

Badania tła do sygnału oscylacji neutrin poszukiwanego w eksperymentcie T2K (Tokai2Kamioka)

Paweł Przewłocki
Warszawska Grupa Neutrinowa
Instytut Problemów Jądrowych



Kontekst i plan

- Kontekst: badania, które robiłem w ramach pracy doktorskiej
- Plan:
 - Oscylacje neutrin
 - Eksperyment T2K
 - Oszacowanie niepewności przekrojów czynnych na produkcję pionów w T2K
 - Oszacowanie wkładu od przypadków wielopionowych

Oscylacje neutrin – 2

zapachy

- **Kwantowomechaniczne zjawisko**, którego efektem jest zmiana zapachu neutrin po przebyciu odpowiedniej drogi
- Warunek: neutrina muszą mieć masę
- Przyjmujemy, że stany własne zapachu są pewną kombinacją stanów własnych masy (tu dla dwóch zapachów neutrin):

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

- Stany własne masy propagują się z różną prędkością
 $\nu_1(t) = \nu_1(0) \exp(-iE_1 t)$
 $\nu_2(t) = \nu_2(0) \exp(-iE_2 t)$

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

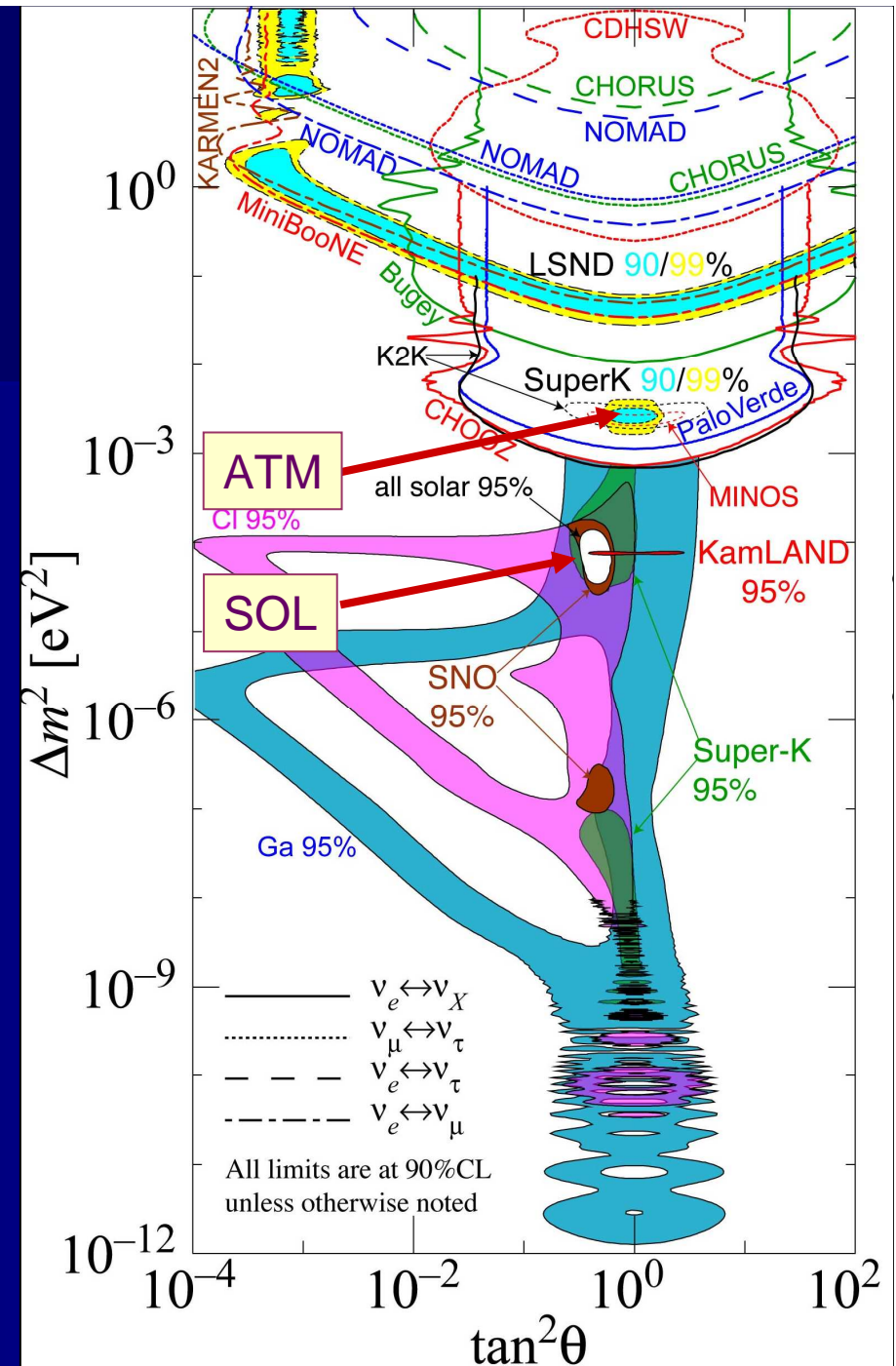
Oscylacje neutrin

- Na początek - dwa zapachy...

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

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

- ...i dwa parametry: kąt mieszania, kwadrat różnicy mas
- Dwa zestawy rezultatów: 'atmosferyczne' (małe L/E) i 'słoneczne' (duże L/E)
- > jesteśmy przekonani, że oscylują 3 zapachy



Oscylacje neutrin

- Obserwujemy:

- W eksperymentach „słonecznych”

$$\nu_e \longrightarrow \nu_{\mu\tau}, \bar{\nu}_e \longrightarrow \bar{\nu}_{\mu\tau}$$

- W eksperymentach „atmosferycznych”

$$\nu_{\mu} \longrightarrow \nu_{\tau}$$

- W eksperymentach „atmosferycznych” nigdy nie udało się zaobserwować

$$\nu_{\mu} \longrightarrow \nu_e$$

Oscylacje neutrin

ZAPACH

MASA

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{13} & 0 & \sin \theta_{13} e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_{13} e^{-i\delta} & 0 & \cos \theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} & 0 \\ \sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

„atmosferyczne”

SK, K2K, MINOS

CHOOZ

„słoneczne”

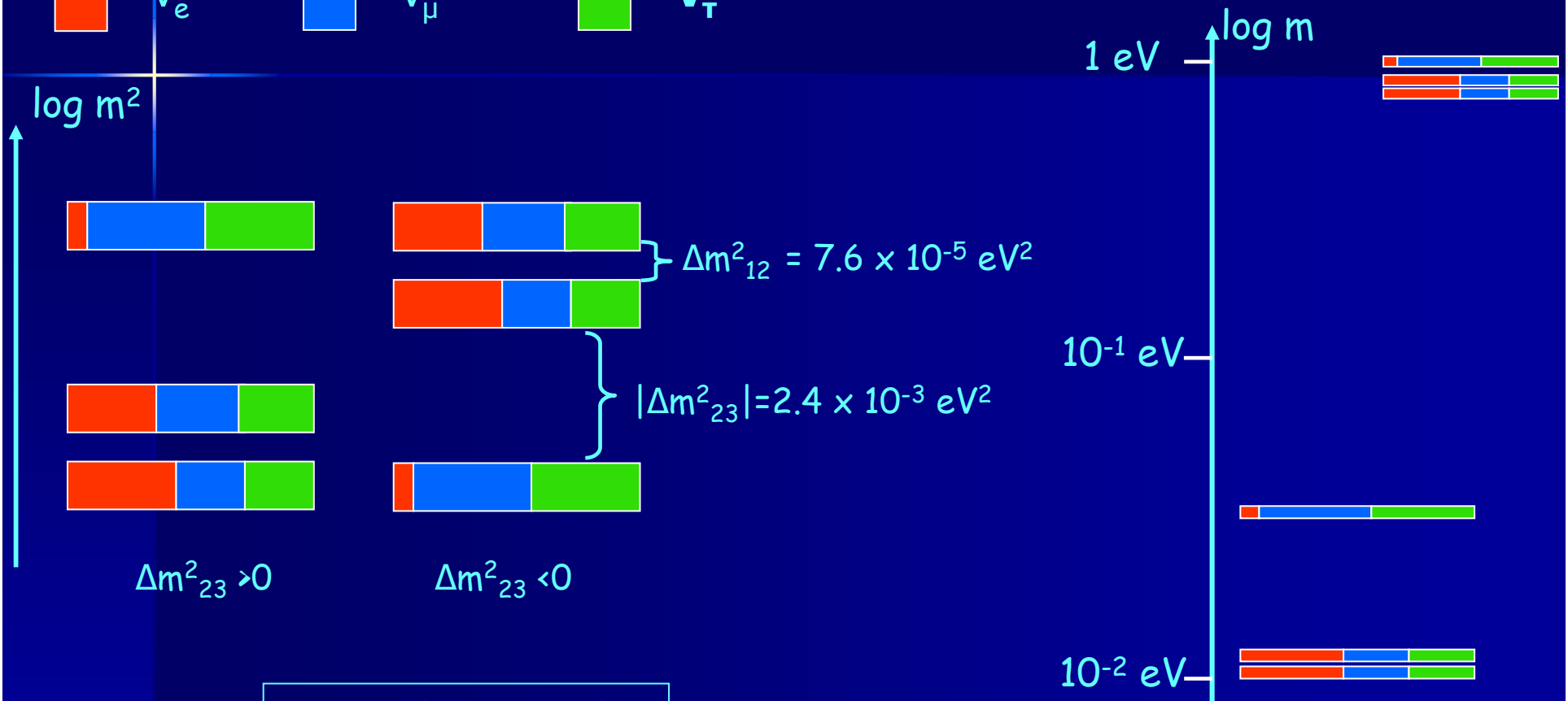
SNO, KamLand

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.

Masy neutrin

■ ν_e
 ■ ν_μ
 ■ ν_τ



Mass hierarchy

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

Nowa faza w rozwoju fizyki neutrin

■ I etap

- zwiększenie precyzji pomiarów uprzednio zmierzonych parametrów oscylacji
- Pomiar θ_{13}

■ II etap

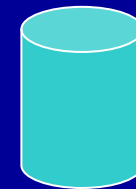
- Zbadanie symetrii CP w sektorze neutrinowym (potrzebny pomiar θ_{13})

■ Realizacja celów – 2 podejścia

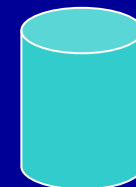
- Eksperymenty reaktorowe (Double Chooz – Francja, Daya Bay – Chiny) – wyznaczenie θ_{13} gdy odpowiednio duże
- Silne wiązki akceleratorowe (**T2K – Japonia**, Nova – USA) – niskie wartości θ_{13} , możliwość badania hierarchii mas (efekty materii) i CP

Jak mierzymy oscylacje ν_μ ?

- Produkuje wiązki neutrin mionowych, pozwalamy im przelecieć odpowiednią drogę i:
 - Patrzymy ile ubyło nam z wiązki neutrin mionowych
 - Szukamy neutrin elektronowych w detektorze



- Ale nie potrafimy wyprodukować czystej wiązki mionowej. Żeby więc badać efekty tylko oscylacji, musimy oszacować poziom zanieczyszczenia elektronowego – dodatkowy detektor przy źródle wiązki

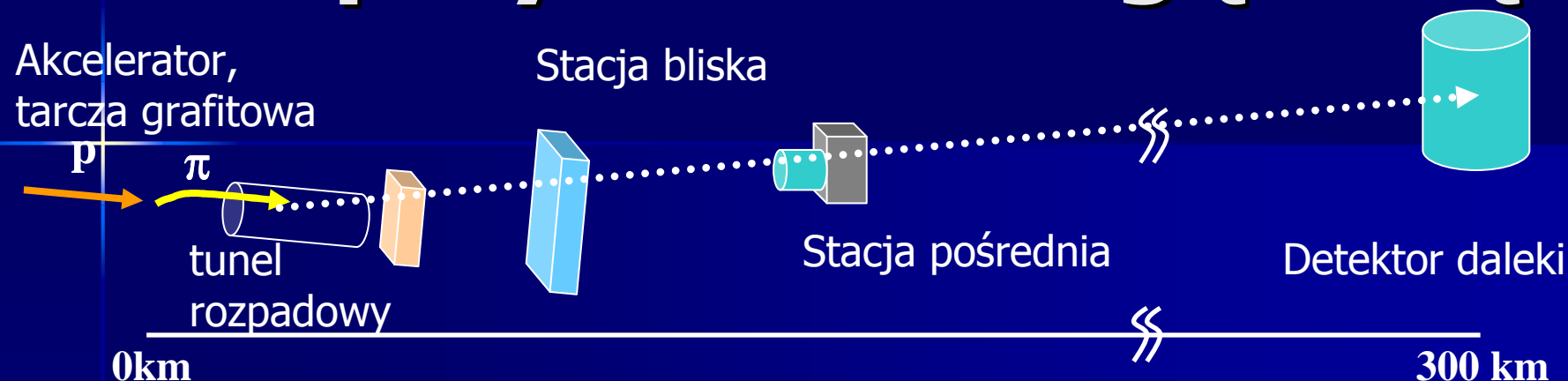


- Bliski detektor możemy też użyć do oszacowań tła eksperymentalnego w dalekim detektorze

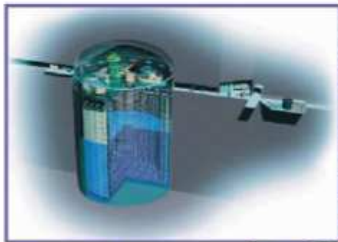
Eksperymment Tokai2Kamioka



Eksperyment z długą bazą



- L/E rzędu 300km/GeV
- Długa baza
- Silna wiązka
- L – 300km -> E koło 1GeV
- Duży detektor daleki
- Dobrze znana technika detekcji
- Detektory poza osią wiązki
- Monitorowanie wiązki
- Kontrola tła eksperymentalnego
- Dodatkowe pomiary wiązki nieoscyłowanej
- Przekroje czynne



Super-Kamiokande
(ICRR, Univ. Tokyo)



J-PARC Main Ring
(KEK-JAEA, Tokai)



Canada

- TRIUMF
- U. of Alberta
- U. of British Columbia
- U. of Regina
- U. of Toronto
- U. of Victoria
- York U.

France

- CEA Saclay
- IPN Lyon
- LLR E. Poly
- LPNHE-Paris

Germany

- RWTH Aachen U.

Italy

- INFN Bari
- INFN Roma
- Napoli U.
- Padova U.
- Rome U.

Japan

- Hiroshima U.
- ICRR Kamioka
- ICRR RCCN
- KEK
- Kobe U.
- Kyoto U.
- Miyagi U. of Edu
- Osaka City U.

U. of Tokyo

- Korea**
- Chonnam Nat'l U.
- Dongshin U.
- Sejong U.
- Seoul Nat'l U.
- Sungkyunkwan U.

Poland

- SINS Warsaw**
- NINP Krakow**
- Warsaw Technical U**
- U. of Silesia
- Warsaw U.
- Wroclaw U.

Russia

- INR
- Spain**
- IFIC, Valencia
- U.A. Barcelona

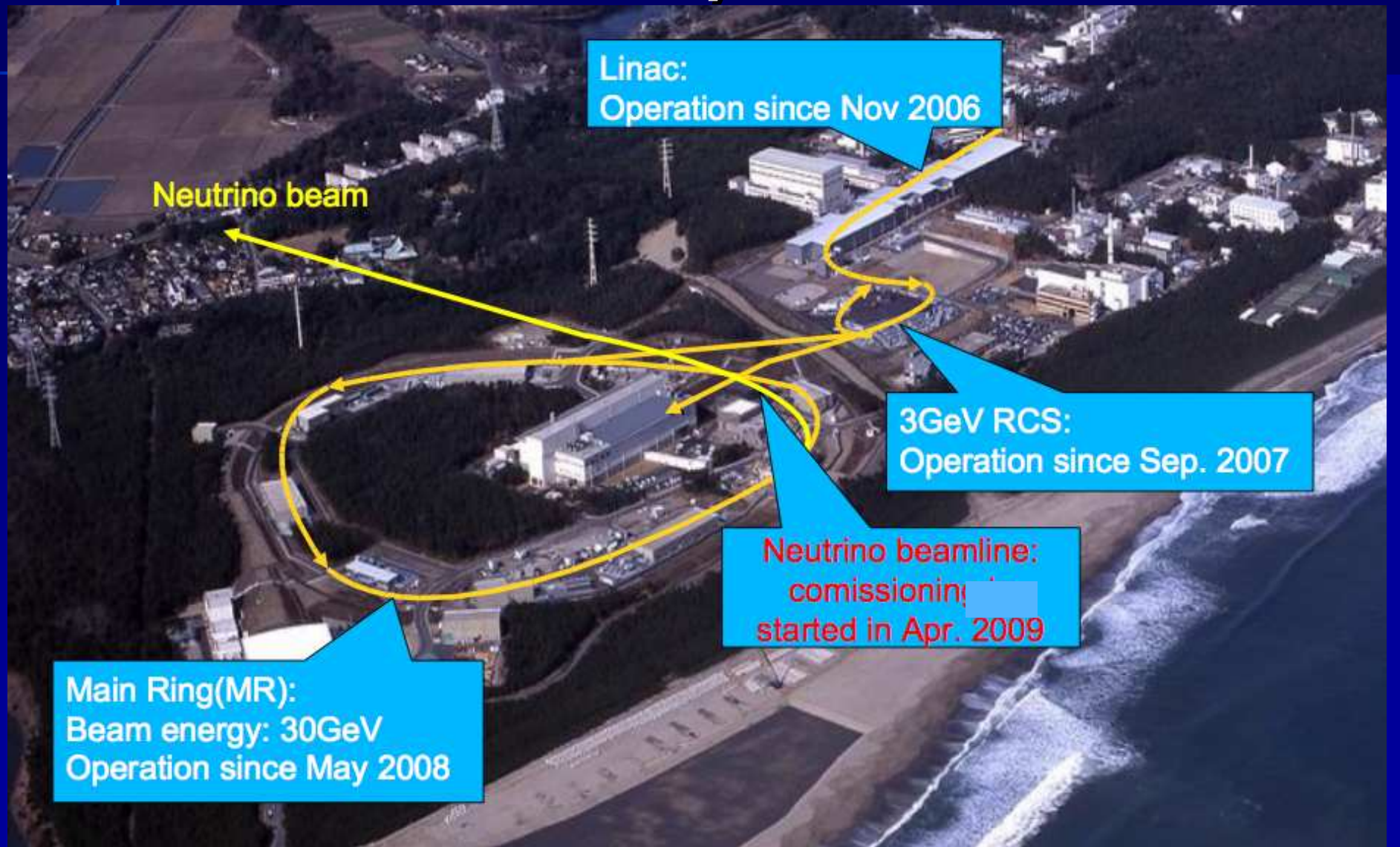
Switzerland

- Bern
- ETHZ
- U. of Geneva
- UK**
- U. of Oxford
- Imperial C. London
- Lancaster U.
- Queen Mary, U. of L.
- Sheffield U.

STFC/RAL

- U. of Liverpool
- U. of Warwick
- USA**
- Boston U.
- BNL
- Colorado State U.
- Duke U.
- Louisiana State U.
- Stony Brook U.
- U. of California, Irvine
- U. of Colorado
- U. of Pittsburgh
- U. of Rochester
- U. of Washington

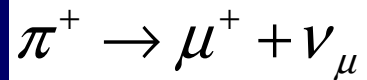
Laboratorium akceleratorowe J-PARC w Tokai, Ibaraki



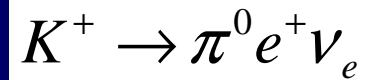
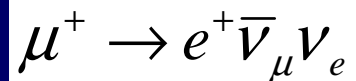
Off-axis beam

- Proton beam (30 GeV) hits the graphite target and produces hadrons, mostly pions

- The pions decay:

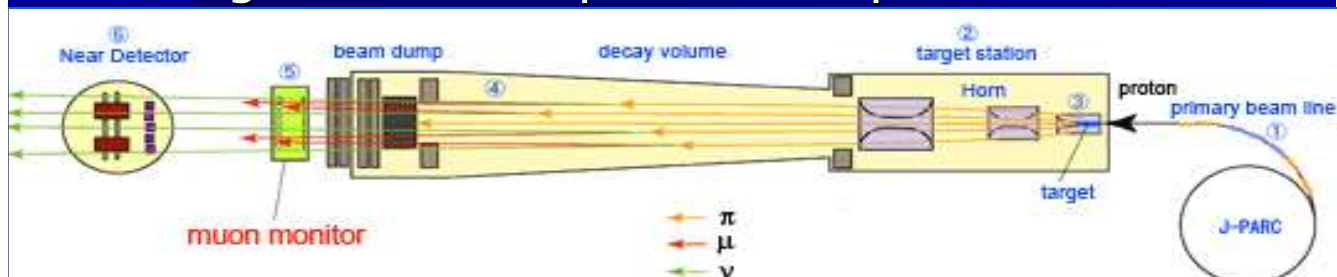
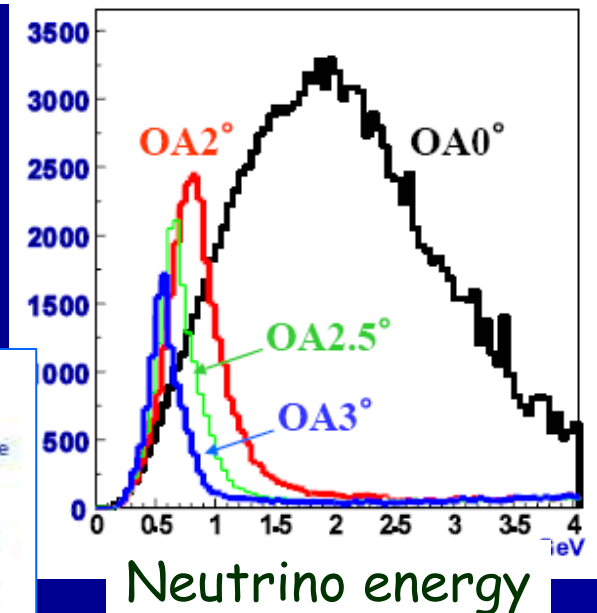
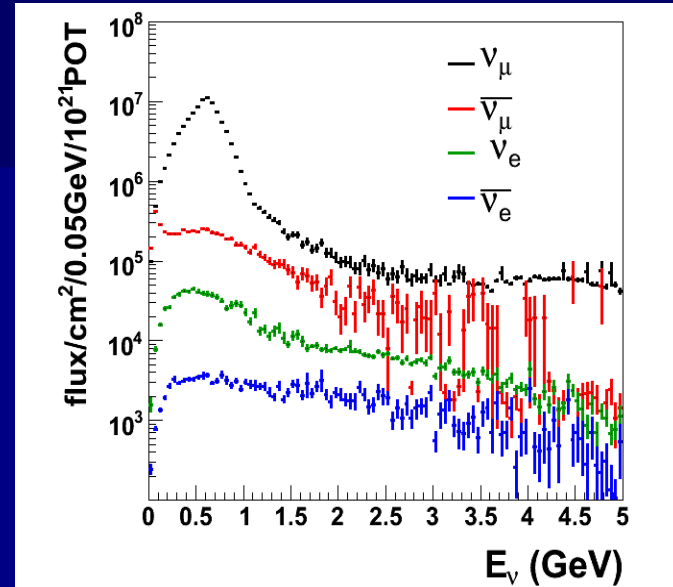


- Beam contamination:

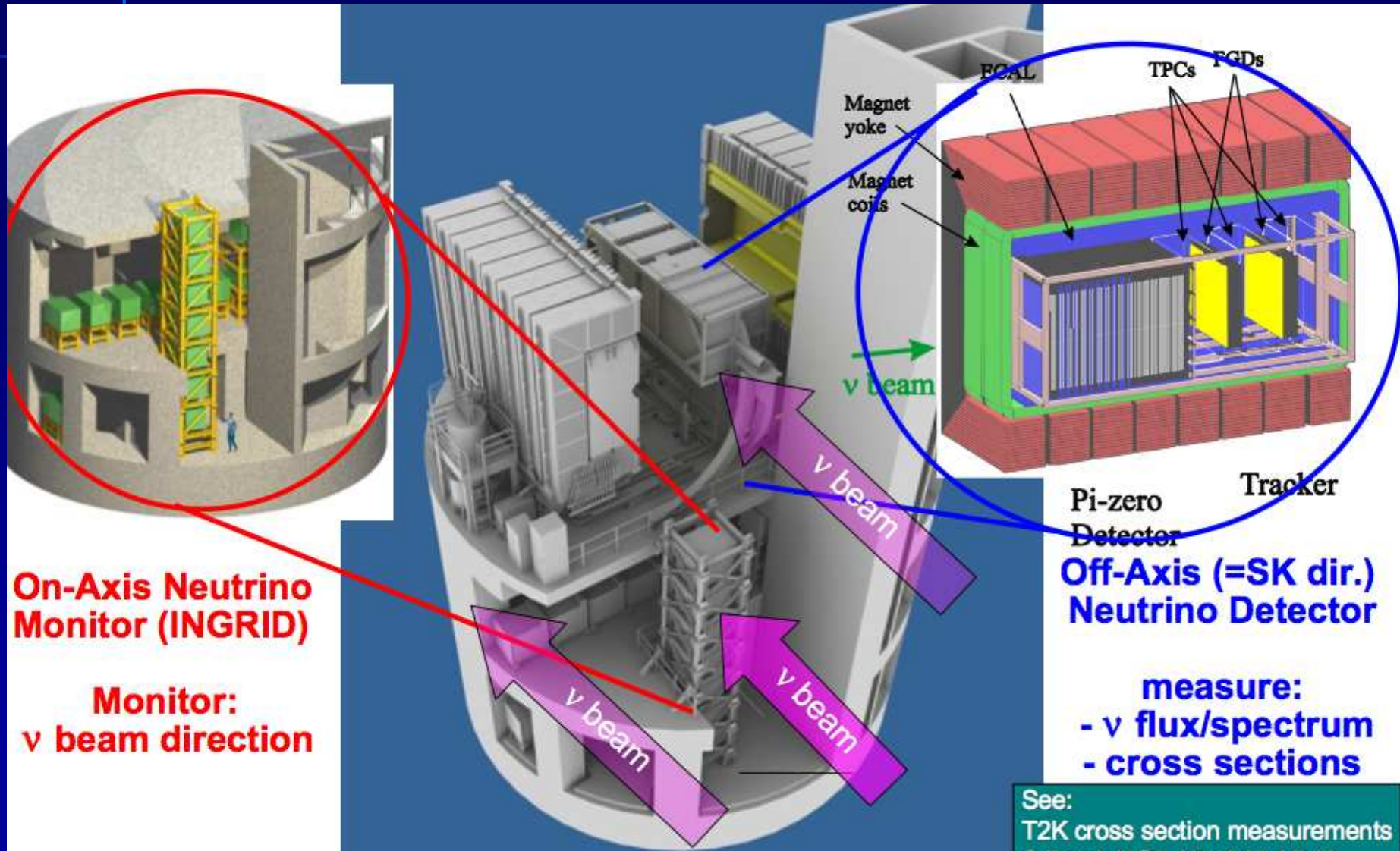


- Detectors are situated off-axis to get favorable spectrum shape

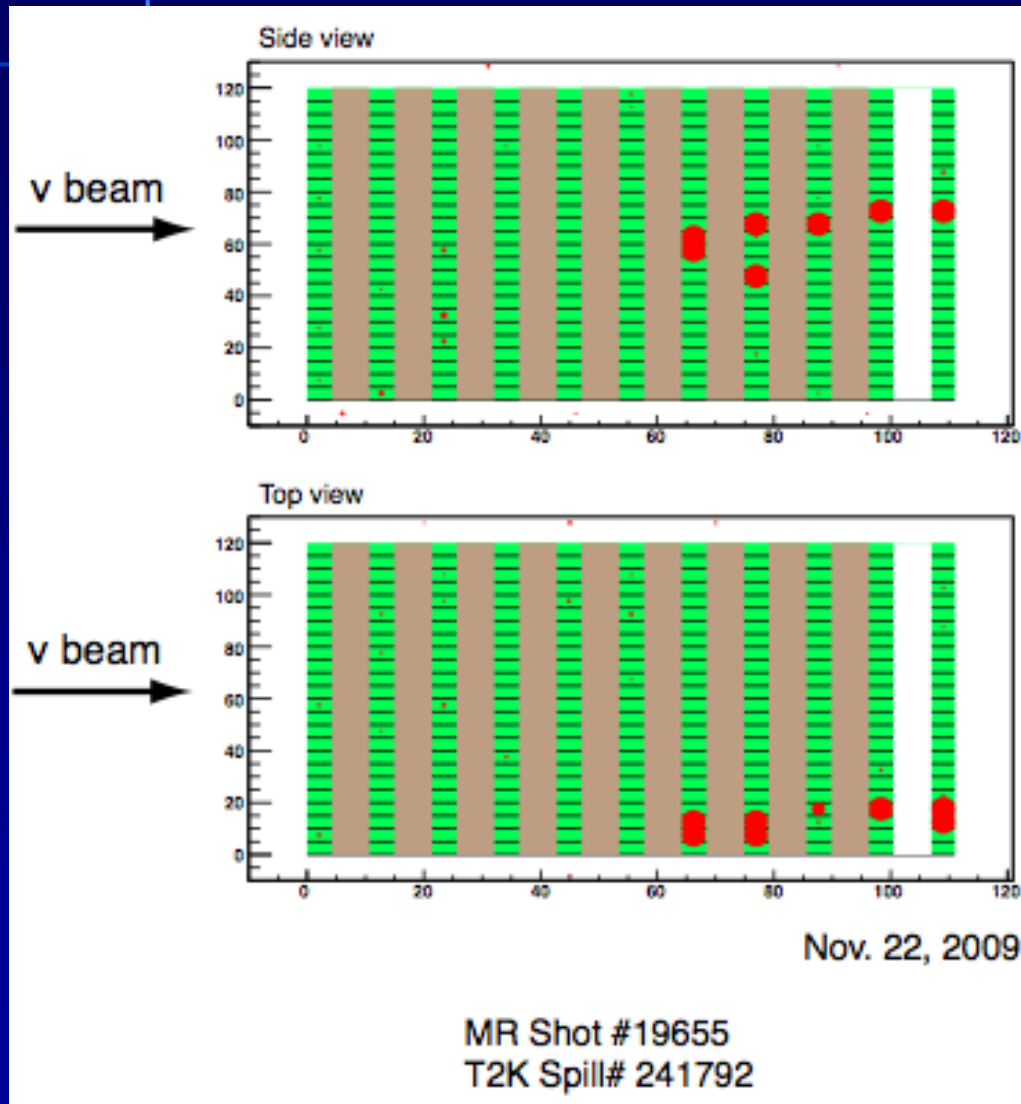
T2K beam



Near Station – ND280



First neutrino event in ND280



INGRID

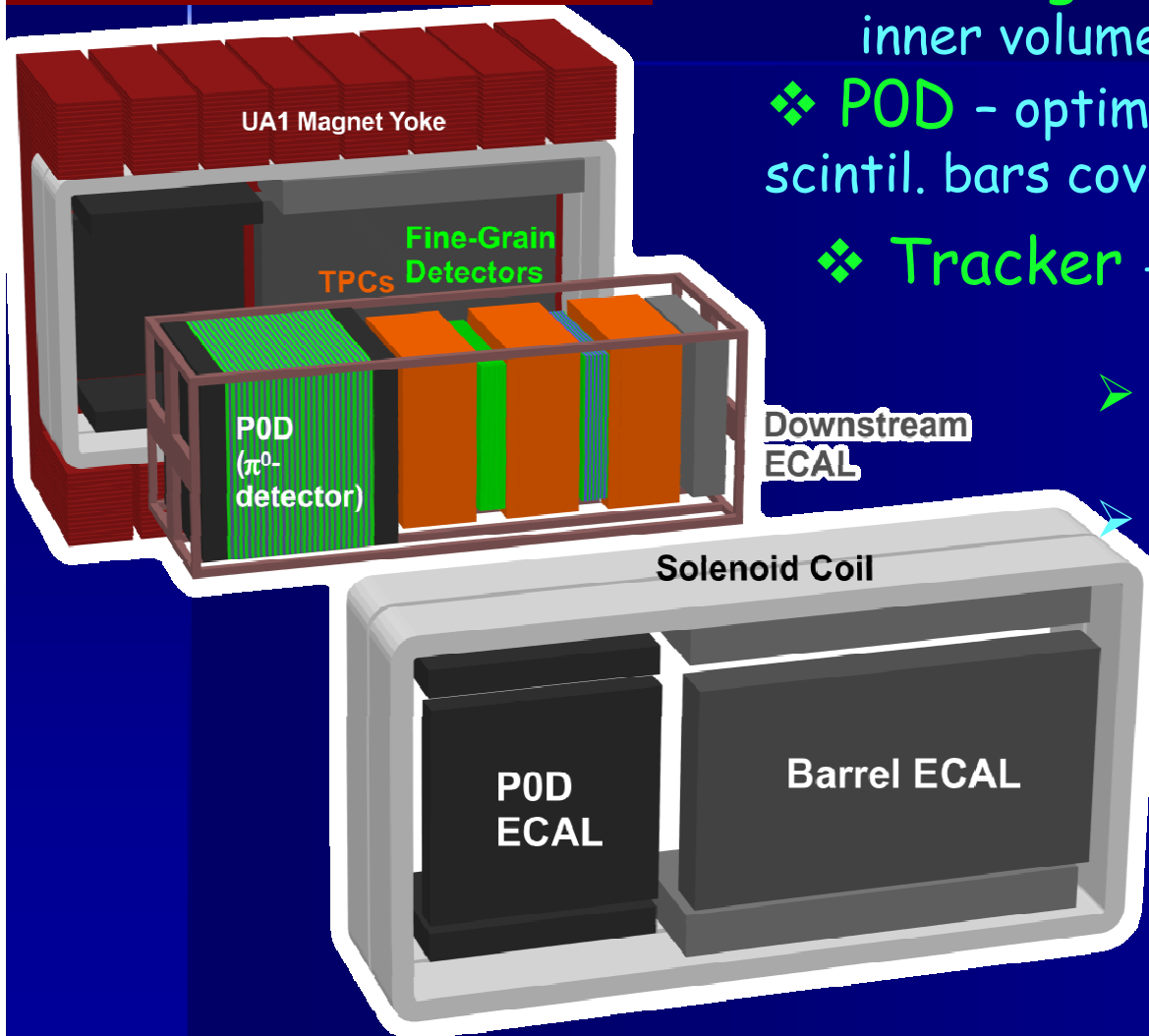
- on axis detector
to determine beam's direction
and profile

Consists of 14 modules

Every module ($1 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$)
composed of 11 alternating
planes of plastic scintillators
($5 \times 1 \times 100 \text{ cm}^3$)
and iron plates (6.5 cm thick)

ND280 off-axis detector

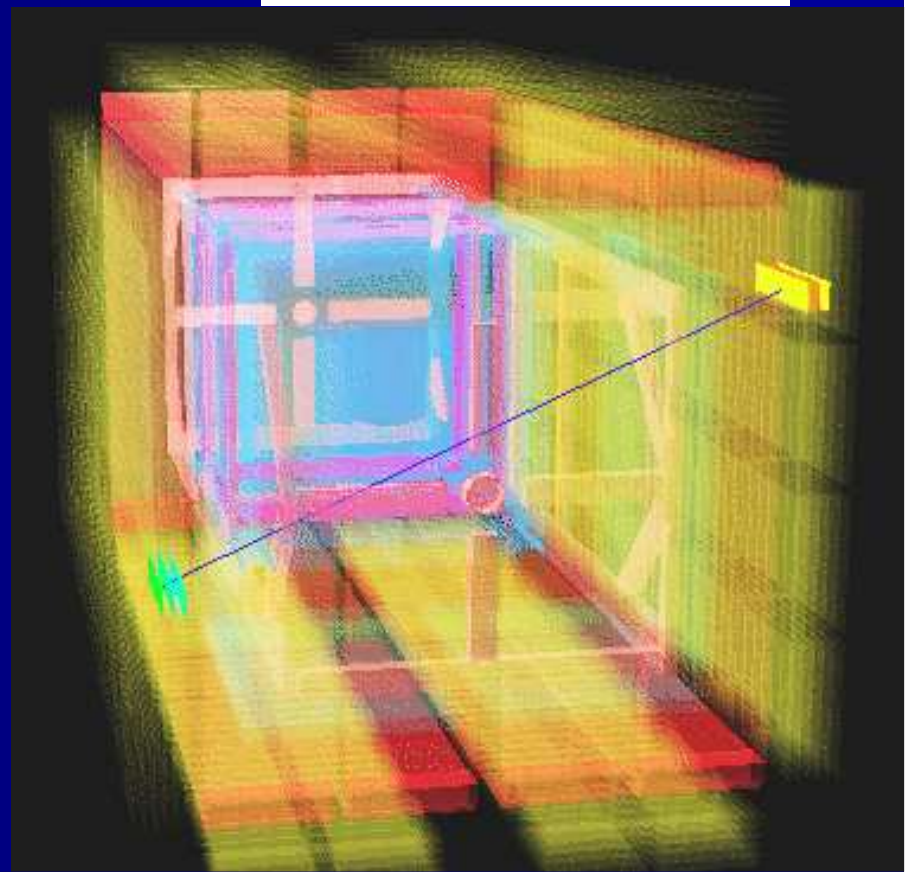
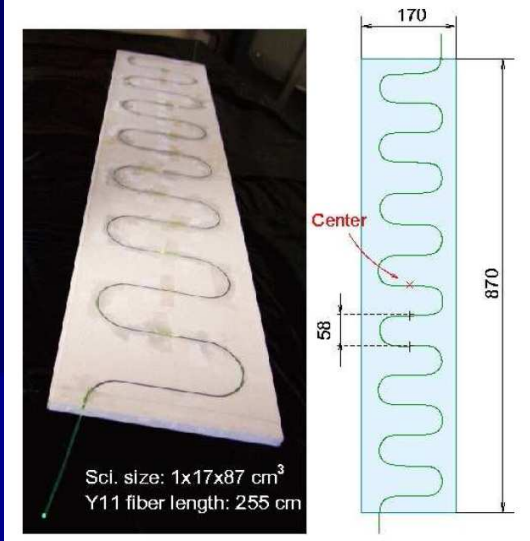
SMRD counters in magnet slits



- ❖ UA1 magnet 0.2 T
inner volume $3.5 \times 3.6 \times 7 \text{ m}^3$
- ❖ POD - optimized for NC π^0 production
scintil. bars covered with lead & water layers
- ❖ Tracker - optimized for neutrino
spectrum determination
 - FGD (to select CCQE events)
scintil bars and water layers
 - TPC (e/ μ separation and
momentum measurement)
- ❖ ECAL - emgt calorimet.
- ❖ SMRD - muon ranger

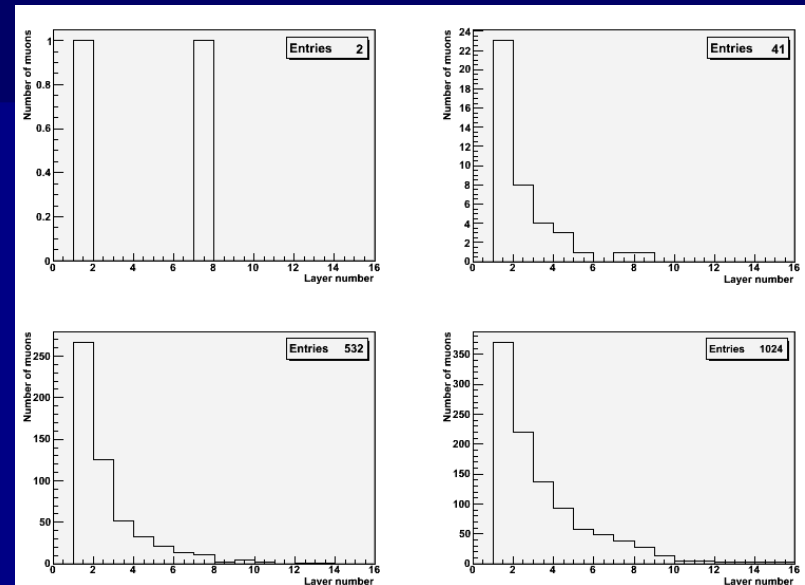
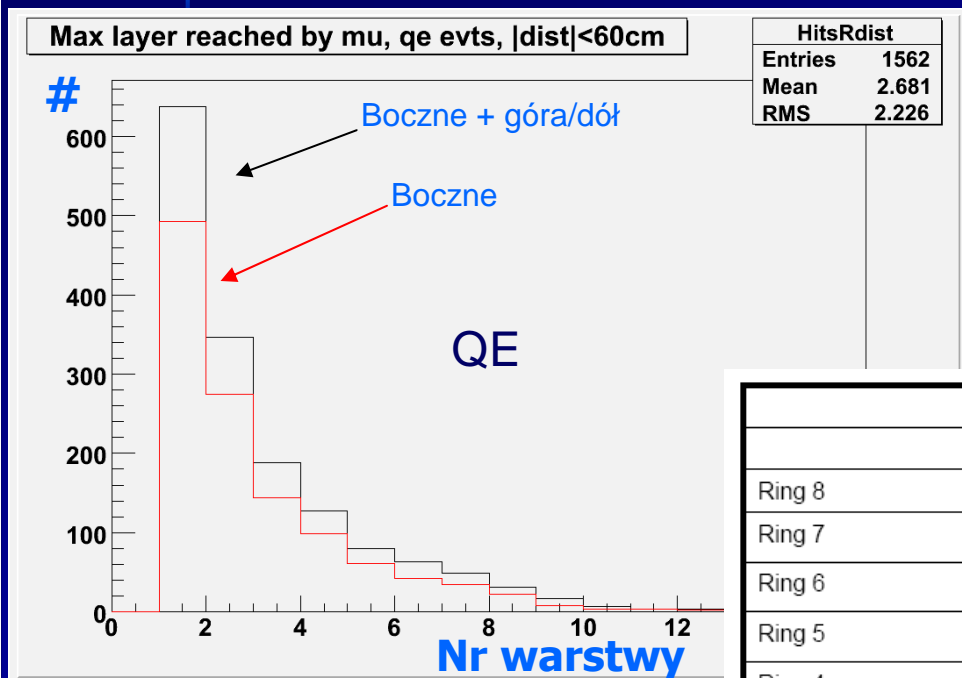
SMRD

- Side Muon Range Detector
- Scintillator modules placed in slits in the magnet
- Aims:
 - Measurement of high energy muons from muon neutrino interactions
 $\nu N \rightarrow \mu N'$
 - Cosmic ray muon measurements for triggering and monitoring
- First cosmic ray muon and neutrino data started to be taken



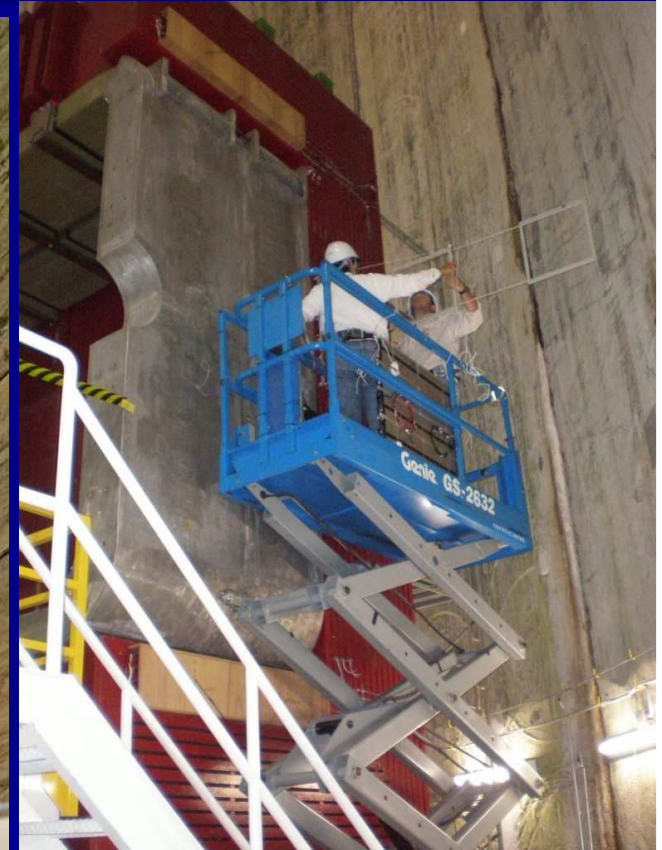
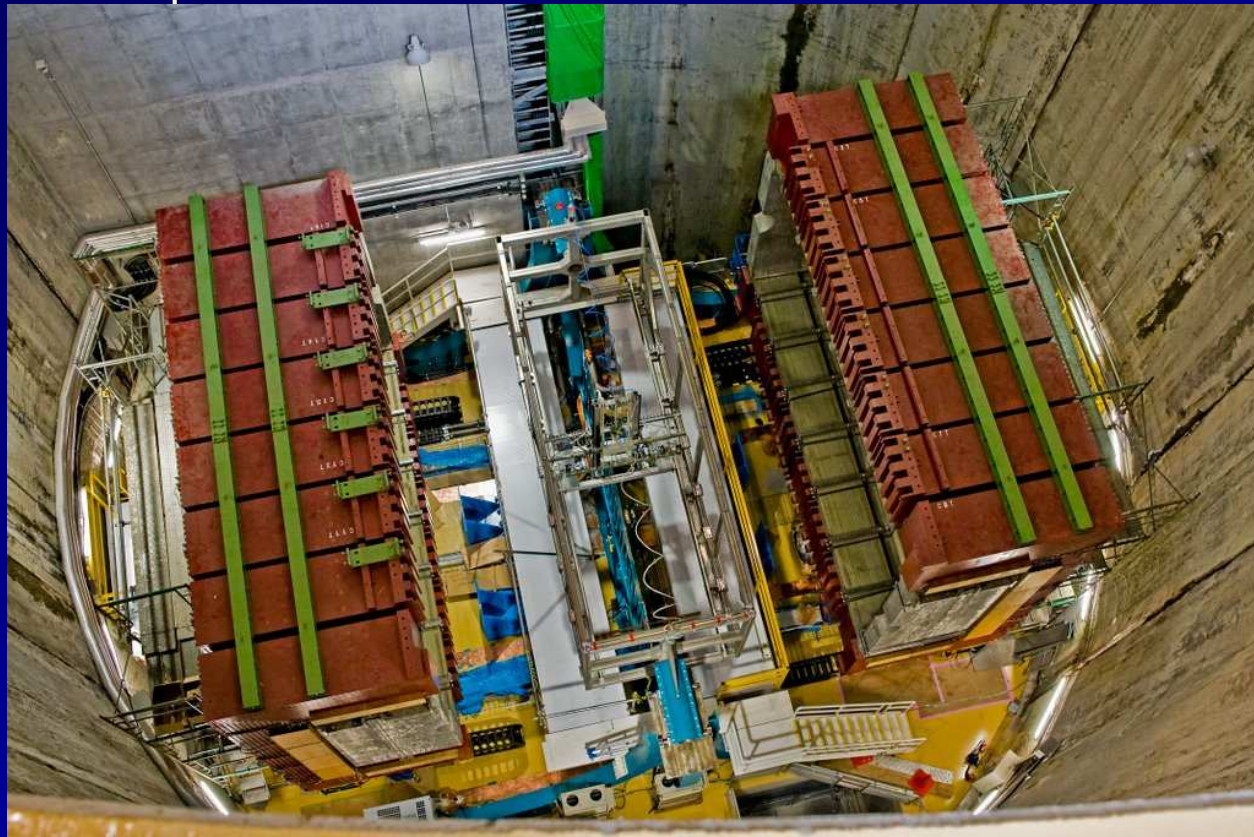
Optymalizacja SMRD

- Szukamy optymalnego ułożenia scyntylatorów w magnesie

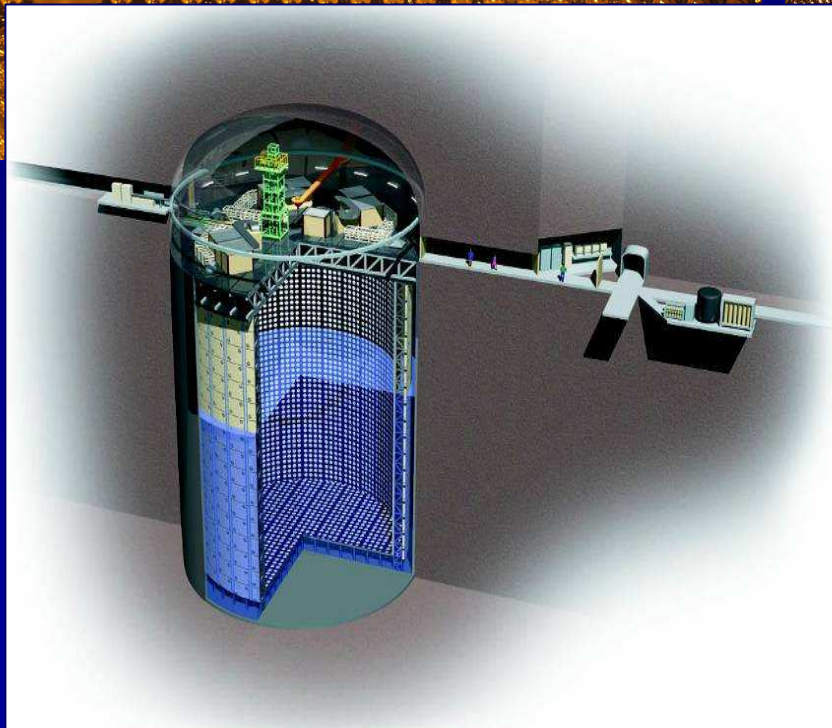
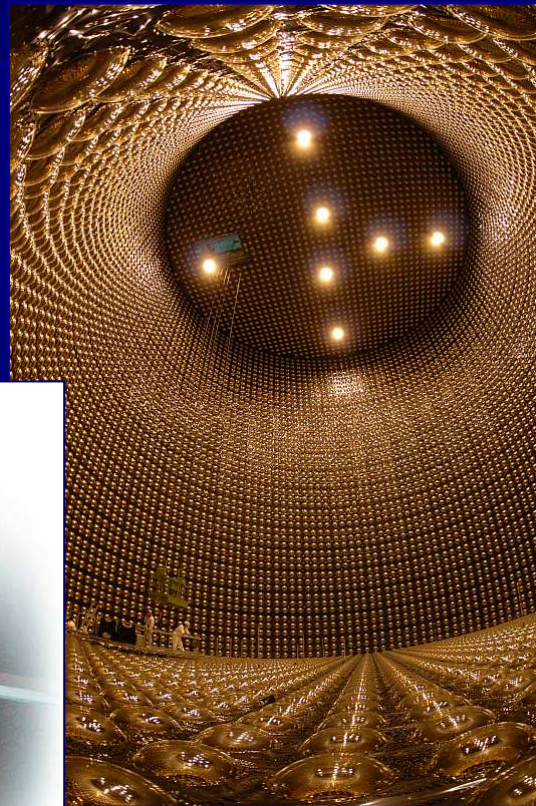


	Left/right		Top/bottom		# modules
	layers	modules	Layers	modules	
Ring 8	6	48	3	24	72
Ring 7	6	48	3	24	72
Ring 6	4	32	3	24	56
Ring 5	3	24	3	24	48
Ring 4	3	24	3	24	48
Ring 3	2	16	3	24	40
Ring 2	2	16	3	24	40
Ring 1	2	16	3	24	40
Total		224		192	416

Installation of magnet and SMRD (2008-2009)



SuperKamiokande



Large water Cherenkov detector

50kton of water,
22.5kton fiducial
volume

>11,000 PMT's

- Detector well tested during over 10 years of data taking (SK standalone, K2K), systematics very well known
- All front-end electronics and on-line systems renovated
- GPS based system selects events correlated with T2K beam spills

Pierwszy przypadek T2K

- Zarejestrowany 24. lutego 2010
- Widoczne dwa pierścienie wyprodukowane przez gammy z rozpadu pionu neutralnego $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$

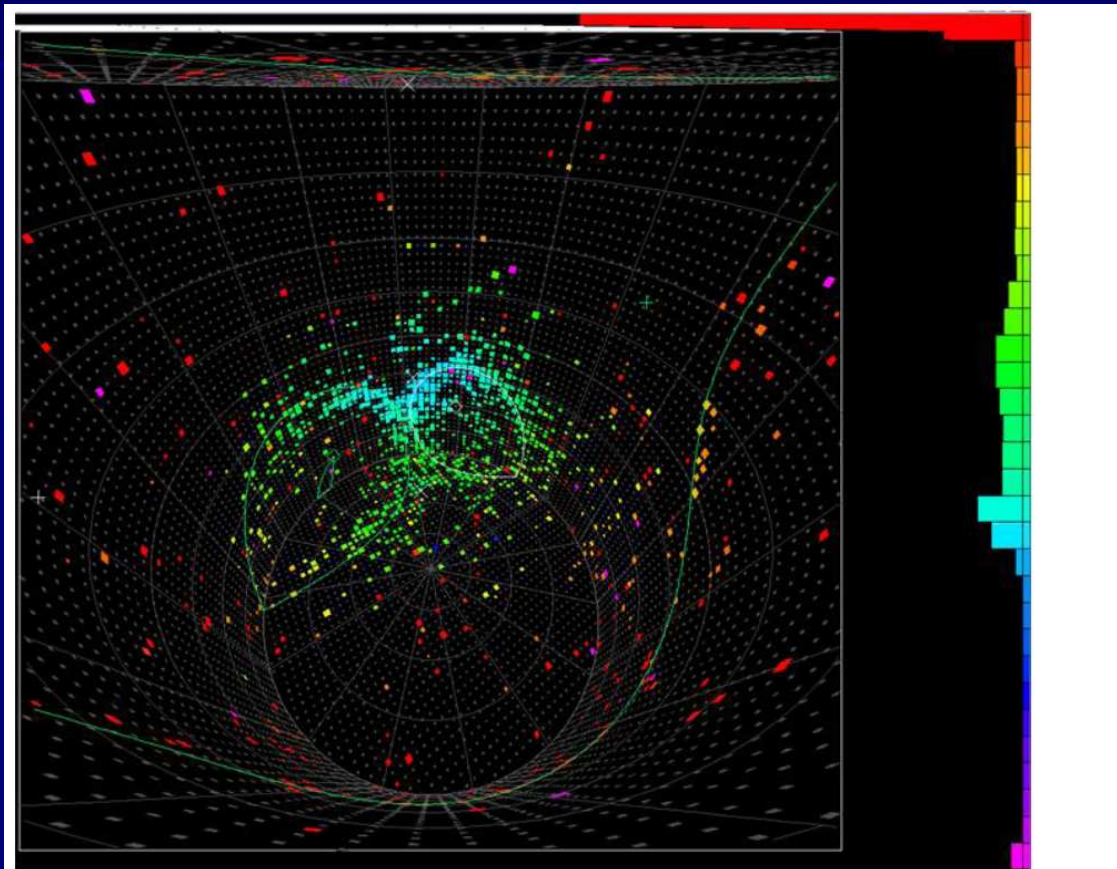
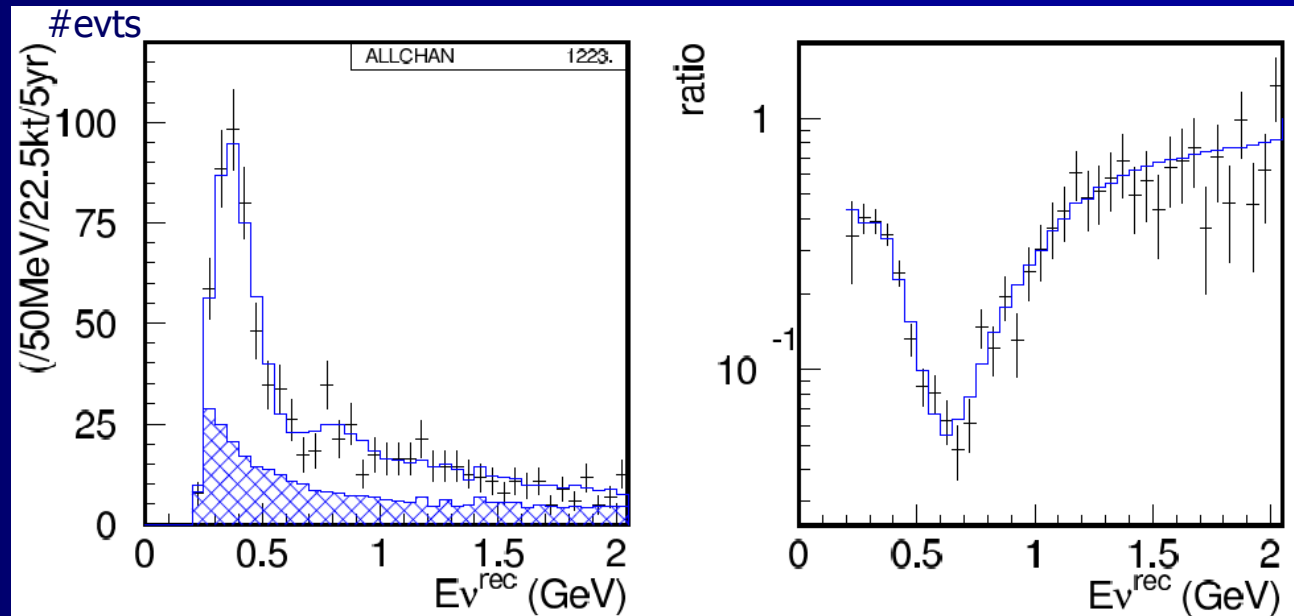


Figure 3 The first T2K event seen in Super-Kamiokande. Each dot is a PMT which has detected light. The two circles of hits indicate that a neutrino has probably produced a particle called a π^0 , perfectly in time with the arrival of a pulse of neutrinos from J-PARC. Another faint circle surrounds the viewpoint of this image, showing a third particle was created by the neutrino.

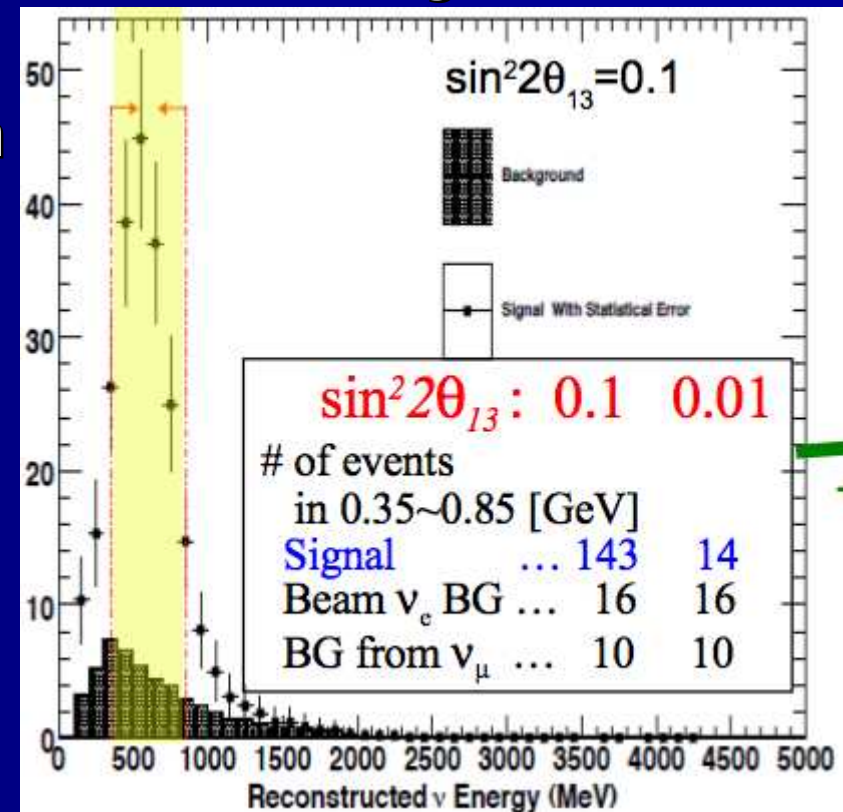
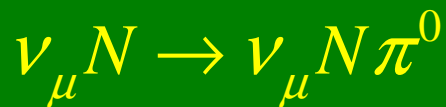
T2K measurements (1)

- Muon neutrino disappearance
 - We measure flux of surviving muon neutrinos and compare it with unoscillated flux
 - Careful rejection of non-quasielastic events is essential along with knowledge of initial neutrino spectrum shape



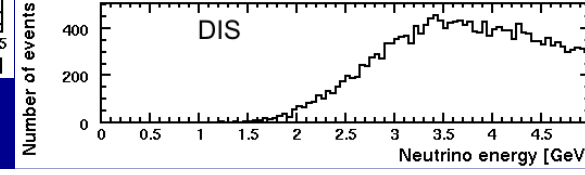
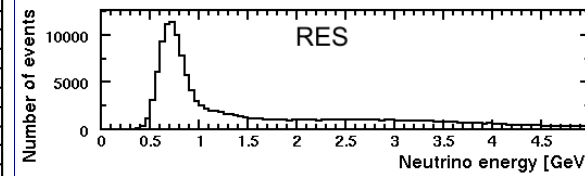
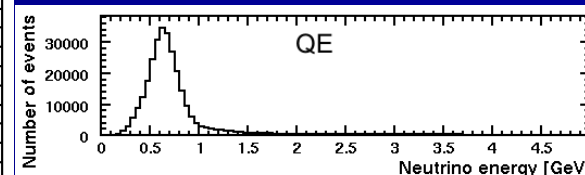
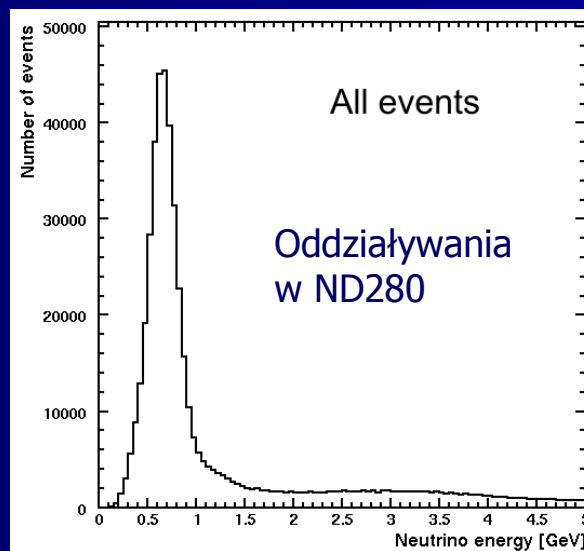
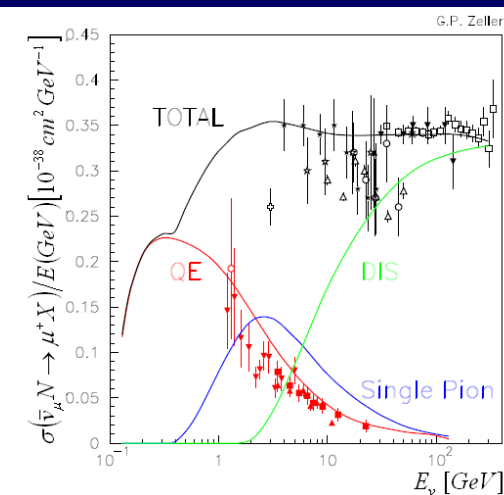
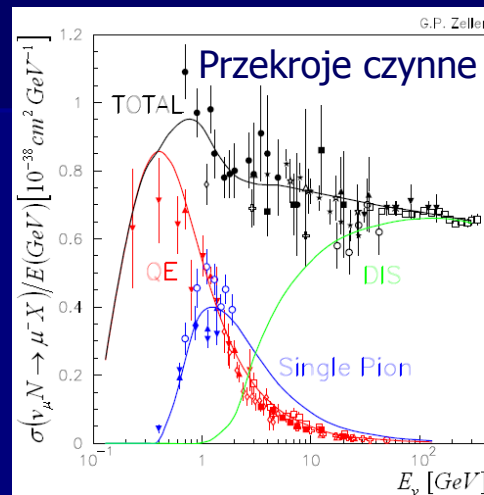
T2K measurements (2)

- Electron neutrino appearance (θ_{13} !)
 - We look for electron neutrinos resulting from oscillations
 - Background #1 – beam contamination
 - Background #2 – NC neutral pion production



Oddziaływania neutrin w T2K, produkcja rezonansowa pionów

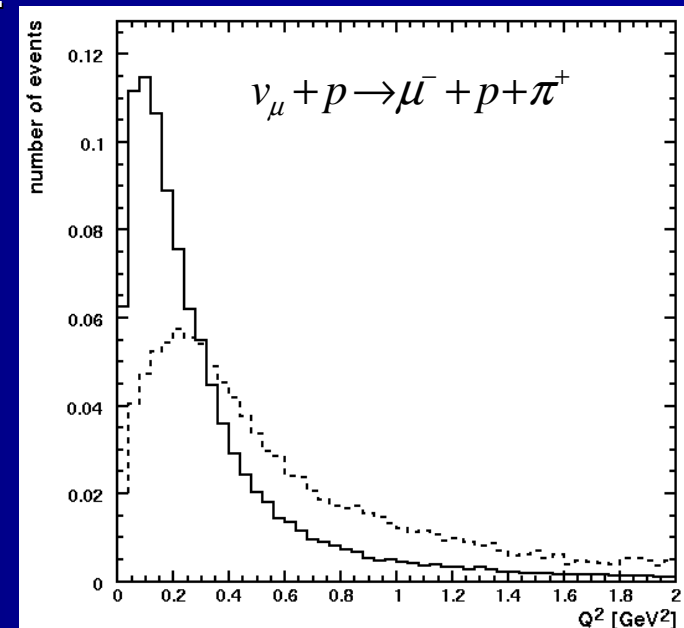
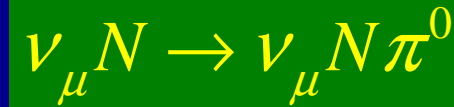
- Trzy dominujące typy reakcji – quasielastyczne (QE), rezonansowe (RES), głęboko nieelastyczne (DIS)
- CCQE najprostsze w rekonstrukcji, używane do uzyskania widma wiązki i przekrojów czynnych w ND280
- Dla energii charakterystycznych dla T2K (~ 1 GeV) najistotniejszym źródłem pionów jest produkcja za pośrednictwem rezonansów, głównie $\Delta(1232)$
- Przekroje czynne są parametryzowane przez funkcje struktury, wektorowe (znane z eksperymentów elektronowych) i aksjalne (znane słabo, bo możliwe do uzyskania tylko w rozpraszaniu neutrin)



Symulacje dla T2K ->

Jak przewidzieć NC produkcję pionów neutralnych w SK?

- Ten kanał jest **tłem** dla pojawiania się neutrin elektronowych w dalekim detektorze
- Możemy zmierzyć ten kanał w **ND280**, jednak dla takich przypadków **niemożliwa jest rekonstrukcja energii neutrina** a profil energetyczny wiązki w ND280 jest różny od tego w SK
- Inne podejście: zmierzmy w ND280 produkcję rezonansową w kanale w którym rekonstruujemy energię: **produkcji CC pionów naładowanych**. Uzyskane rezultaty **modelowo przeniesiemy** na produkcję NC π^0 (te same parametry funkcji struktury). Analiza detektorowa w ND280 pokazuje jednak, że dla produkcji CC pionów naładowanych obserwujemy znaczący deficyt przypadków przy małym Q^2 – taka analiza jest obarczona wielkim błędem
- Musimy skorzystać z innych danych -> dysponujemy starymi **pomiarami z komór pęcherzykowych**
- Istotne jest również wyznaczenie **niepewności takiego oszacowania**



Produkcja pionów w T2K – moja analiza

Chcemy oszacować przekrój
czynny oraz jego modelową
niepewność

Korzystamy z danych ze starych
komór pęcherzykowych

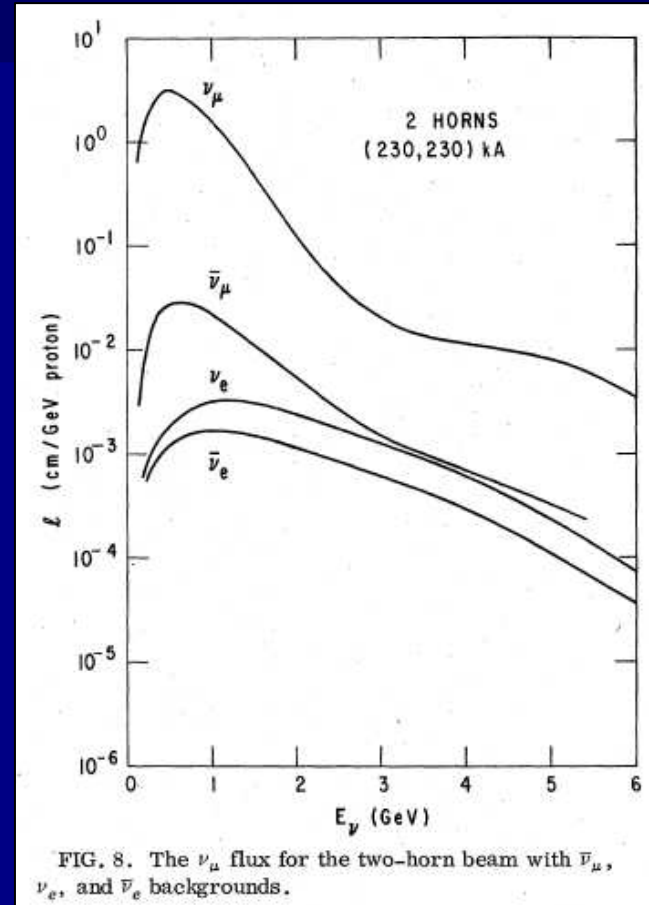
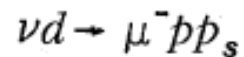
- **Model**
Formalizm Rarity-Schwingera dla
wzbudzenia $\Delta(1232)$
- **Dane**
Eksperymenty ANL i BNL (dane
neutrino-deuteron)
- **Fit**
Dwa parametry aksjalnych funkcji
struktury dopasujemy do danych
- **Symulacja i porównanie**
Za pomocą symulacji NuWro szacujemy
niepewność w interesujących nas
kanałach
- **Oszacowanie**
Ostatecznie, jaka jest niepewność?

Dane – ANL, BNL

ANL (Argonne National Lab, lata 70.)

BNL (Brookhaven National Lab, lata 80.)

- Szeroka wiązka neutrino mionowych do 6GeV/15GeV, maksimum w 0.5GeV/1.2GeV
- Detektor – komora pęcherzykowa wypełniona wodorem lub deuterem, w polu magnetycznym
- Lekkie jądra (deuter) – obserwowalne protony spektatory o pędzie powyżej 100MeV/c
- Gammy wylatują z detektora – nie rejestrujemy pizer
- Pomiary przekrojów czynnych: QE, produkcja pionów naładowanych
- QE:



- Przypadki rejestrowane fotograficznie na kliszy i skanowane!

Model

Produkcja Δ^{++} :

$$\sigma_{th}(E, Q^2, W) \equiv \frac{d^2\sigma}{dW dQ^2} = \frac{\tilde{G}^2 W}{64\pi^2 M E^2} L^{\mu\nu} W_{\mu\nu},$$

Tensor hadronowy zależy od wektorowych i aksjalnych funkcji struktury $W_{\mu\nu}(C^V_i, C^A_i)$

- Rezonansowy model Rarity-Schwingera dla Delty(1232) – dobre przybliżenie w okolicach 1 GeV
- Aksjalny form-faktor z 2 parametrami: masą aksjalną M_A and $C^A_5(0)$

Przyjmujemy, że najistotniejsza aksjalna funkcja struktury ma postać dipolową:

$$C^A_5(Q^2) = \frac{C^A_5(0)}{\left(1 + \frac{Q^2}{M_A^2}\right)^2}$$

K.Graczyk, J. T. Sobczyk, Phys. Rev. D 77, 053001 (2008)

K.Graczyk, J. T. Sobczyk, Phys. Rev. D 77, 053003 (2008)

K.Graczyk, J. T. Sobczyk, Phys. Rev. D 79, 079903(E) (2009)

Dopasowanie

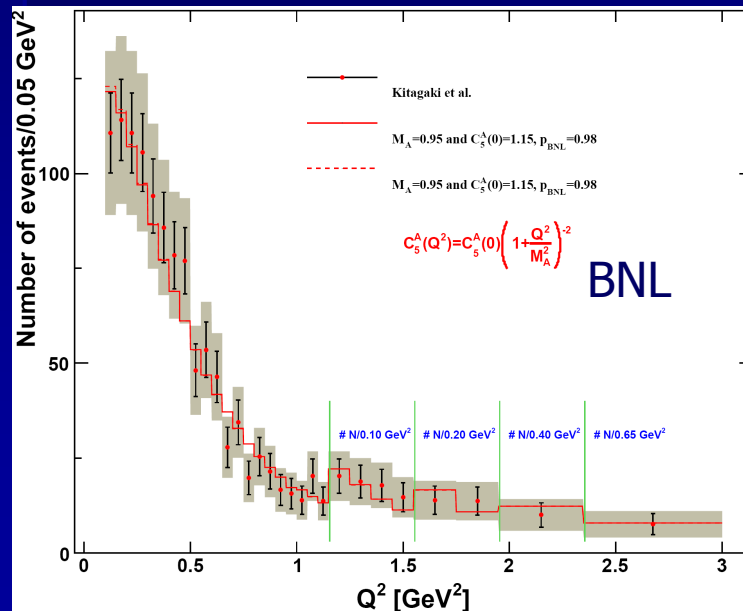
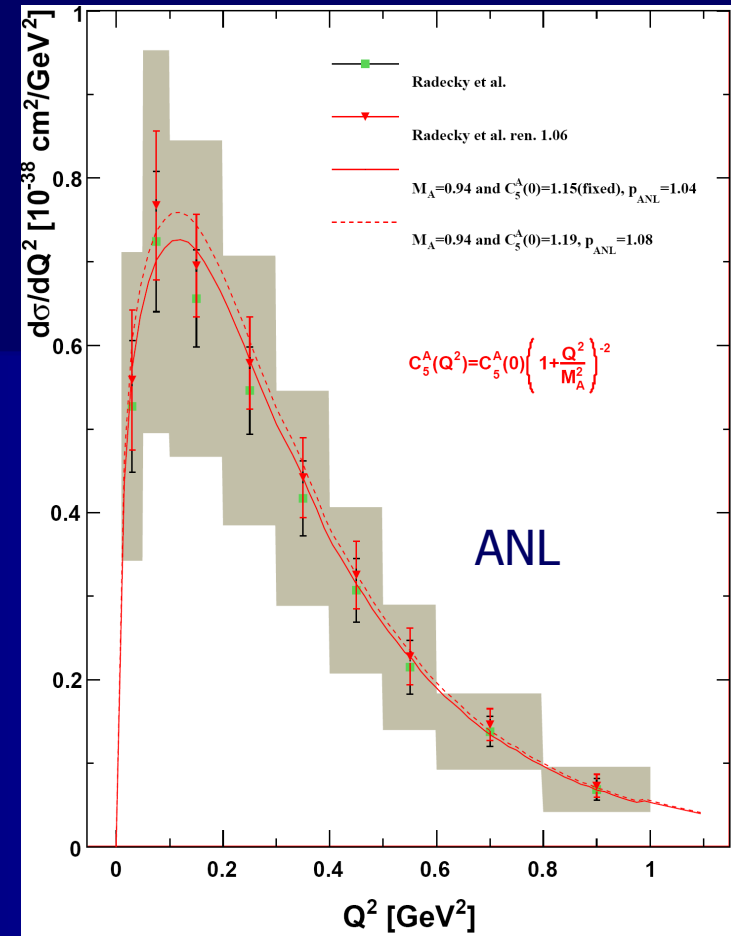
$$\chi^2 = \chi_{ANL}^2 + \chi_{BNL}^2$$

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\sigma_{th}^{diff}(Q_i^2) - p \sigma_{exp}^{diff}(Q_i^2)}{p \Delta \sigma_i} \right)^2 + \left(\frac{p-1}{r} \right)^2$$

$$p \equiv \frac{\sigma_{tot-th} N_{exp}}{\sigma_{tot-exp} N_{th}}$$

20% for ANL data
10% for BNL data

- The fit is consistent with both ANL and BNL experiments



$$M_A = 0.94 \pm 0.03 \text{ GeV}$$

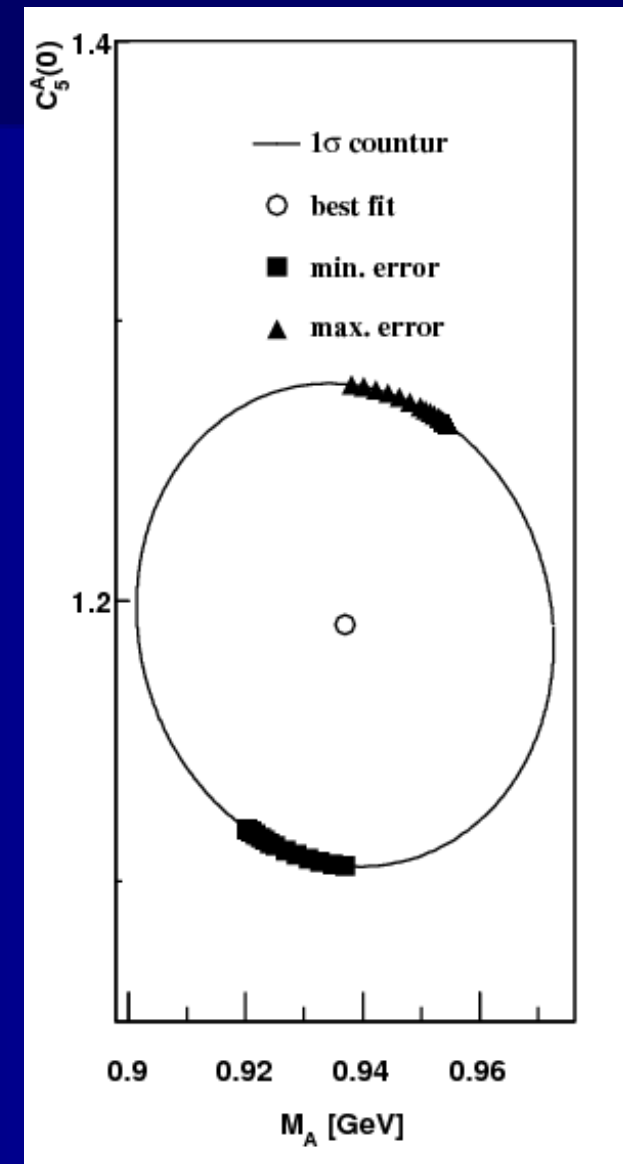
$$C_5^A(0) = 1.19 \pm 0.08$$

$$p_{ANL} = 1.08 \pm 0.10$$

$$p_{BNL} = 0.98 \pm 0.03$$

Niepewność produkcji pionów

- Elipsę błędów uzyskujemy z dopasowania do danych ANL i BNL
- Zaznaczone punkty odpowiadają przekrojom czynnym na produkcję CCpiplus/NCpizero (1sigma min i max) obliczonym dla różnych energii neutrin
- Użyjemy teraz symulacji oddziaływań neutrin aby oszacować przekroje czynne i ich niepewności w konkretnych kanałach produkcji pionów



Simulations

Nuance 3.006

- Generator: **Nuance 3.006** (by Dave Casper from UCI)
- Tested with K2K data*
 - π^0 production – K2K experiment, measurement on water (1kt detector)
- FSI (final state interactions) implemented
 - They can be turned off (for comparison purposes)
- Resonance model: Rein-Sehgal (multiple resonances)

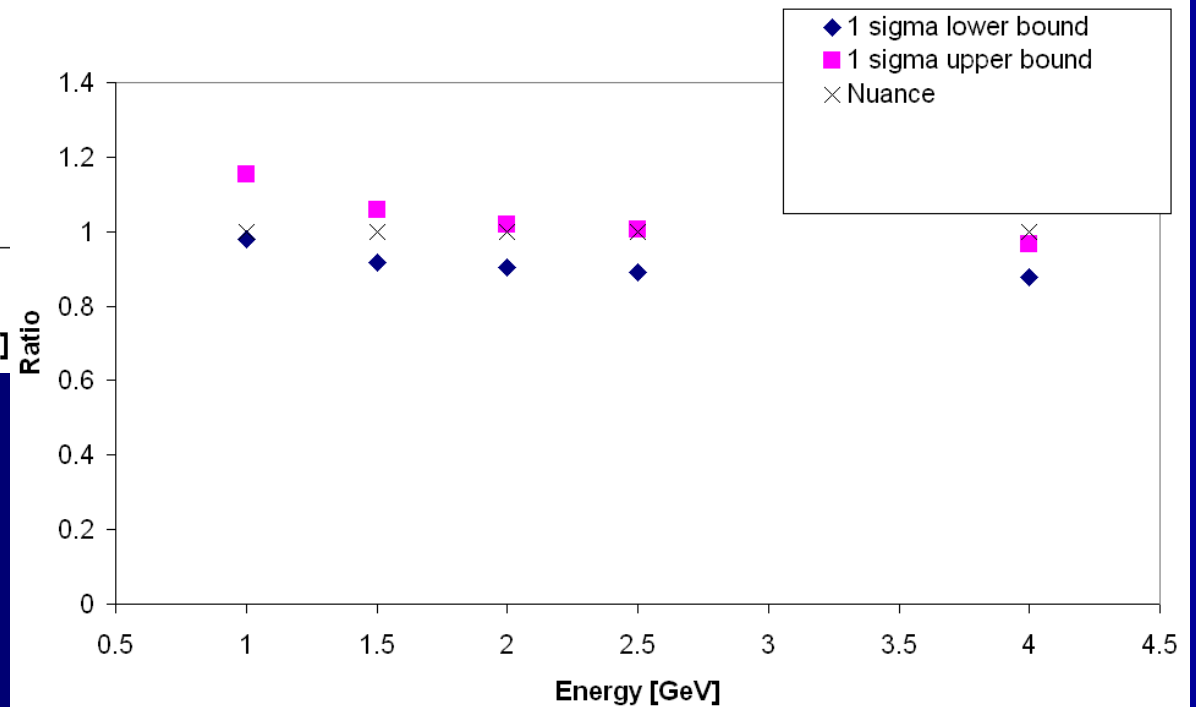
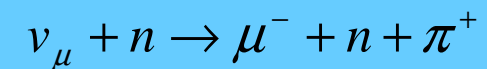
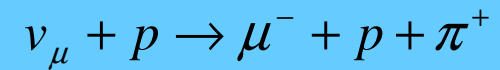
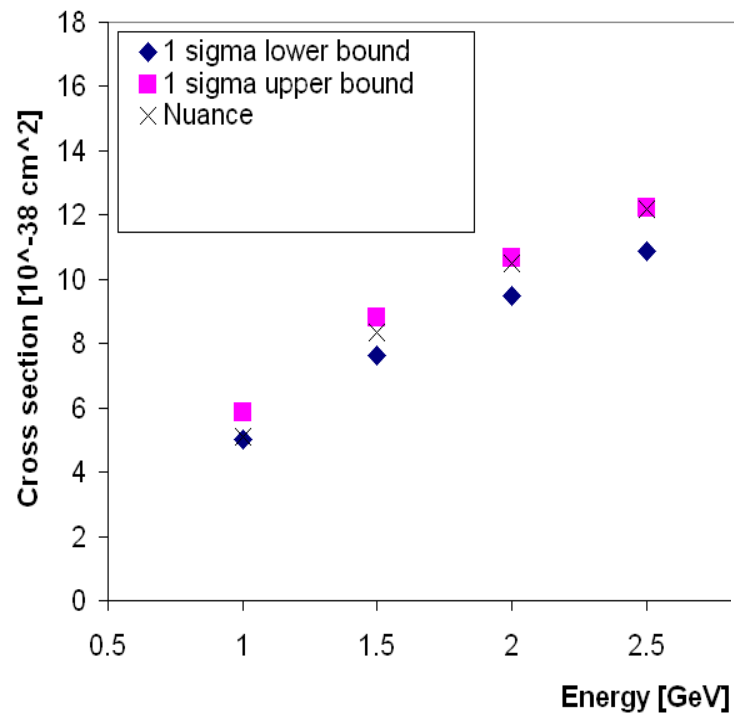
Nuance is used here as a reference

NuWro

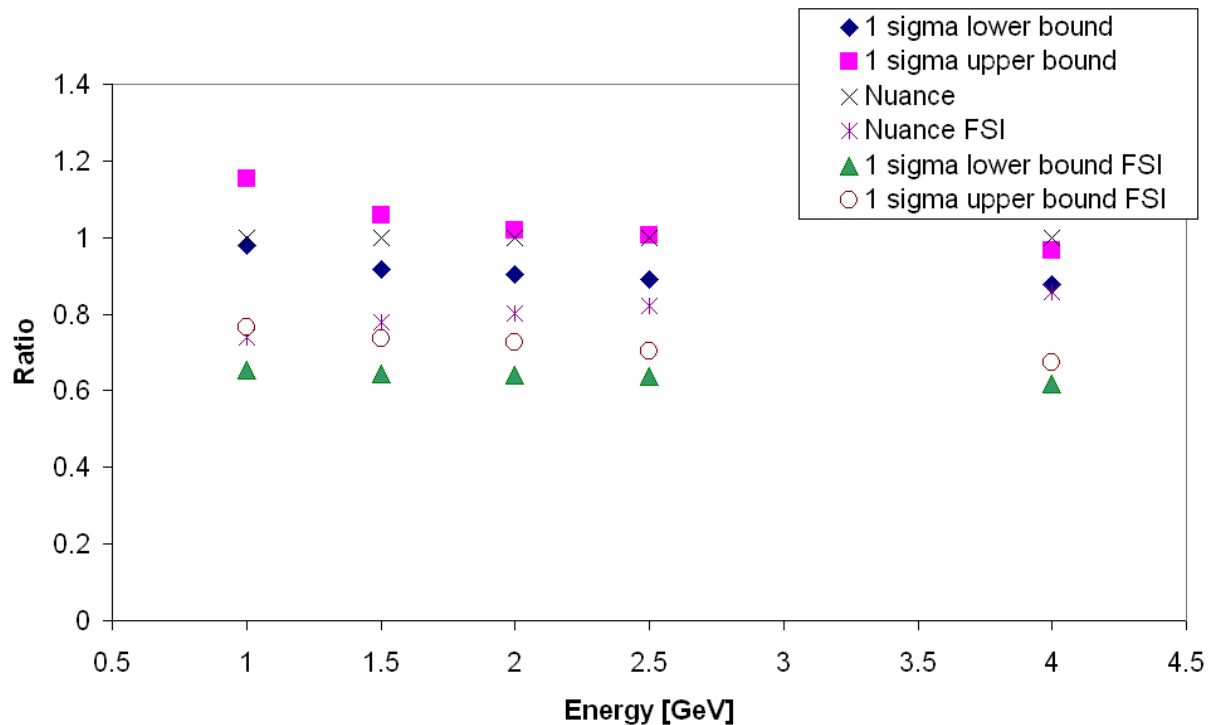
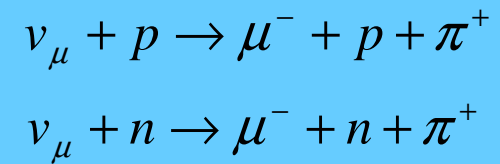
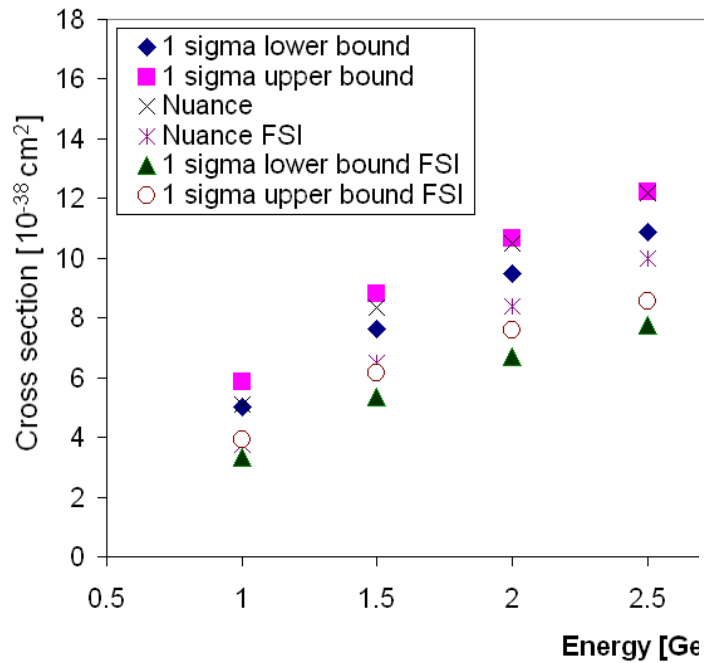
- Generator: NuWro (Wrocław Neutrino Group)
- Rarita-Schwinger resonance model (the same one was used in the fit)
- Used with parameter sets obtained in fitting procedure – to get error contours as a function of energy
- Samples:
 - 5 files for energies 0.5-2.5GeV and 4GeV (for cross-section estimation) on water
- Two samples for both generators: with and without FSI
- No detector effects here
- We take into account RES and DIS events

*Measurement of single π^0 production in neutral current neutrino interactions with water by a 1.3 GeV wide band muon neutrino beam, K2K Collab., Physics Letters B 619 (2005) 255–262

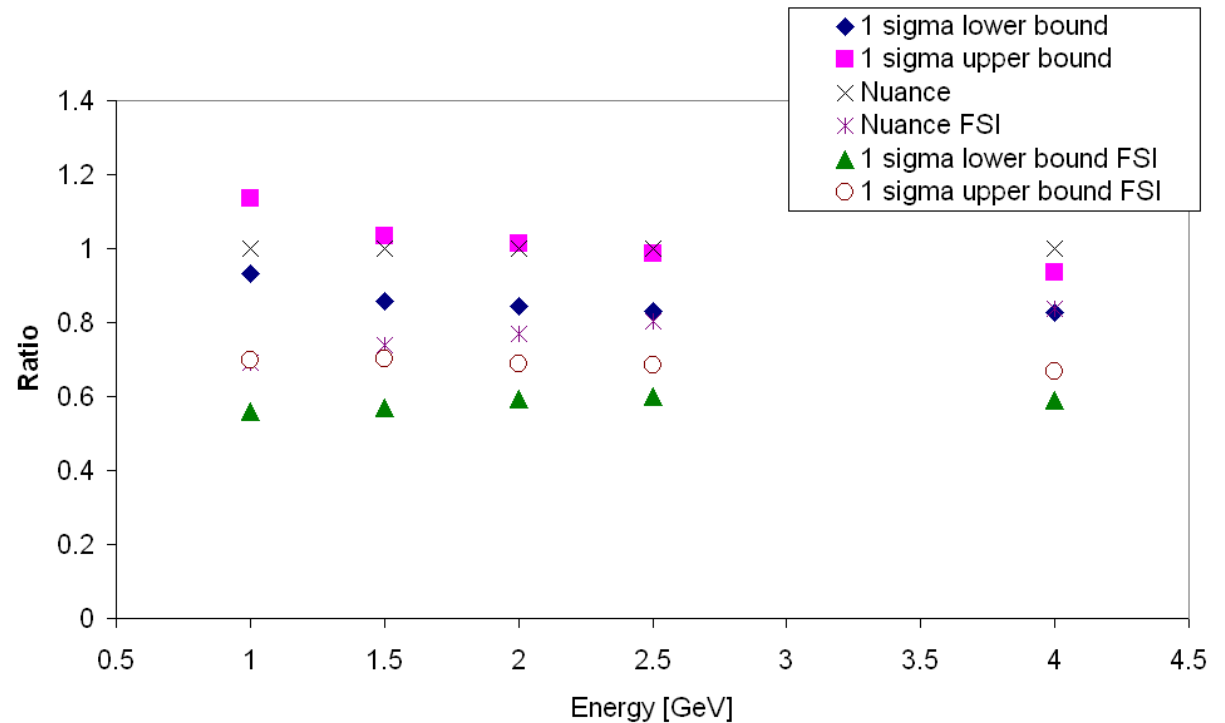
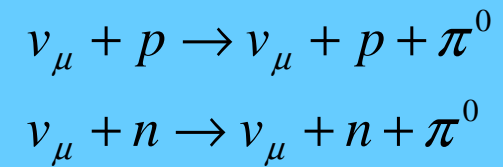
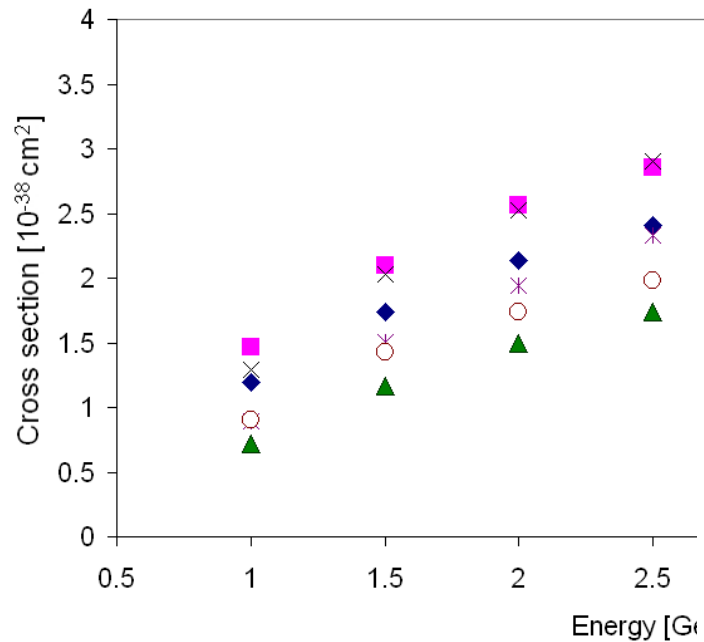
Wyniki – piony dodatnie (1)



Wyniki – piony dodatnie (2)

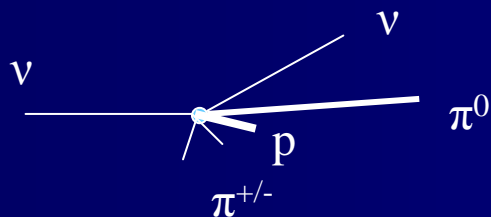
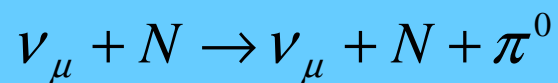


Wyniki – piony neutralne



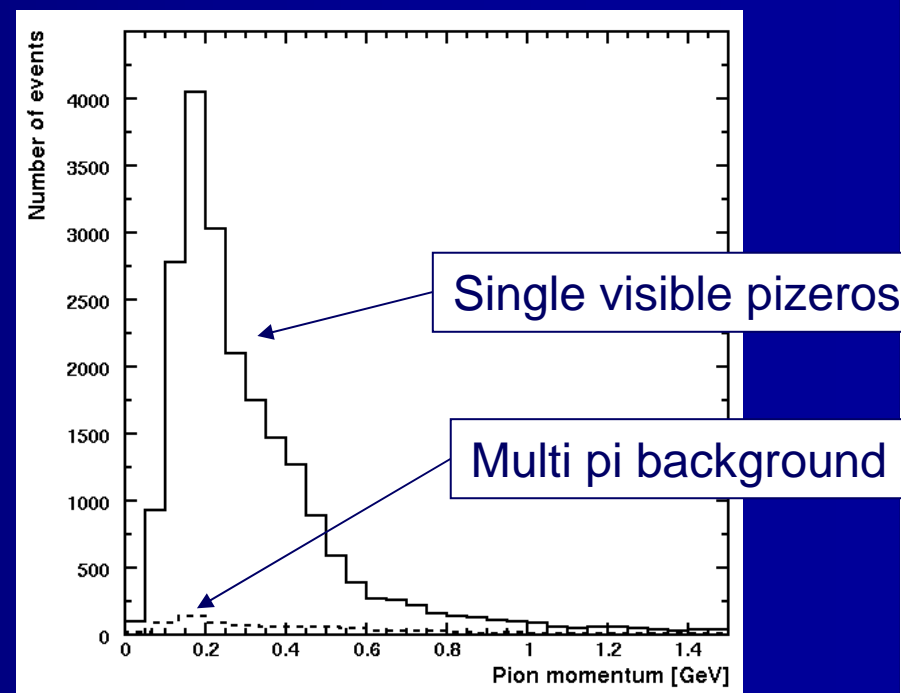
- Energia pionów – 600-900 MeV
- Energia neutrin – 1-4 GeV

Multi-pion events



- 4% is not a large contribution, at least in the first phase of the experiment
- But in the phase of precise measurements even 4% may be significant
- Measurements in ND280, perhaps in future 2km LAr detector?

	All events visible as single pizero	Events that fake single pizero (being in fact a multi)
threshold	21232	391(1.8%)
threshold +50MeV	21649	808(3.7%)



Podsumowanie

- Przedstawiona analiza daje najlepsze oszacowanie na błąd przy użyciu danych ANL/BNL
- Niepewność jest na poziomie 6-10%
- Bierzemy tu pod uwagę tylko wkład rezonansowy do niepewności – trzeba pamiętać że istnieje też tło nierezonansowe
- Zdarzenia wielopionowe są pomijalne w pierwszym przybliżeniu

- Nasza publikacja: K. M. Graczyk, D. Kielczewska, P. Przewlocki, and J. T. Sobczyk, *C5A axial form factor from bubble chamber experiments*, Phys. Rev. D 80, 093001 (2009).
- Wszystko również w moim doktoracie

- T2K już zbiera dane!

Rezerwa

Oscylacje – 3 zapachy

Zakładając

$$\Delta m_{sol}^2 \ll \Delta m_{atm}^2, \Delta m_{13}^2 = \Delta m_{23}^2 = \Delta m_{atm}^2, \Delta m_{12}^2 = \Delta m_{sol}^2, \delta = 0$$

mamy dwa przypadki:

- „atmosferyczny” – małe L/E

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = \cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{23} \sin^2 \left(1.27 \Delta m_{23}^2 L / E \right)$$

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

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2 2\theta_{23} \cos^4 \theta_{13} \sin^2 \left(1.27 \Delta m_{23}^2 L / E \right) - P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$$

- „słoneczny” – duże L/E

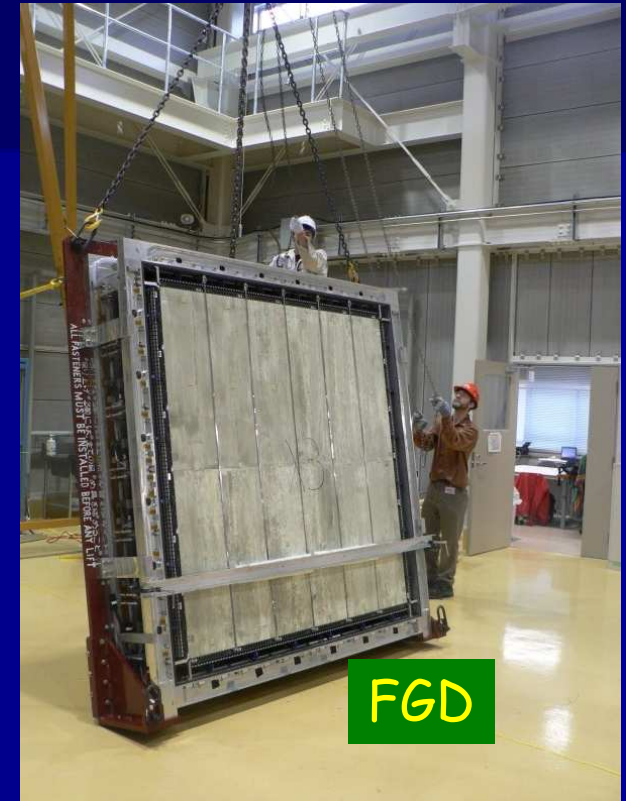
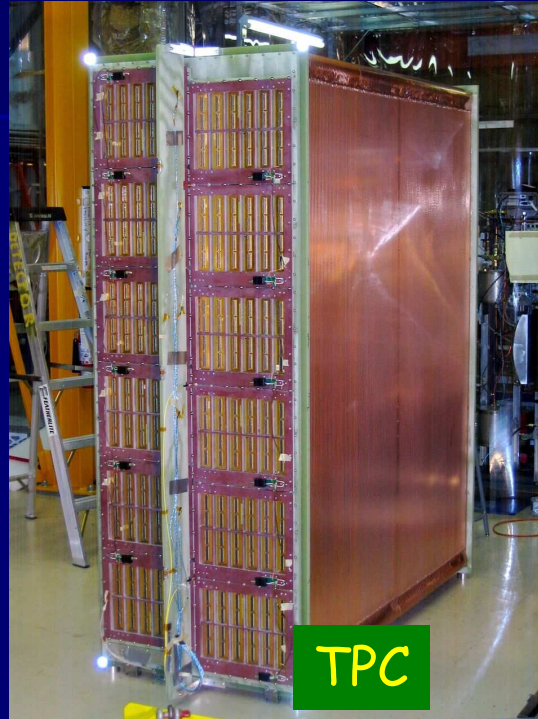
$$P(\nu_e \rightarrow \nu_{\mu\tau}) = \cos^2 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 \left(1.27 \Delta m_{12}^2 L / E \right) + 0.5 \sin^2 2\theta_{13}$$

Gdy $\theta_{13} = 0$ (a jest na pewno małe), to wzory redukują się do 2-zapachowych.

$\sin^2 2\vartheta_{13} < 0.14$ at 90% c.l. ($\vartheta_{13} < 10^\circ$)
(CHOOZ)

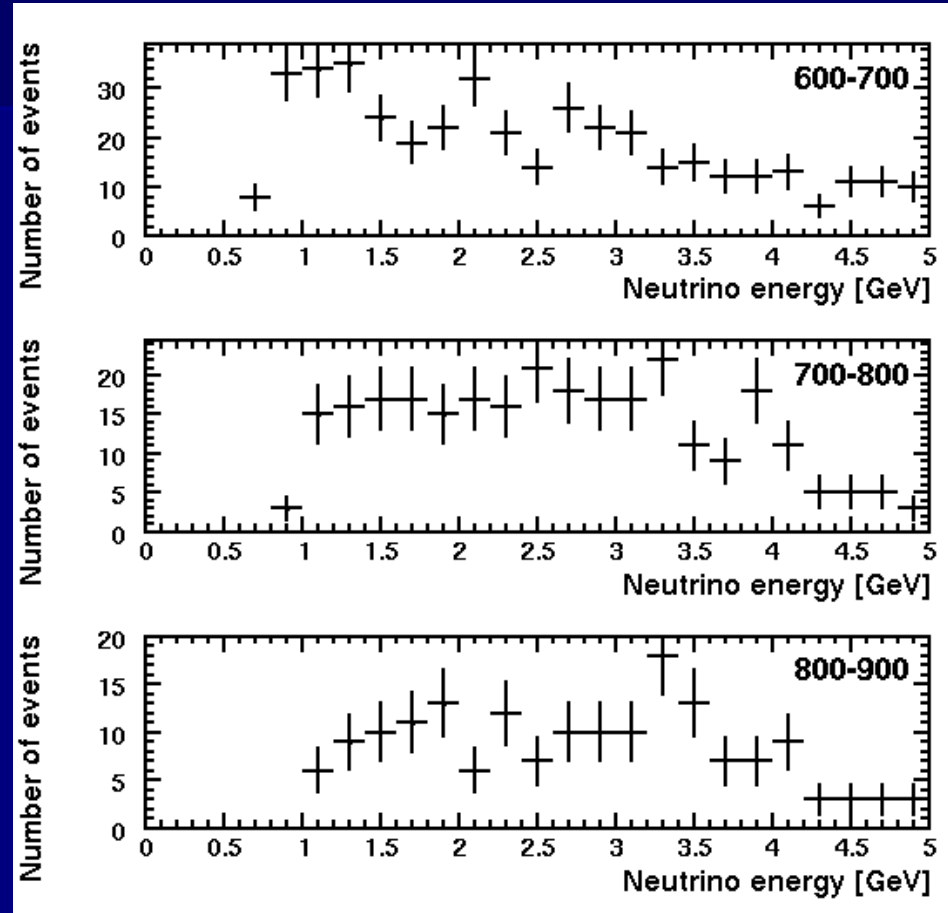
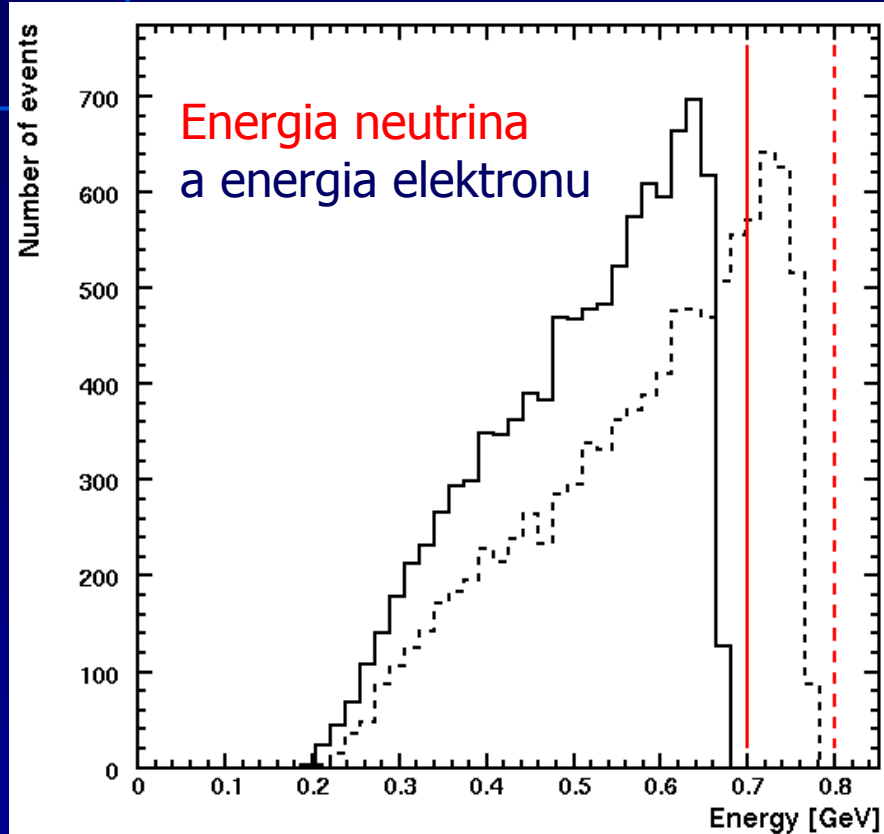
$$\begin{aligned}
P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = & \quad 4C_{13}^2 S_{13}^2 S_{23}^2 \sin^2 \Phi_{31} \\
& + 8C_{13}^2 S_{12} S_{13} S_{23} (C_{12} C_{23} \cos \delta - S_{12} S_{13} S_{23}) \cos \Phi_{32} \cdot \sin \Phi_{31} \cdot \sin \Phi_{21} \\
& - 8C_{13}^2 C_{12} C_{23} S_{12} S_{13} S_{23} \sin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

ND280 components (now installed)



To test the performance of the TPC, electrons, pions, muons, and protons were used in TRIUMF (momenta up to 400 MeV/c).

Jakie energie neutrin są ważne?



- Energia pionów – 600-900 MeV
- Energia neutrin – 1-4 GeV