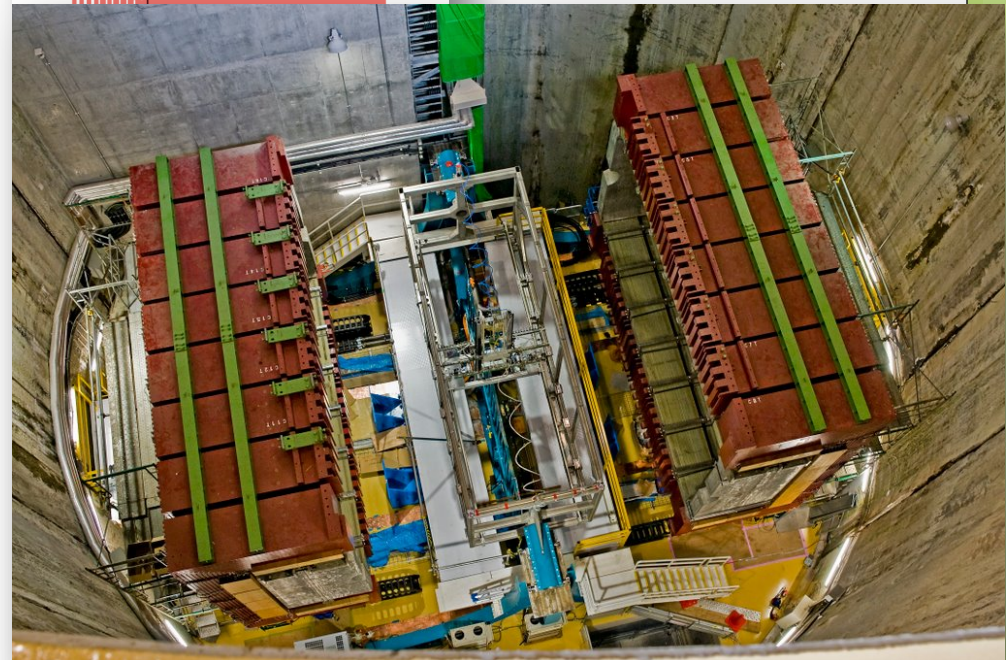
SMRD (Side Muon Range Detector, boczny detektor zasięgu mionów)

- Moduły scyntylacyjne umieszczone w szczelinach magnesu
- Cele:
 - Pomiar mionów o dużej energii z oddziaływań neutrin mionowych z wiązki $\nu N \rightarrow \mu N'$
 - Wybieranie mionów kosmicznych do kalibracji

Jeden pierścień magnesu ze szczelinami

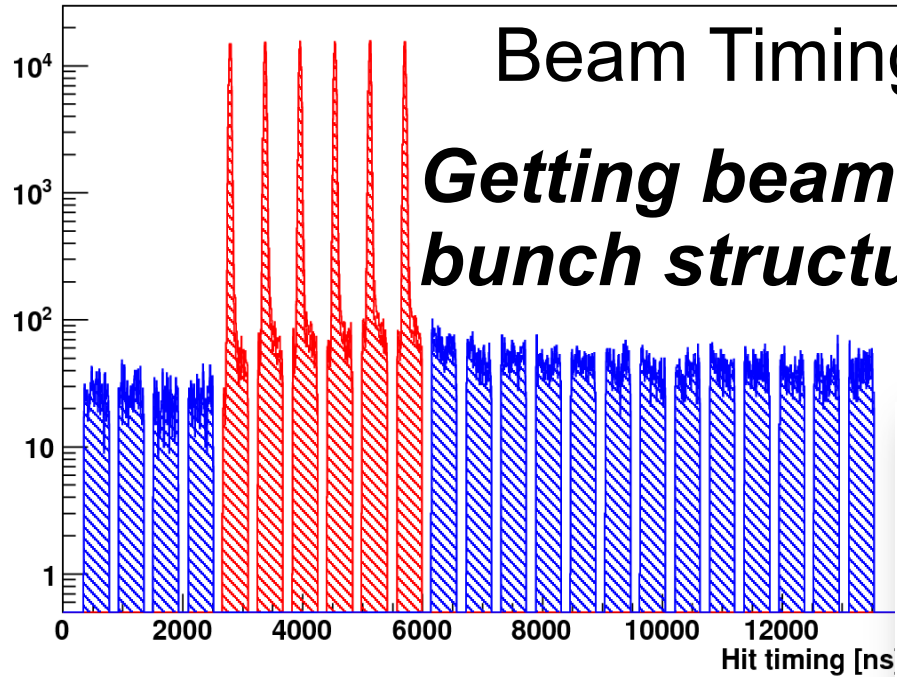


Licznik scyntylacyjny

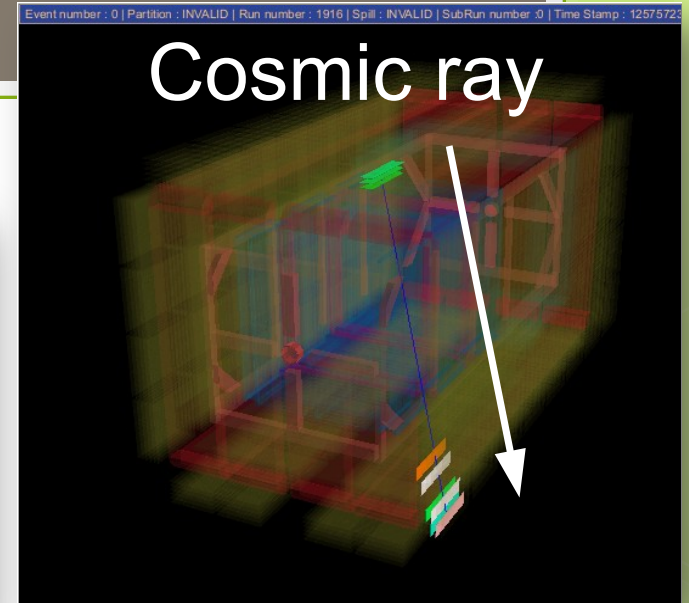


SMRD

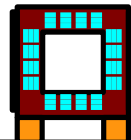
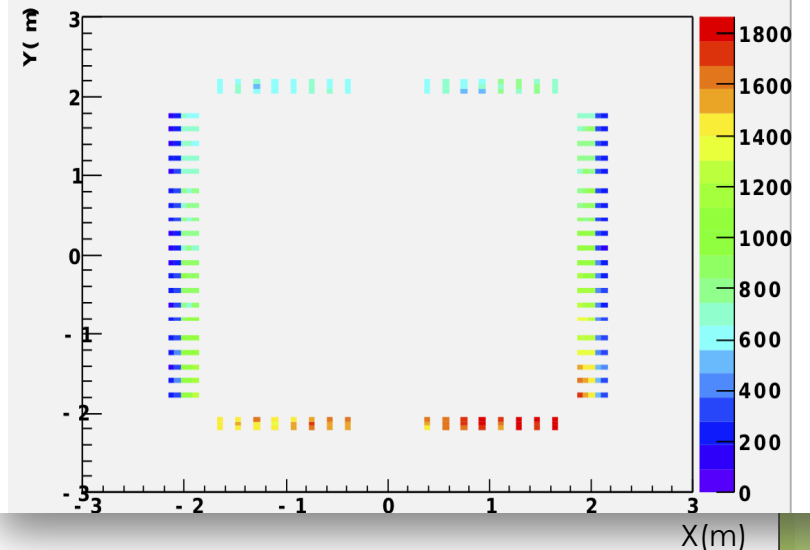
Beam Triggered Hit Time Distribution in SMRD [ns]



Cosmic ray



Hit position distribution



Selekcja próbki ν_μ CC w ND280

- Selekcja oparta na informacjach z detektora śladowego (Trackera) – TPC i FGD
- Potrzebne do weryfikacji przewidywań symulacji, istotne w analizie oscylacyjnej (czynnik normalizacyjny)
- Dane: $2.88 \cdot 10^{19}$ POT (2010, do wakacji)
- Cięcia:

Run	period	POT (10^{19})
31	March 2010	0.13
32	April 2010	0.70
33	May 2010	1.16
34	June 2010	0.89
Total		2.88

dane:

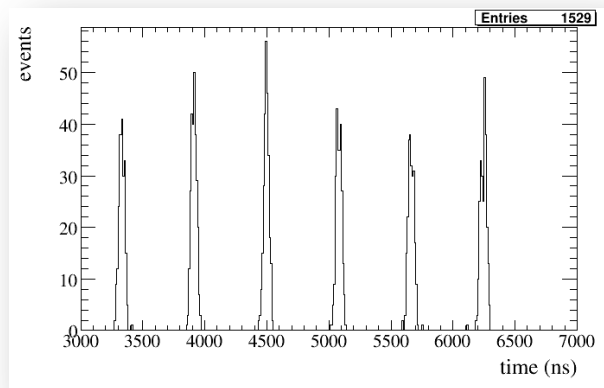
Cut	Selected events	(%)
Total n of spills	870003	100
At least one TPC track	74097	8.52
No track in TPC1	26437	3.04
At least one track in TPC2	16706	1.92
Within the FGD FV	1866	0.21
Negative and $p > 50$ MeV/c	1036	0.12
PID cut	796	0.09
At least one track in TPC3	9731	1.12
Within the FGD FV	1890	0.22
Negative and $p > 50$ MeV/c	1049	0.12
PID cut	733	0.08
Total n	1529	0.18

MC:

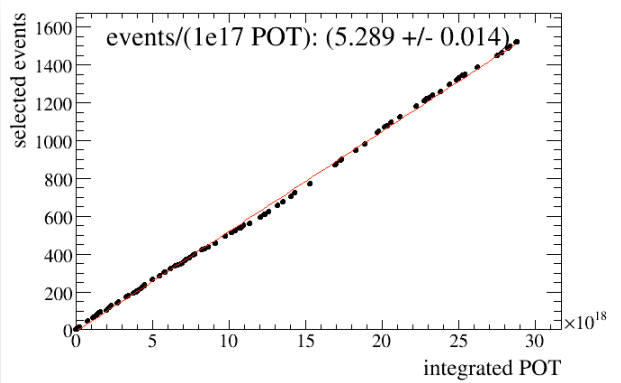
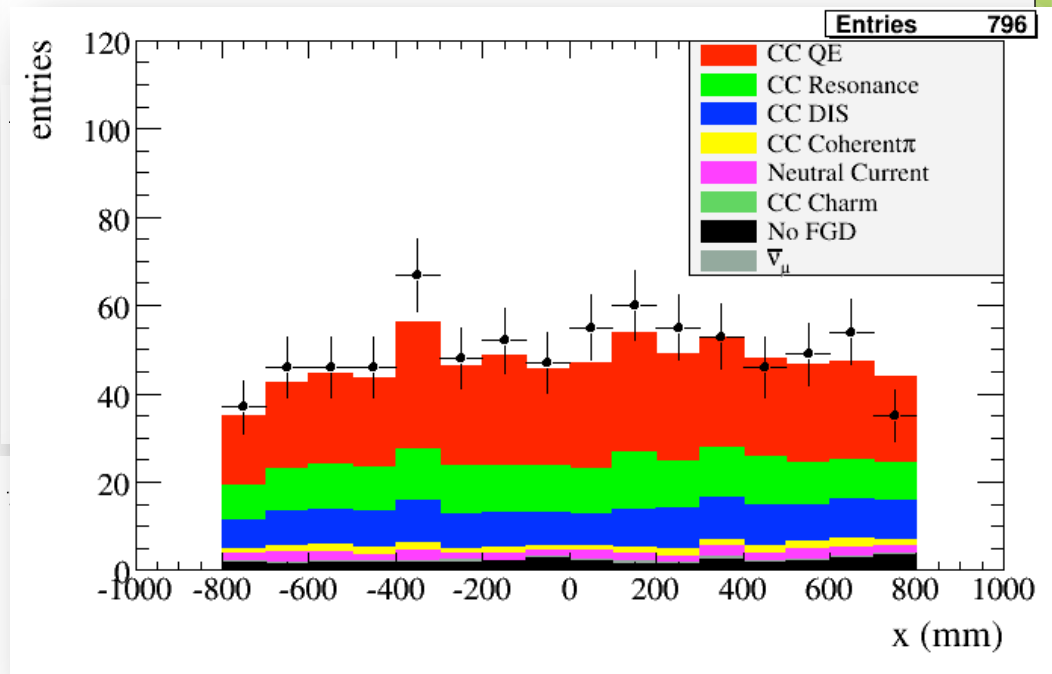
Cut	Selected events	(%)
Total n of spills	6683955	100
At least one TPC track	794722	11.89
No track in TPC1	370343	5.54
At least one track in TPC2	215835	3.23
Within the FGD FV	29484	0.44
$q < 0$ and $p > 50$ MeV/c	16887	0.25
PID cut	13081	0.20
At least one track in TPC3	154508	2.3
Within the FGD FV	28240	0.42
$q < 0$ and $p > 50$ MeV/c	15743	0.24
PID cut	12146	0.18
Total	25227	0.38

Selekcja próbki ν_μ CC w ND280

Wybrane przypadki pochodzą z wiązki:

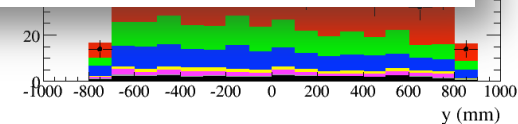
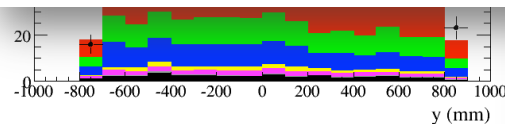


Rozkład przestrzenny wierzchołków w FGD:



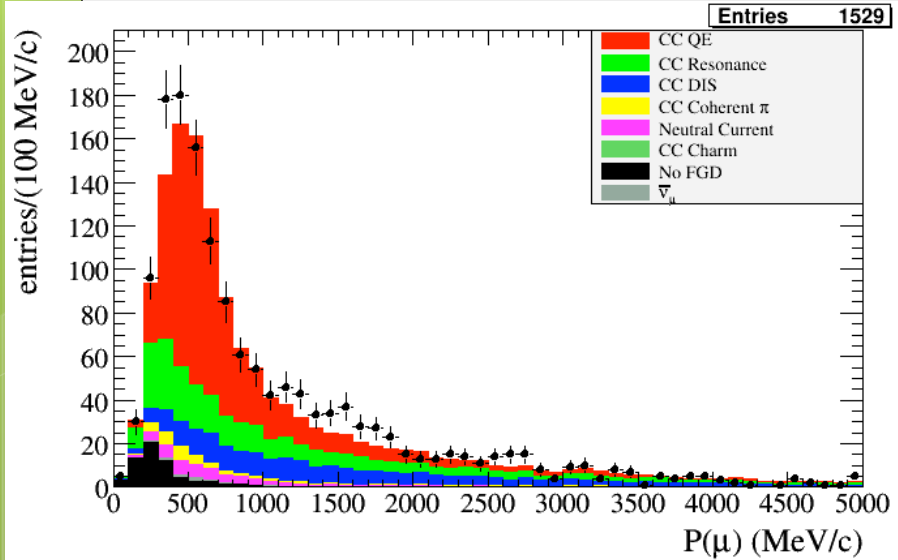
X

y

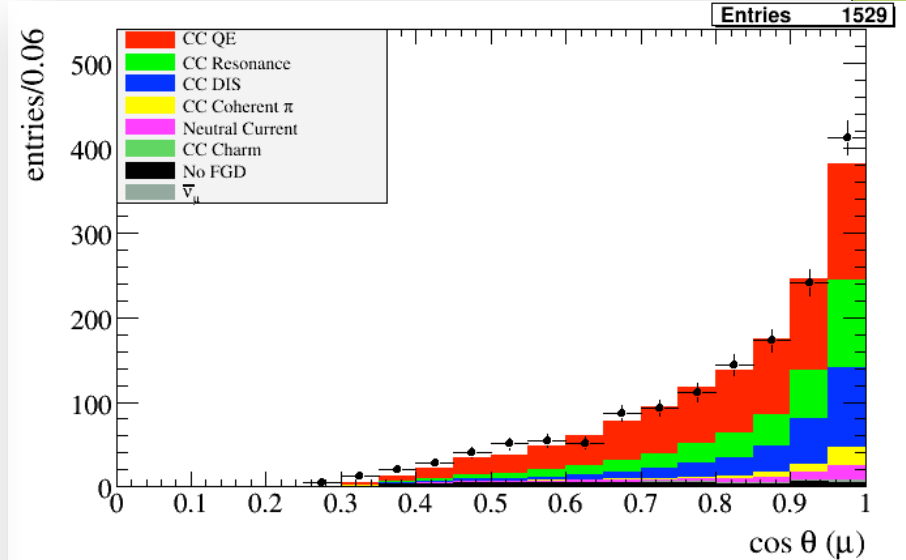


Selekcja próbki ν_μ CC w ND280

Zrekonstruowany pęd mionu:



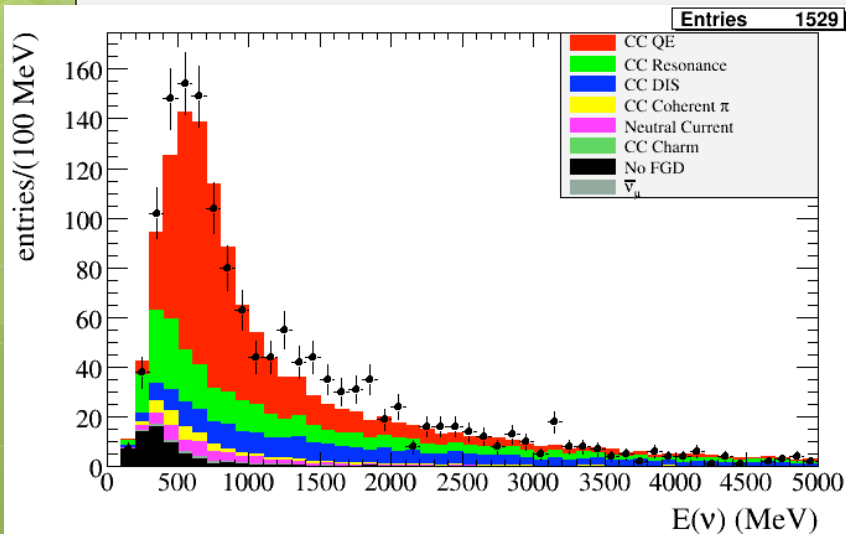
Zrekonstruowany kąt mionu:



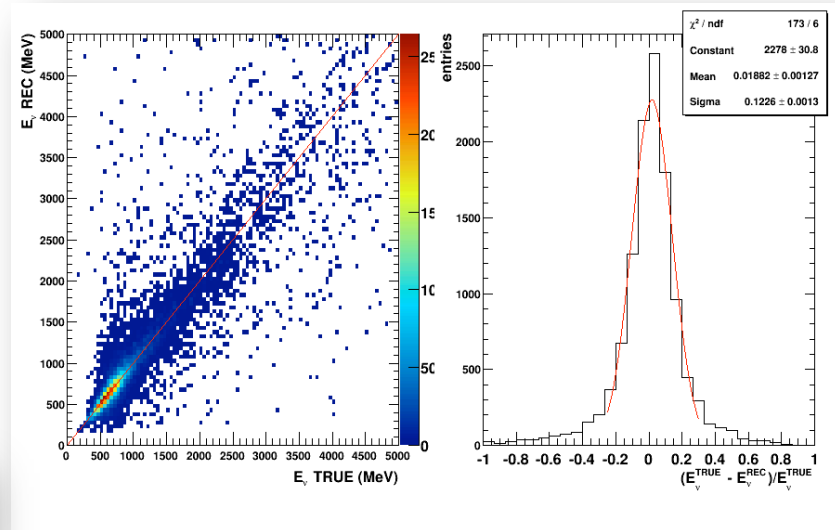
Selekcja próbki ν_μ CC w ND280 - wyniki

Rozkład energii neutron przy założeniu oddziaływań CCQE:

$$E_\nu^{CCQE} = \frac{(m_p - E_B)E_\mu^{corr} - (E_B^2 - 2m_p E_B + m_\mu^2)/2}{(m_p - E_B) - E_\mu^{corr} + p_\mu^{corr} \cos \theta_\mu}$$



Jakość rekonstrukcji:

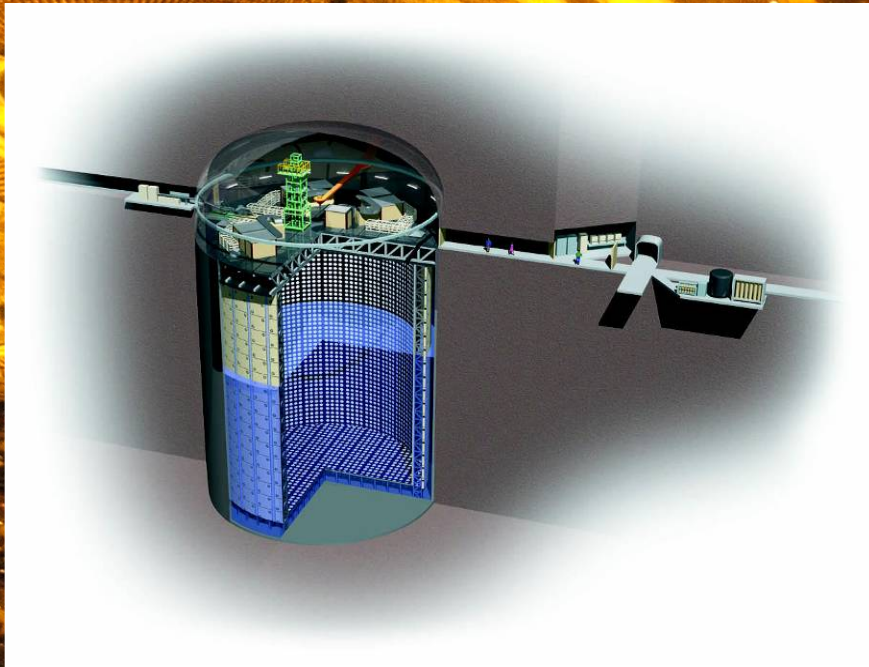


Ostateczny rezultat wykorzystywany do wykorzystania w analizie:

$$R_{\text{data/MC}} = 1.061 \pm 0.028(\text{stat.})_{-0.038}^{+0.044}(\text{det. sys.}) \pm 0.039(\text{phys. model}).$$

Efektywność selekcji – 38%
Czystość próbki – 90%

Detektor daleki Super-Kamiokande



Wodny detektor wykorzystujący technikę Czerenkowa

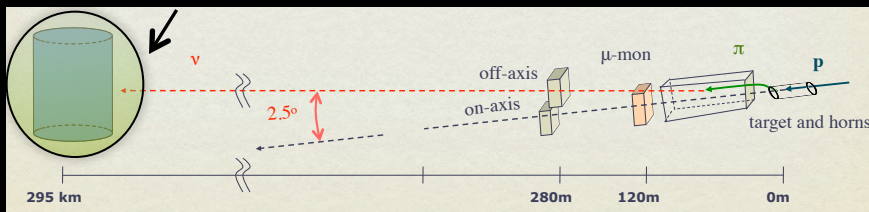
50 kton wody, 22.5 kton w przestrzeni roboczej detektora

>11,000 fotopowielaczy w Ścianach

Technika detekcji doskonale opanowana (SuperK zbiera dane od wielu lat), błędy systematyczne znane i rozumiane

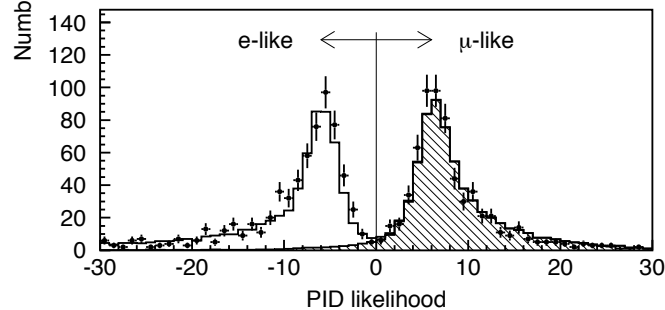
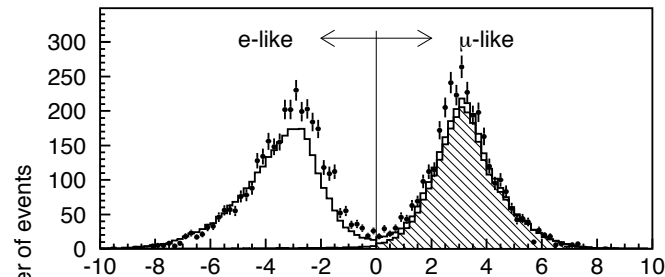
Detektor został odnowiony razem z systemem zbierania danych

Wiązka jest impulsowa, selekcja przypadków za pomocą systemu GPS

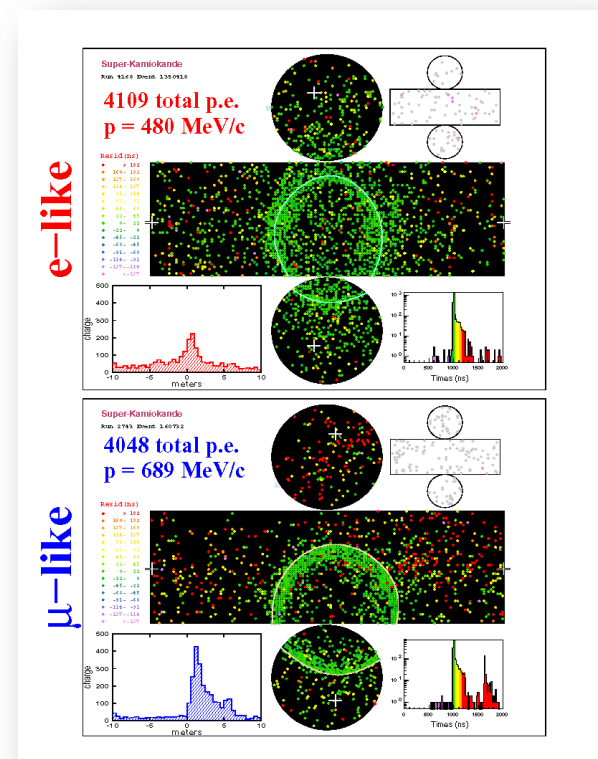


Super-Kamiokande

- Dwa rodzaje pierścieni
 - Mionowy – miony i piony naładowane
 - Elektronowy – elektrony i gammy



1-ring, subGeV/multiGeV



- Dwie klasy przypadków
 - Fully Contained (FC) – cała energia zdeponowana w detektorze wewnętrznym (ID)
 - Partially Contained (PC) – tory wychodzące – niemożliwa pełna rekonstrukcja energii

Selekcja przypadków w SK

Timing coincident w/ beam time (+TOF)

Fully contained (No OD activity)

Vertex in fiducial volume
(vertex > 2 m from wall)

ν_μ disappearance analysis

$E_{\text{vis}} > 30 \text{ MeV}$

n° of rings = 1

μ -like ring

ν_e appearance search

$E_{\text{vis}} > 100 \text{ MeV}$

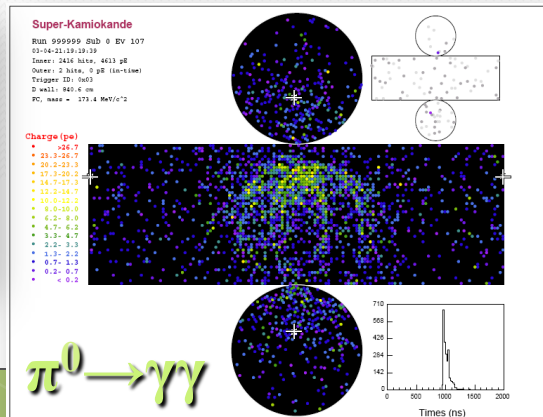
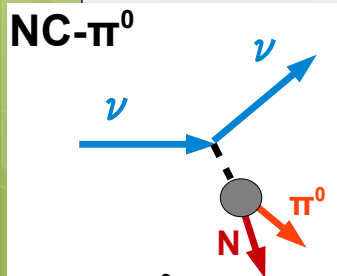
n° of rings = 1

e-like ring

No decay electron

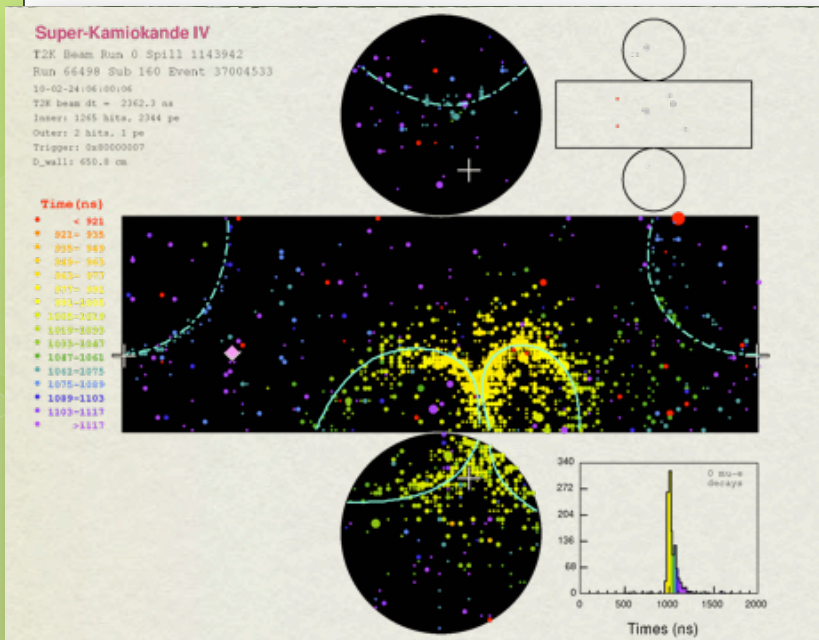
Inv. mass w/ forced-found 2nd ring
< 105 MeV

$E_V^{\text{rec}} < 1250 \text{ MeV}$



Przypadki z wiązki w SK

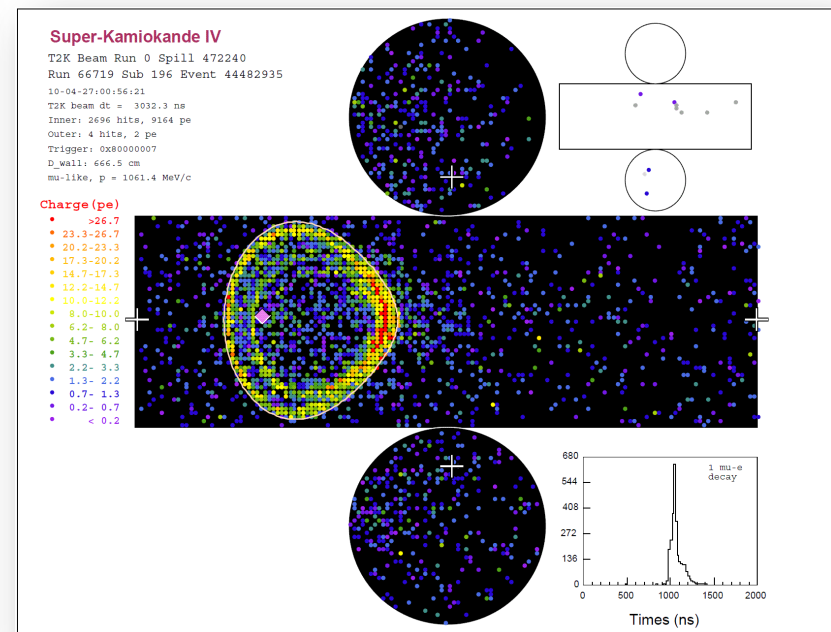
Pierwszy zarejestrowany przypadek! (24.02.2010)



Masa niezmiennicza z dwóch dominujących pierścieni:
 $133.8 \text{ MeV}/c^2$ (blisko masy neutralnego pionu)

Ped: $148.3 \text{ MeV}/c$

Przypadek z jednym pierścieniem typu mionowego



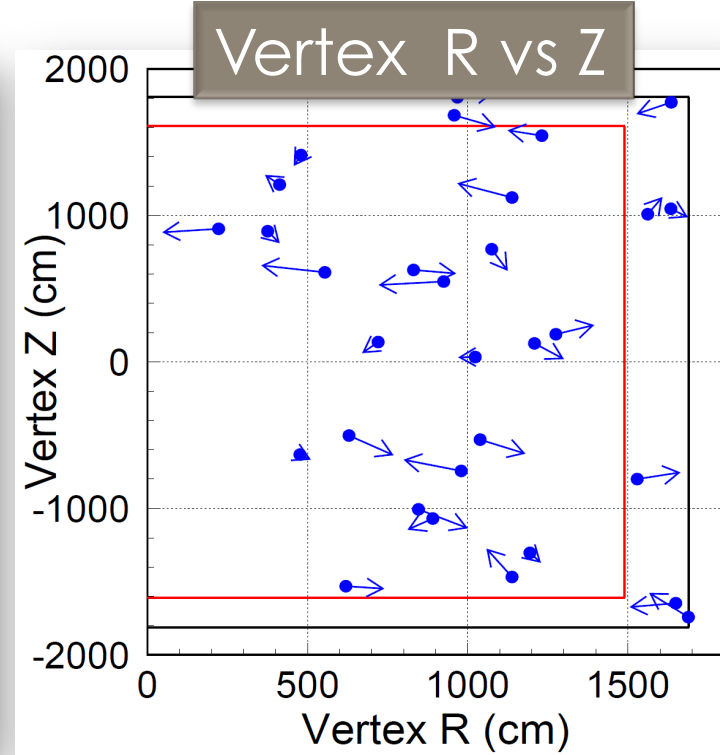
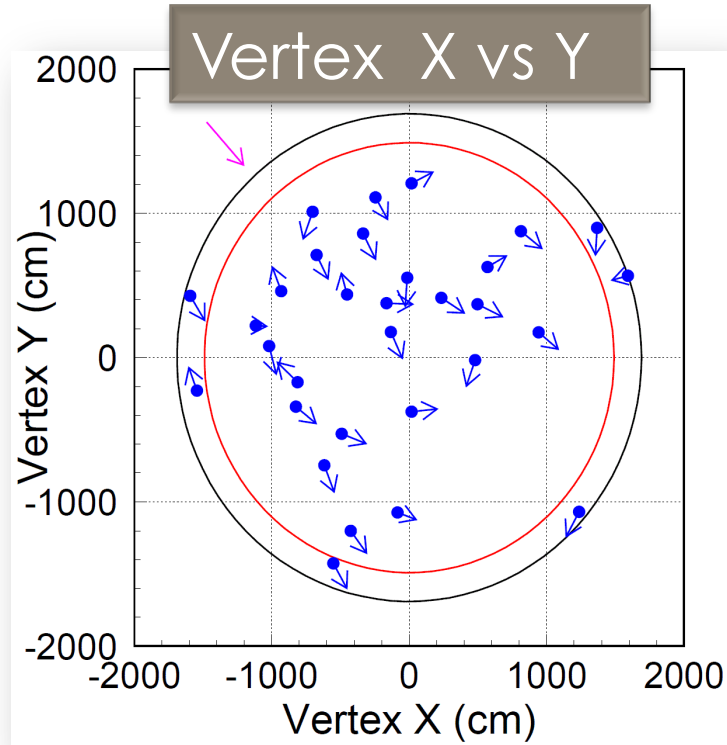
Pęd mionu: $1061 \text{ MeV}/c$

Widoczny pierścień od elektronu powstałego w rozpadzie

Wierzchołki oddziaływań w SK

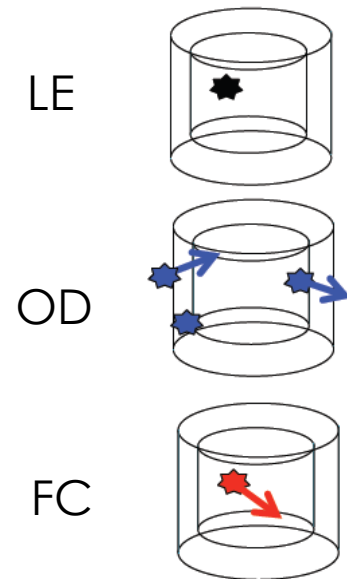
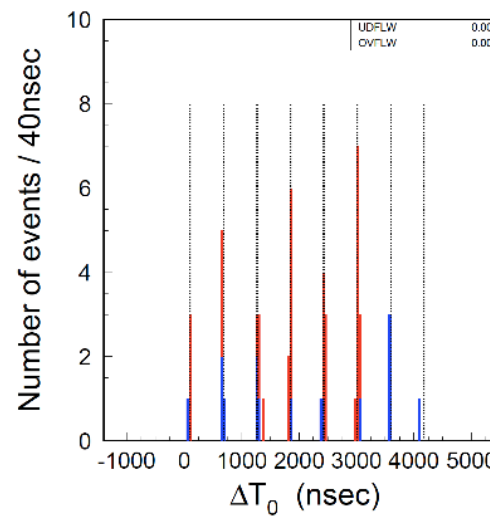
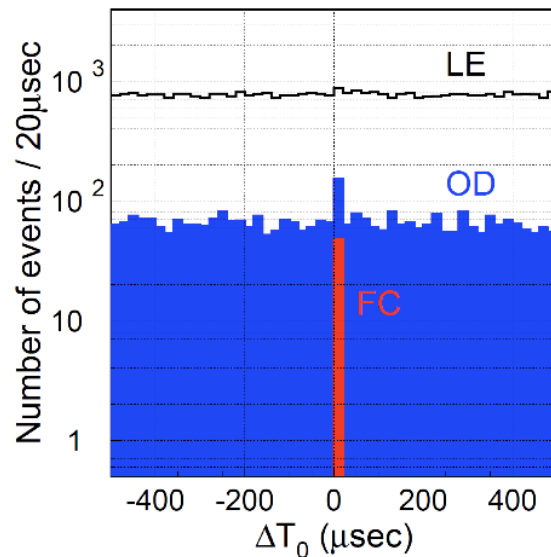
Points : Reconstructed event vertex

Arrow : 1st-ring direction (with max number of photoelectrons)



Struktura czasowa w SK

2010a (Jan-Jun)+2010b (Nov-Dec)



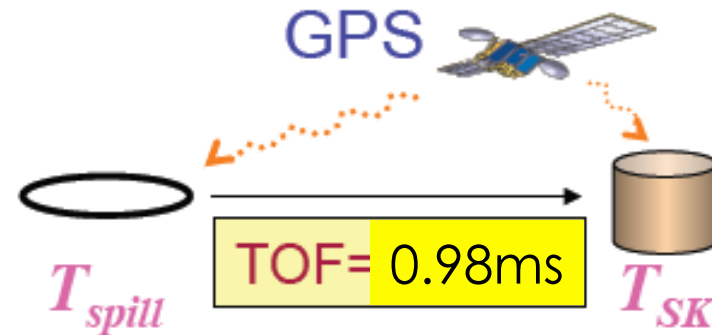
- 6/8 pakietów (bunchy)
- GPS działa bez zarzutu

Synchronizacja GPS: dokładność
rzędu dziesiątek ns

System GPS

Pozycjonowanie

- Precyzyjne ustalanie położenia elementów generujących wiązkę neutrin – geodezja (miernictwo) przy pomocy GPS
- Kierunek wiązki ustalony z precyzją większą niż 10^{-4} rad (wymagana: 10^{-3} rad).
- Coroczna weryfikacja pozycji elementów eksperymentu (rożki, tarcza, monitory, ND280)

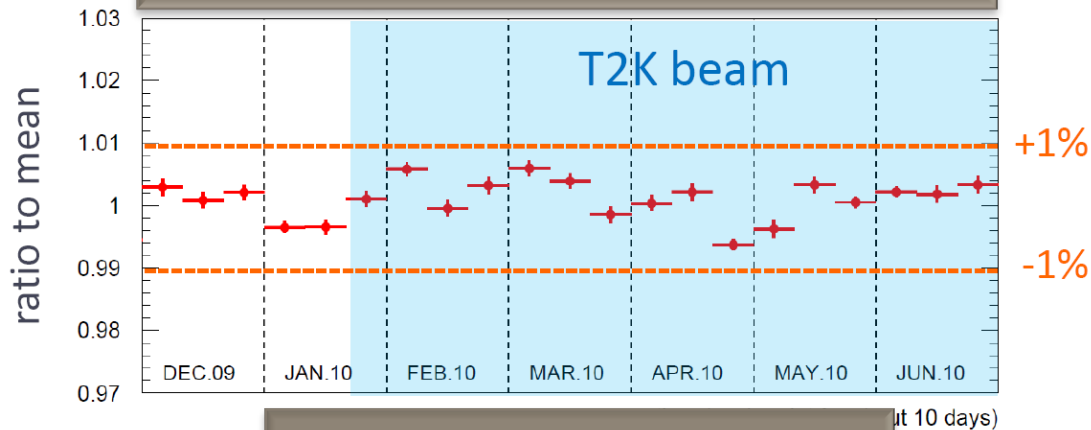


Synchronizacja

- Serce systemu: LTC (Local Time Clock), sprzężony z dwoma odbiornikami GPS
- Zegar atomowy na wypadek straty kontaktu z systemem GPS
- Za każdym razem gdy następuje ekstrakcja wiązki z MR impuls jest rejestrowany przez LTC
- Następnie informacja wysyłana jest do SK oraz używana jako wyzwalanie monitorów wiązki
- Dokładność czasowa rzędu 10ns

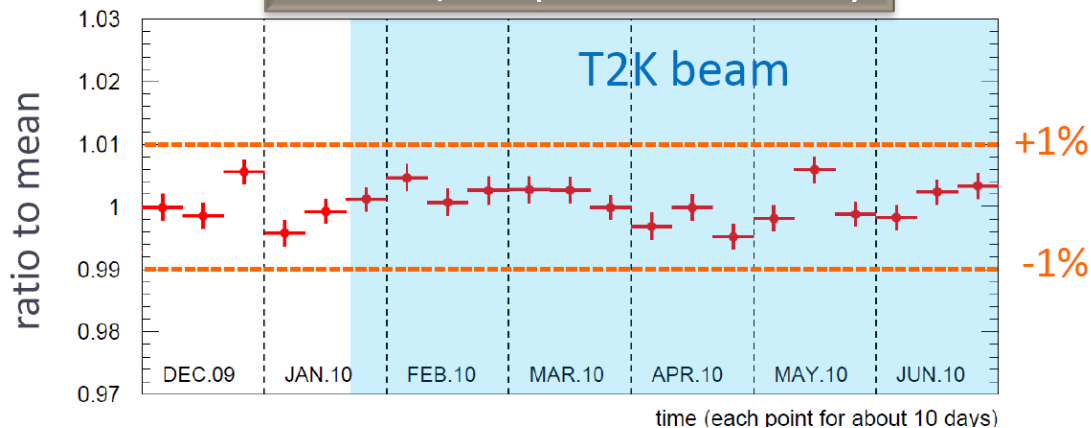
Stabilność w skali energii

Stopping μ (momentum/range)



RMS/MEAN
T2K period : 0.31%
(SK-IV all : 0.39%)

Decay-e (momentum)



RMS/MEAN
T2K period : 0.28%
(SK-IV all : 0.45%)

Mamy więc wszystkie elementy potrzebne do dwu kluczowych analiz T2K:

1. Zanikania ν_μ
2. Pojawiania się ν_e

Przykładowa strategia analizy: $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$

- Dla każdej kombinacji parametrów oscylacji obliczamy spodziewaną liczbę przypadków elektronowych (bez uwzględnienia systematycznych przesunięć)
- Skalujemy wynik współczynnikiem uzyskanym w analizie ν_μ CC)
- Uwzględniamy rozmycie przewidywania spowodowane przesunięciami pochodzącymi od niepewności systematycznych
- Uwzględniamy błąd statystyczny aplikując rozkład Poissona do uprzednio uzyskanego rozkładu

Niepewności systematyczne:

Error source	
SK Norm.	f^{SKnorm}
SK Energy Scale	f^{Energy}
SK Ring Counting	f^{Nring}
SK PID Muon	$f^{PID\mu}$
SK PID Electron	f^{PIDE}
SK POLfit Mass	f^{POLfit}
SK Decay Electron	f^{Ndecy}
SK π^0 Efficiency	f^{π^0eff}
CC QE shape	$f^{CCQEshape}$
CC 1π	$f^{CC1\pi}$
CC Coherent π	f^{CCcoh}
CC Other	$f^{CCother}$
NC $1\pi^0$	$f^{NC1\pi^0}$
NC Coherent π	f^{NCcoh}
NC Other	$f^{NCother}$
$\sigma(\nu_e)$	$f^{\sigma(\nu_e)}$
FSI	f^{FSI}
Beam Norm.	$f^{SK/ND}$
ND Efficiency	$f^{\epsilon_{ND}}$
Overall Norm.	f^{norm}
Total	

Podsumowanie

- Wszystkie kluczowe elementy eksperymentu działają bez zarzutu
- Osiągnięte 10^{20} POT
- Planowane dalsze zwiększanie mocy wiązki
- Rezultaty analizy oscylacyjnej zostaną opublikowane w najbliższym czasie



Backup

ν_e appearance

$$\begin{aligned}
 P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = & 4C_{13}^2 S_{13}^2 S_{23}^2 \sin^2 \Phi_{31} \\
 & + 8C_{13}^2 S_{12} S_{13} S_{23} (C_{12} C_{23} \cos \delta - S_{12} S_{13} S_{23}) \cos \Phi_{32} \cdot \sin \Phi_{31} \cdot \sin \Phi_{21} \\
 & - 8C_{13}^2 C_{12} C_{23} S_{12} S_{13} S_{23} \sin \delta \sin \Phi_{32} \cdot \sin \Phi_{31} \cdot \sin \Phi_{21} \\
 & + 4S_{12}^2 C_{13}^2 (C_{12}^2 C_{23}^2 + S_{12}^2 S_{23}^2 S_{13}^2 - 2C_{12} C_{23} S_{12} S_{23} S_{13} \cos \delta) \sin^2 \Phi_{21} \\
 & - 8C_{13}^2 S_{13}^2 S_{23}^2 (1 - 2S_{13}^2) \frac{aL}{4E_\nu} \cos \Phi_{32} \sin \Phi_{31}.
 \end{aligned}$$

$$\Phi_{ij} \equiv \Delta m_{ij}^2 L / 4E_\nu = 1.27 \Delta m_{ij}^2 [eV^2] L [km] / E_\nu [GeV],$$

Cele fizyczne

- ❖ Accumulate $3.75 \text{ MW} \cdot 10^7 \text{ s}$ beam on target
- ❖ Discover ν_e appearance:
 - ❖ $\sin^2 2\theta_{13}$ down to ~ 0.018 (3σ), ~ 0.008 (90%CL)
 - ❖ Precise sensitivity depends on systematic errors and Δm_{23}^2
- ❖ Precise measurement of ν_μ disappearance:
 - ❖ $\delta(\Delta m_{23}^2) \sim 1 \times 10^{-4} \text{ eV}^2$, $\delta(\sin^2 2\theta_{23}) \sim 1\%$