

Pomiar oddziaływań 2p2h w eksperymencie T2K

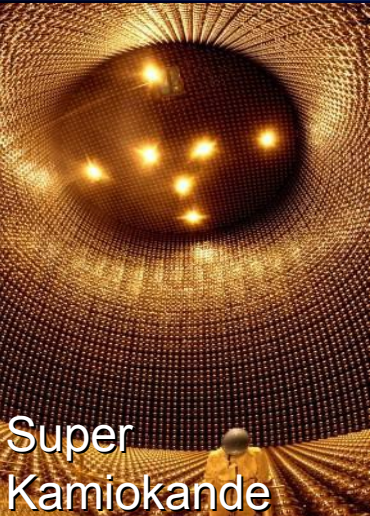
Joanna Zalipska

Narodowe Centrum Badań Jądrowych

Warszawa



O czym będzie mowa



Super Kamiokande


Honsiu, Japonia



Wiązka ν
T2K

Bliski detektor ND280

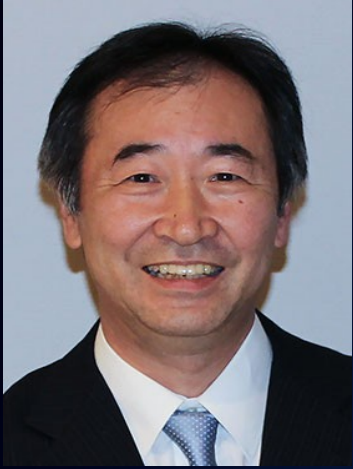


- W ramach wstępu o tegorocznej nagrodzie Nobla przyznanej za odkrycie oscylacji neutrin 

- Oddziaływania neutrin w eksperymentach akceleratorowych mierzących oscylacje
- Co to są i co wiadomo o oddziaływaniach $2p2h$
- Eksperyment T2K - co i jak mierzymy z perspektywy oddziaływań $2p2h$

$2p2h$ – 2 particle 2 hole

Nagroda Nobla 2015



For the discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have masses.

Takaaki Kajita
University of Tokyo
Super-Kamiokande

Artur B. McDonald
Queen's University
SNO



Neutrina atmosferyczne



Neutrina słoneczne

Wkład polski

VOLUME 81, NUMBER 8

PHYSICAL REVIEW LETTERS

24 AUGUST 1998

Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos

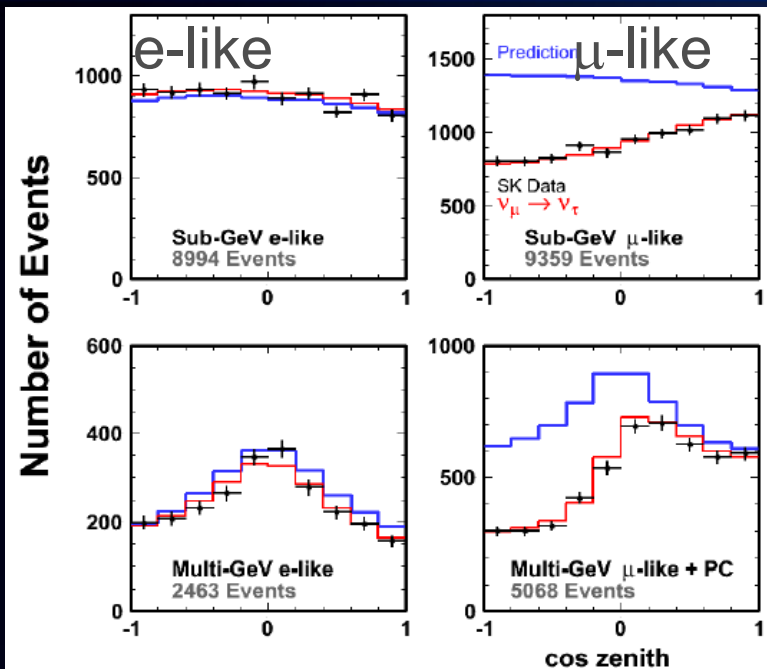
Y. Fukuda,¹ T. Hayakawa,¹ E. Ichihara,¹ K. Inoue,¹ K. Ishihara,¹ H. Ishino,¹ Y. Itow,¹ T. Kajita,¹ J. Kameda,¹ S. Kasuga,¹ K. Kobayashi,¹ Y. Kobayashi,¹ Y. Koshio,¹ M. Miura,¹ M. Nakahata,¹ S. Nakayama,¹ A. Okada,¹ K. Okumura,¹ N. Sakurai,¹ M. Shiozawa,¹ Y. Suzuki,¹ Y. Takeuchi,¹ Y. Totsuka,¹ S. Yamada,¹ M. Earl,² A. Habig,² E. Kearns,² M. D. Messier,² K. Scholberg,² J. L. Stone,² L. R. Sulak,² C. W. Walter,² M. Goldhaber,³ T. Barszczak,⁴ D. Casper,⁴ W. Gajewski,⁴ P. G. Halverson,^{4,*} J. Hsu,⁴ W. R. Kropp,⁴ L. R. Price,⁴ F. Reines,⁴ M. Smy,⁴ H. W. Sobel,⁴ M. R. Vagins,⁴ K. S. Ganezer,⁵ W. E. Keig,⁵ R. W. Ellsworth,⁶ S. Tasaka,⁷ J. W. Flanagan,^{8,†} A. Kibayashi,⁸ J. G. Learned,⁸ S. Matsuno,⁸ V. J. Stenger,⁸ D. Takemori,⁸ T. Ishii,⁹ J. Kanzaki,⁹ T. Kobayashi,⁹ S. Mine,⁹ K. Nakamura,⁹ K. Nishikawa,⁹ Y. Oyama,⁹ A. Sakai,⁹ M. Sakuda,⁹ O. Sasaki,⁹ S. Echigo,¹⁰ M. Kohama,¹⁰ A. T. Suzuki,¹⁰ T. J. Haines,^{11,‡} E. Blaufuss,¹² B. K. Kim,¹² R. Sanford,¹² R. Svoboda,¹² M. L. Chen,¹³ Z. Conner,^{13,‡} J. A. Goodman,¹³ G. W. Sullivan,¹³ J. Hill,¹⁴ C. K. Jung,¹⁴ K. Martens,¹⁴ C. Mauger,¹⁴ C. McGrew,¹⁴ E. Sharkey,¹⁴ B. Viren,¹⁴ C. Yanagisawa,¹⁴ W. Doki,¹⁵ K. Miyano,¹⁵ H. Okazawa,¹⁵ C. Saji,¹⁵ M. Takahata,¹⁵ Y. Nagashima,¹⁶ M. Takita,¹⁶ T. Yamaguchi,¹⁶ M. Yoshida,¹⁶ S. B. Kim,¹⁷ M. Etoh,¹⁸ K. Fujita,¹⁸ A. Hasegawa,¹⁸ T. Hasegawa,¹⁸ S. Hatakeyama,¹⁸ T. Iwamoto,¹⁸ M. Koga,¹⁸ T. Maruyama,¹⁸ H. Ogawa,¹⁸ J. Shirai,¹⁸ A. Suzuki,¹⁸ F. Tushima,¹⁸ M. Koshiba,¹⁹ M. Nemoto,²⁰ K. Nishijima,²⁰ T. Futagami,²¹ Y. Hayato,^{21,§} Y. Kanaya,²¹ K. Kaneyuki,²¹ Y. Watanabe,²¹ D. Kielczewska,^{22,¶} R. A. Doyle,²³ J. S. George,²³ A. L. Stachyra,²³ L. L. Wai,^{23,||} R. J. Wilkes,²³ and K. K. Young²³

We present an analysis of atmospheric neutrino data from a 33.0 kton yr (535-day) exposure of the Super-Kamiokande detector. The data exhibit a zenith angle dependent deficit of muon neutrinos which is inconsistent with expectations based on calculations of the atmospheric neutrino flux. Experimental biases and uncertainties in the prediction of neutrino fluxes and cross sections are unable to explain our observation. The data are consistent, however, with two-flavor $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ oscillations with $\sin^2 2\theta > 0.82$ and $5 \times 10^{-4} < \Delta m^2 < 6 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ at 90% confidence level. [S0031-9007(98)06975-0]

Prof. Danuta Kielczewska
Uniwersytet Warszawski

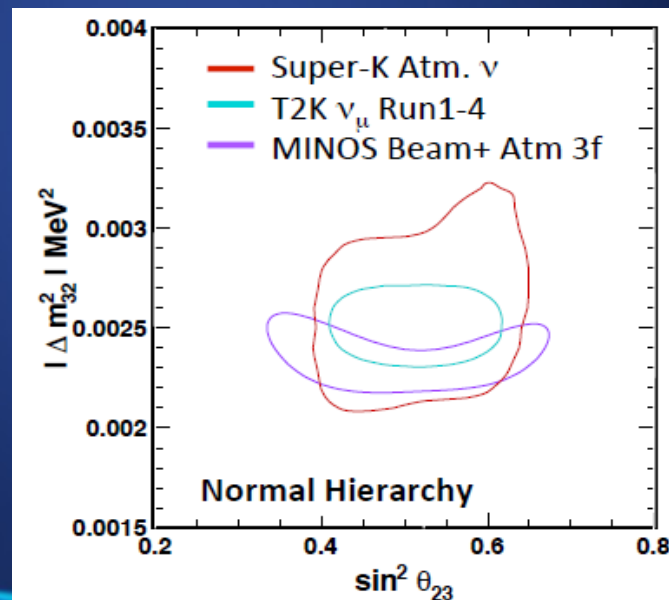
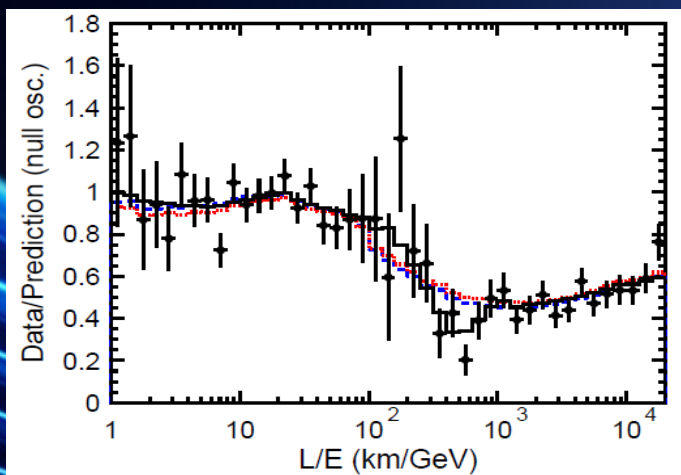
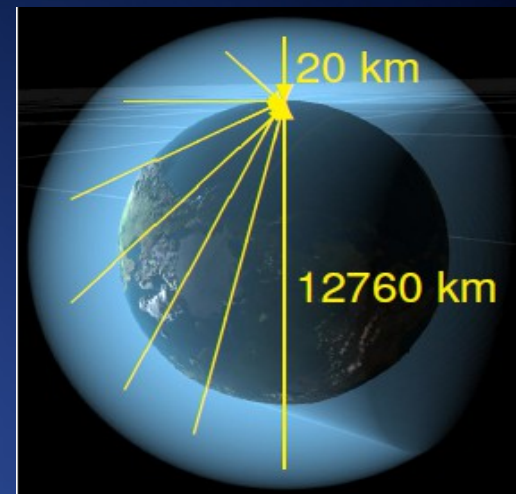


Oscylacje neutrin atmosferycznych

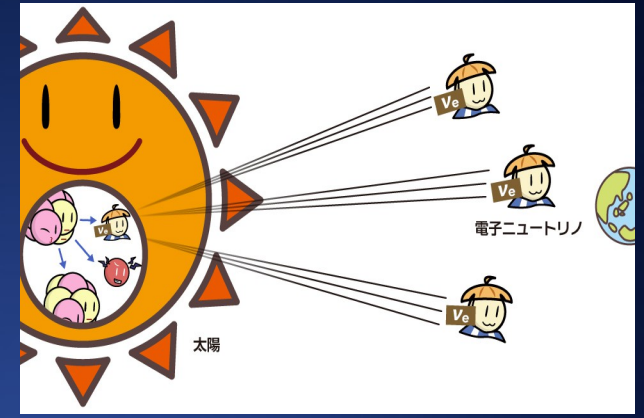


$$\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$$

Znikanie neutrin
przechodzących
przez Ziemię



Z Japonii o nagrodzie Nobla



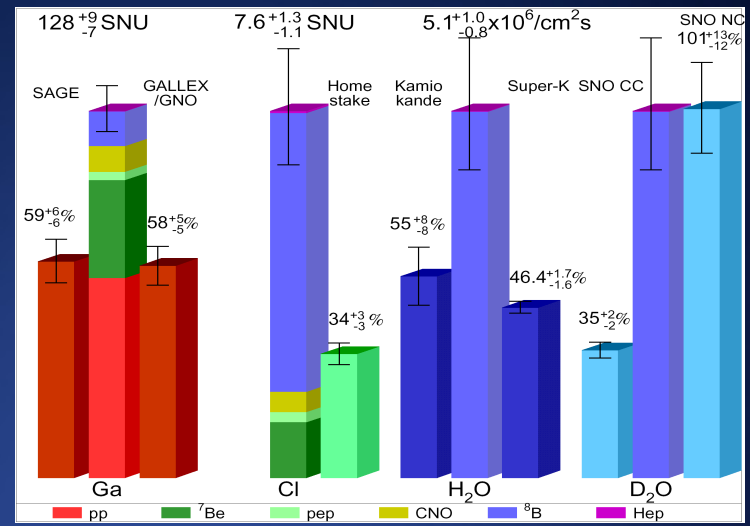
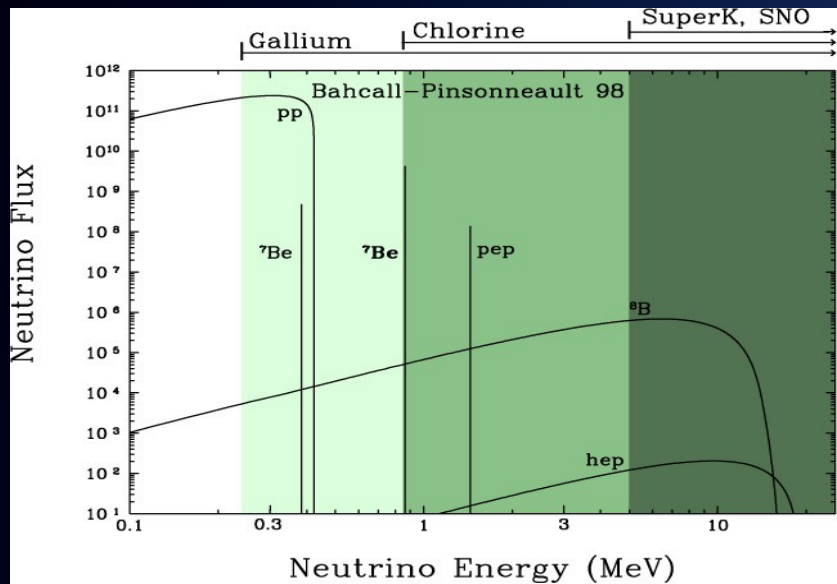
標準太陽模型から予想される
電子ニュートリノの数

実際に検出できた
電子ニュートリノの数

標準太陽模型の
モデルがおかしい？

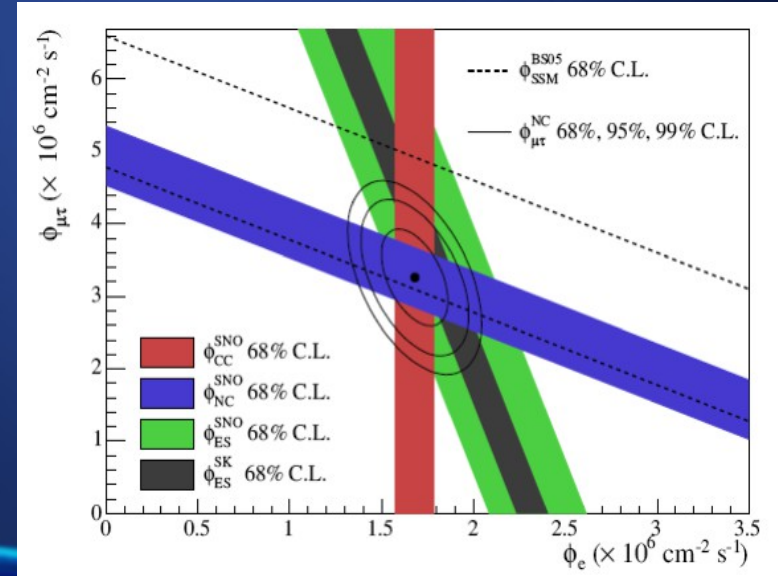
電子ニュートリノが
地球に届く前に
どこかに消える？

Oscylacje neutrin słonecznych



Oddziaływanie ν na D₂O w SNO:

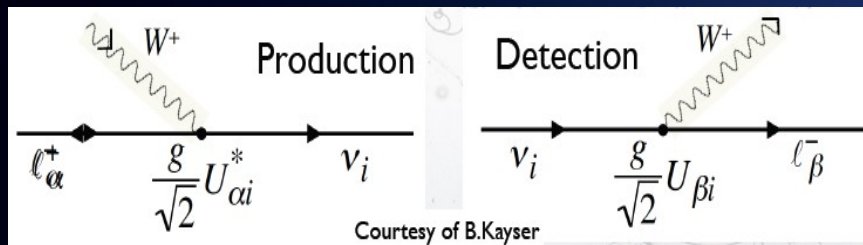
- Elastic Scattering (ES)** $\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$
- Charged Current (CC)** $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$
- Neutral Current (NC)** $\nu_x + d \rightarrow n + p + \nu_x$



Mieszanie neutrin

Stany własne zapachu i mas ν
nie są identyczne

Macierz mieszania
Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata



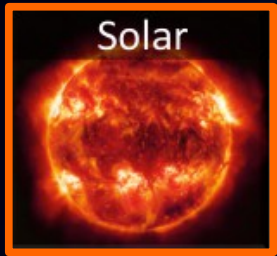
$$(\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau) = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

$$U_{\text{PNMS}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_{23} & \sin\theta_{23} \\ 0 & -\sin\theta_{23} & \cos\theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_{13} & 0 & \sin\theta_{13}e^{-\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_{13}e^{-\delta_{CP}} & 0 & \cos\theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_{12} & \sin\theta_{12} & 0 \\ -\sin\theta_{12} & \cos\theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Oscylacje neutrin zależą również od:

$$\sin^2\left(\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{E}\right) \quad \text{gdzie} \quad \Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$$

Zmierzone parametry oscylacji



Solar

$$\theta_{12} = 33.4 \pm 0.85^\circ$$

$$\Delta m_{21}^2 = (7.53 \pm 0.18) \times 10^{-5} \text{eV}^2$$

$$\theta_{23} = 45.8 \pm 3.2^\circ$$

$$|\Delta m_{23}^2| = (2.44 \pm 0.06) \times 10^{-3} \text{eV}^2$$



Reactor

$$\theta_{13} = 8.88 \pm 0.39^\circ$$

$$\delta_{\text{CP}} = [0.15, 0.83]\pi \text{ NH}, [-0.08, 1.09]\pi \text{ IH}$$

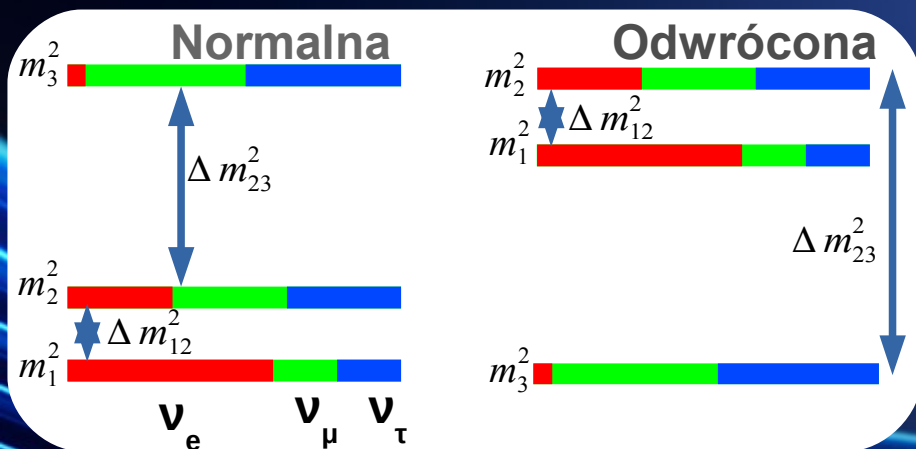
IH wykluczone



Atmospheric



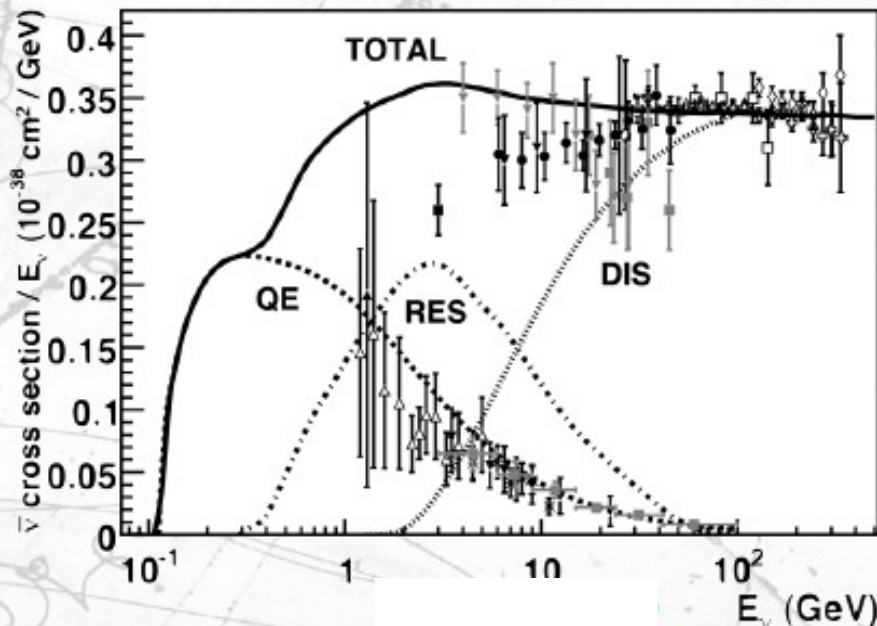
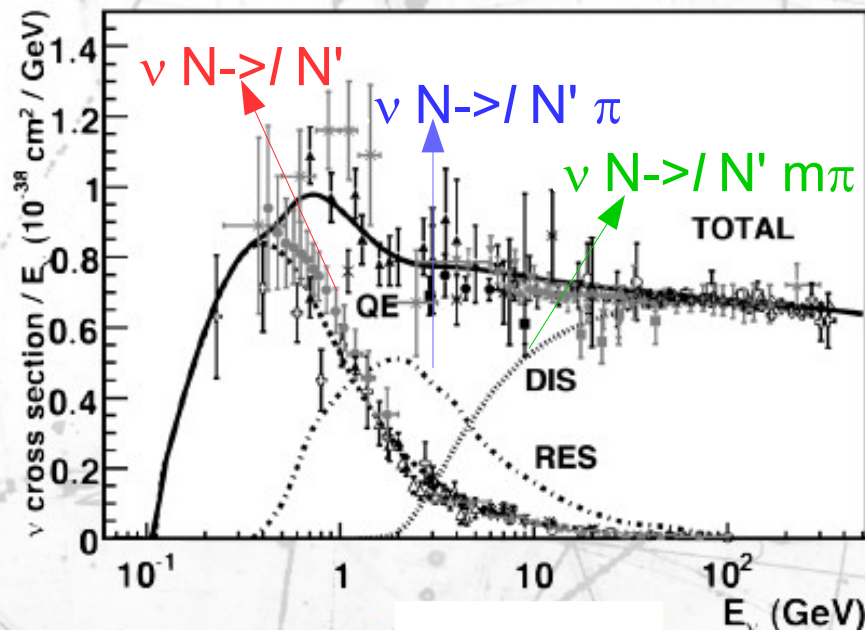
Accelerator



$$U_{PMNS} = \begin{pmatrix} 0.82 & 0.55 & 0.16 \\ -0.34 & 0.58 & 0.63 \\ 0.26 & -0.60 & 0.76 \end{pmatrix}$$

Modelowanie oddziaływań ν

J.A.Formaggio, G.P.Zeller, Rev.Mod.Phys. 84 (2012) 1307

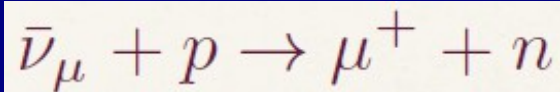
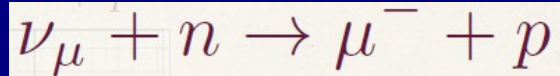


- Modelowanie oddziaływania na pojedynczym nukleonie
- Propagacja cząstek przez jądro, wtórne oddziaływania

NEUT, NuWro, GENIE

CCQE puzzle

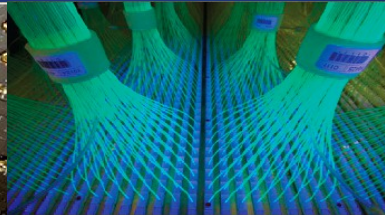
Charged Current Quasi-Elastic neutrino interactions



$$F_A(Q^2) = -\frac{g_A}{\left(1 + \frac{Q^2}{M_A^2}\right)^2}$$

Masa axialna M_A

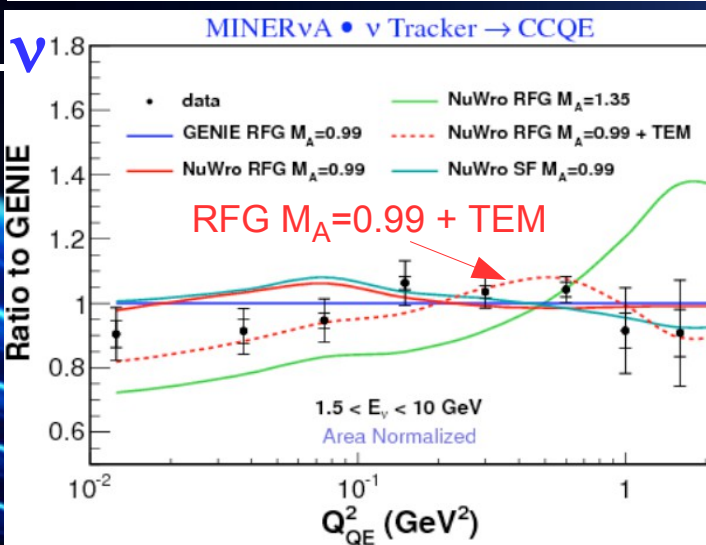
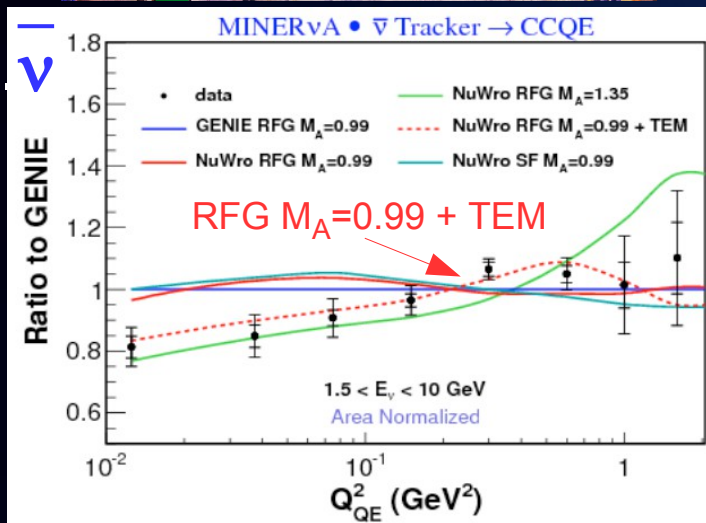
Eksperyment	Energia ν	Pomiar
K2K	$\sim 1\text{GeV}$	$M_A = 1.20 \pm 0.12\text{GeV}$ Niedobór μ w kierunku do przodu
MINOS	3GeV	$M_A \sim 1.2\text{GeV}$
MiniBooNE	0.8GeV	Niedobór μ w kierunku do przodu sugeruje $M_A > 1$
SciBoone	$0.5\text{--}1.5\text{GeV}$	$\sigma_{\text{CCQE}} \sim 10\%$ mniejsza niż w MiniBooNE $\sigma_{\text{CCInclusive}}$ większa niż w generatorze NEUT
T2K	0.7GeV	$M_A = 1.14 \pm 0.03\text{GeV}$





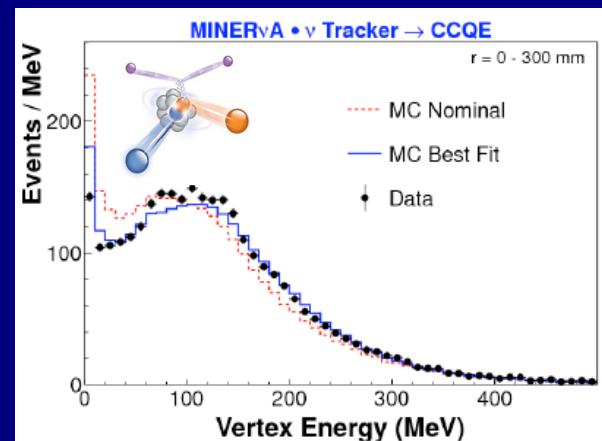
Wyniki Minervy

- Relativistic Fermi Gas I $M_A=0.99\text{GeV}$ jak przewidywane dla oddziaływania ν -detuter (GENIE)
- RFG z $M_A=1.35\text{GeV}$ z dopasowania do danych MiniBooNE I SciBooNE (NuWro)
- Spectral Functions bardziej zaawansowany model jądrowy
- Transverse enhancement (TEM) jak dla rozpraszania elektronów, parametryzacja efektu korelacje nukleonów w jądrze



Energia zdeponowana wokół wierzchołka

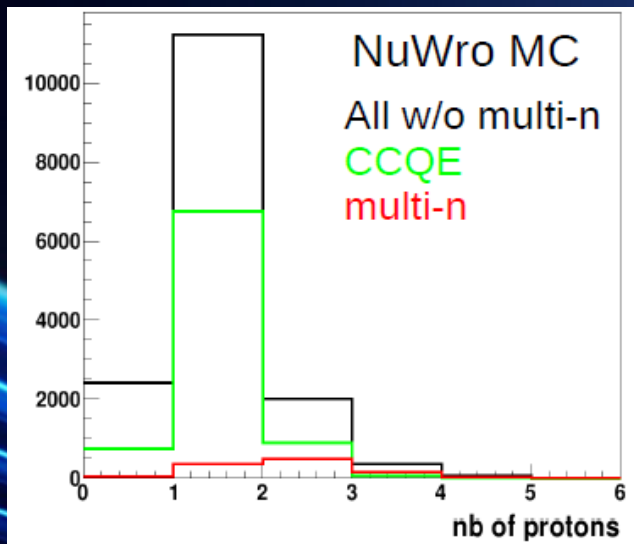
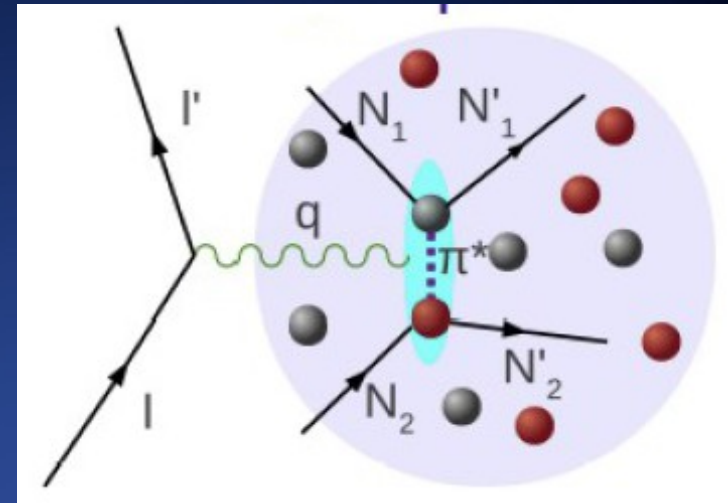
Dane preferują jak w 25+-9% przypadków jest dodatkowo obecny niskoenergetyczny proton o $E_{\text{kin}} < 225 \text{ MeV}$



Oddziaływania 2p2h

2 particle 2 hole (2p2h) or
Meson Exchange Current (MEC)
neutrino interaction

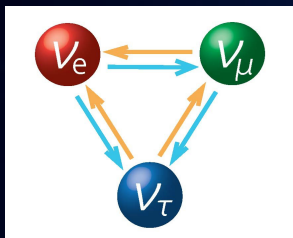
Energia oddziałującego neutrina
jest przekazywana jednocześnie
dwu nukleonom (*nn* albo *np*)



- Dwa nukleony wychodzące z oddziaływania są rozłożone izotropowo w układzie środka masy systemu hadronowego → Protony/neutrony back to back
- Sygnaturą oddziaływań 2p2h są przypadki z więcej niż jednym protonem wychodzącym z jądra

2p2h w T2K

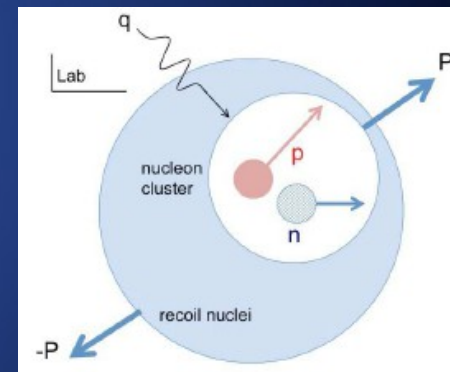
Jakie są cele eksperymentu T2K?



Co eksperyment T2K zmierzył do tej pory?

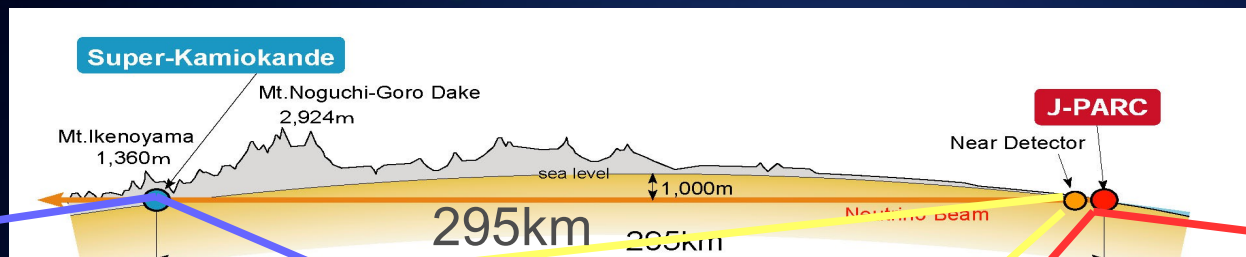
Jaki jest wpływ oddziaływań 2p2h na pomiary oscylacyjne?

Jak wyznaczono wkład oddziaływań 2p2h do mierzonych oddziaływań ν w bliskim detektorze?

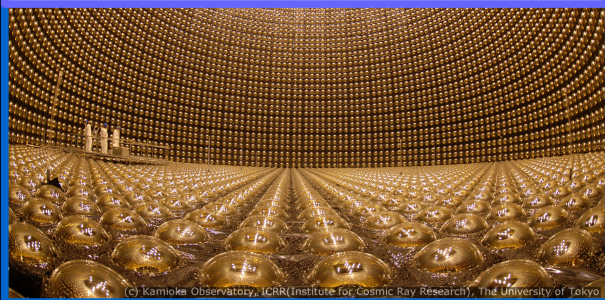


Co robimy, żeby wyselekcjonować próbkę oddziaływań 2p2h i zmierzyć ich przekrój czynny?

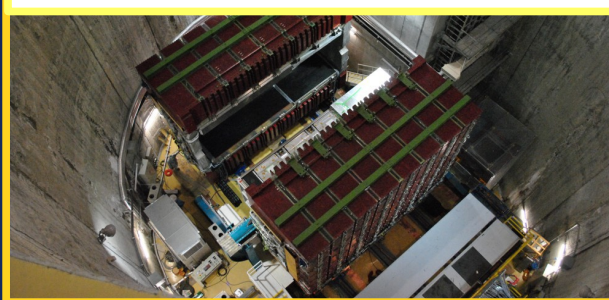
Eksperyment



Super Kamiokande



Near Detector ND280



JPARC accelerator



Cele eksperymentu:

- Analiza pojawiania się ν_e – pomiar parametrów θ_{13} , δ_{CP}
- Analiza znikania ν_μ – pomiar parametrów θ_{23} , Δm_{23}^2
- Analizy oscylacji dla wiązki $\bar{\nu}_\mu$ i poszukiwanie łamania CP
- Pomiar przekrojów czynnych w bliskim detektorze ND280



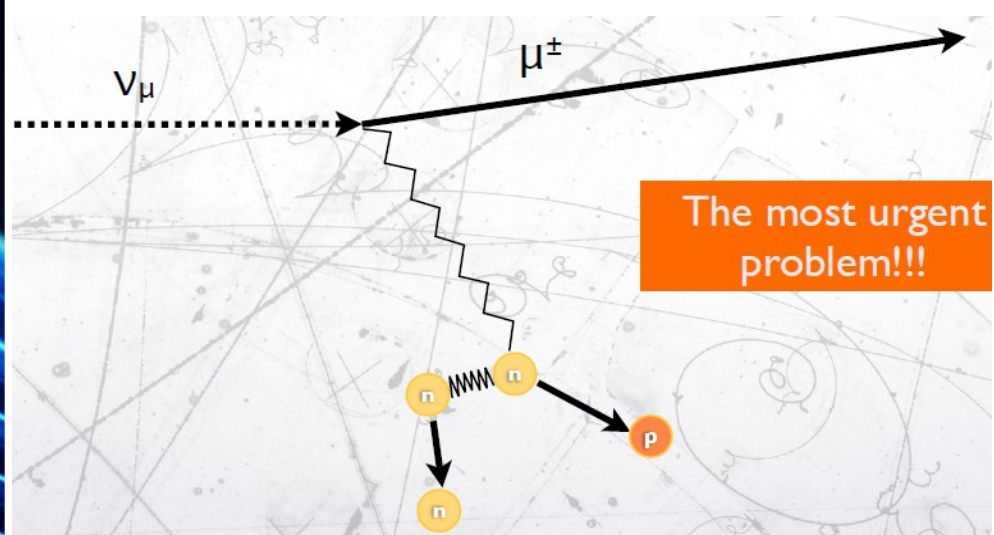
Rekonstrukcja energii neutrina

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\Delta m^2 L}{4E_\nu}$$

Czyli liczba rejestrowanych przypadków w dalekim detektorze zależy od E_ν

$$N_{far\ detector}(E_\nu) = \sigma_\nu(E_\nu) \Phi(E_\nu) P_{osc}(E_\nu)$$

CCQE+2p2h



Dla E wiązki poniżej 2GeV

- Należy zidentyfikować typ oddziaływania CCQE, którego sygnaturą są wychodzące z jądra mion i proton
- Rekonstrukcja E_ν bazuje na kinematyce mionu p_μ, θ_μ

Systematyka w dalekim detektorze

$$\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_\mu$$

T2K systematic uncertainty (Run5-6 $\bar{\nu}_\mu$ disappearance)

ND -Near Detector

		w/o ND measurement	w/ ND measurement
ν flux and cross section	flux	7.1%	3.5 %
	cross section cmn to ND280	5.8%	1.4 %
	(flux) × (cross section cmn to ND280)	9.2%	3.4 %
	cross section (SK only, include ↓)	10.0 %	
	multi-nucleon effect on oxygen	9.5%	
	total	13.0%	10.1%
Final or Secondary Hadronic Interaction		2.1%	
Super-K detector		3.8%	
total		14.4%	11.6%

2p2h →

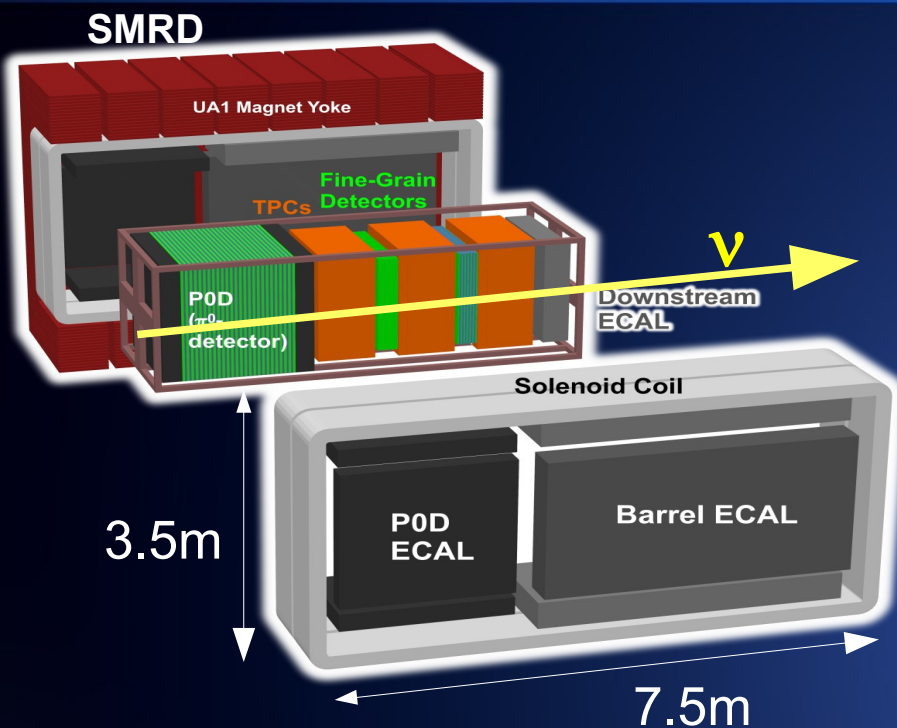
$$\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$$

Fractional error on number-of-event prediction

	anti- ν_e appearance ($\beta=1$)	w/o ND measurement	w/ ND measurement
ν flux and cross section	flux	8%	3.5%
	cross section come to ND280	4.9%	1.8%
	(flux)× (cross section come to ND280)	9.4%	3.0%
	cross section (SK only)	9.8%	
	multi-nucleon effect on oxygen	9.3%	
Final or Secondary Hadronic Interaction		2.2%	
Super-K detector		3.0%	
Total		13.5%	11.0%

← 2p2h

Bliski detektor ND280



Cele ND280:

- ◆ Pomiar spektrum ν_μ i $\bar{\nu}_\mu$ przed oscylacją
- ◆ Pomiar domieszki ν_e w wiązce
- ◆ Pomiar przekrojów czynnych na Oddziaływania neutrin

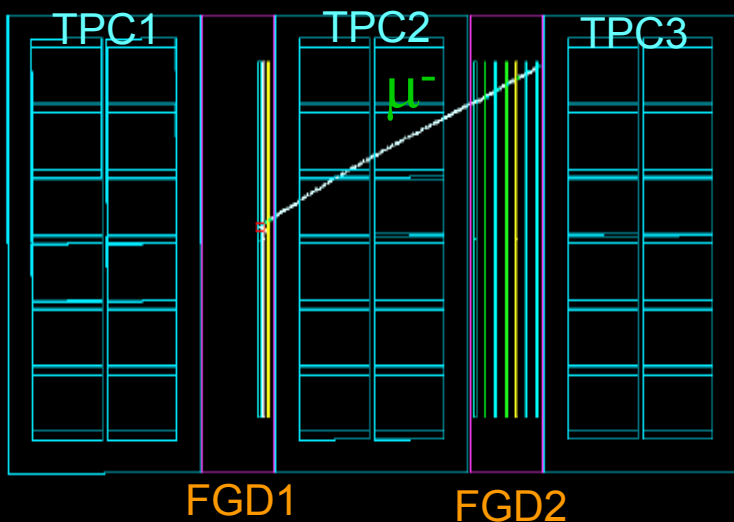
- ◆ ND280 umieszczony jest 2.5° poza osią wiązki w kierunku detektora Super Kamiokande
- ◆ Następujące poddetektory umieszczone są wewnątrz magnesu w polu 0.2T:
Scintillator Fine Grained Detectors (FGD), Gas Time Projection Chambers (TPC), Pizero Detector (P0D), Electromagnetic Calorimeter (ECAL), Side Muon Range Detector (SMRD)

Oddziaływania ν i $\bar{\nu}$ w ND280

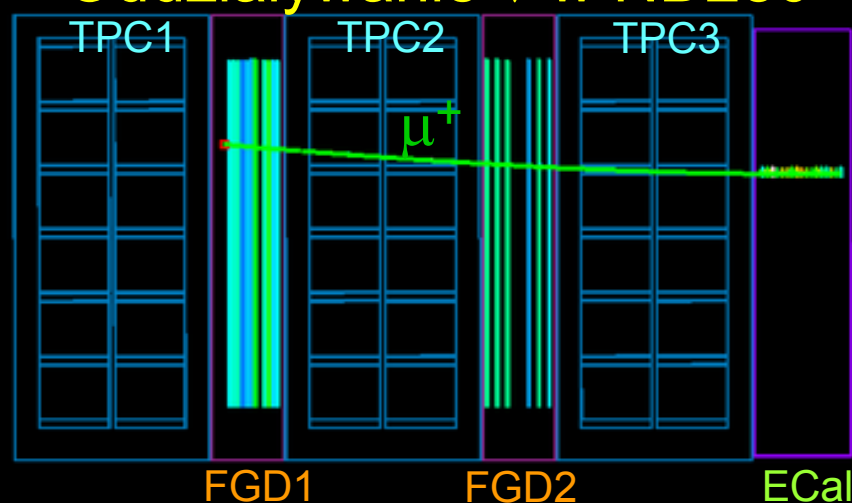
- Dane dla wiązki ν 7.0×10^{20} POT (2010-2013)
- Dane dla wiązki $\bar{\nu}$ 4.0×10^{20} POT (2014)

ND280 rozróżnia oddziaływania ν_{μ} i $\bar{\nu}_{\mu}$

Oddziaływanie ν w ND280

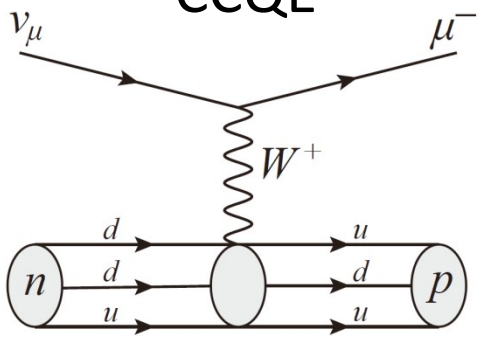


Oddziaływanie $\bar{\nu}$ w ND280

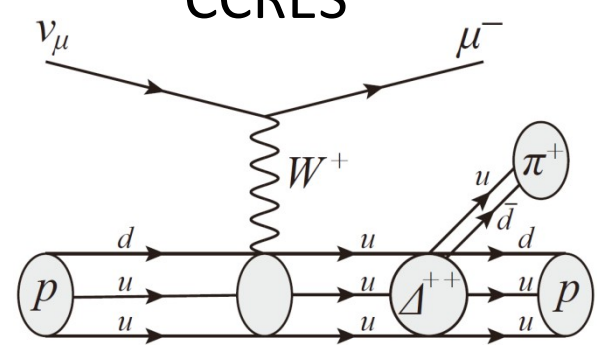


Co chcemy zmierzyć

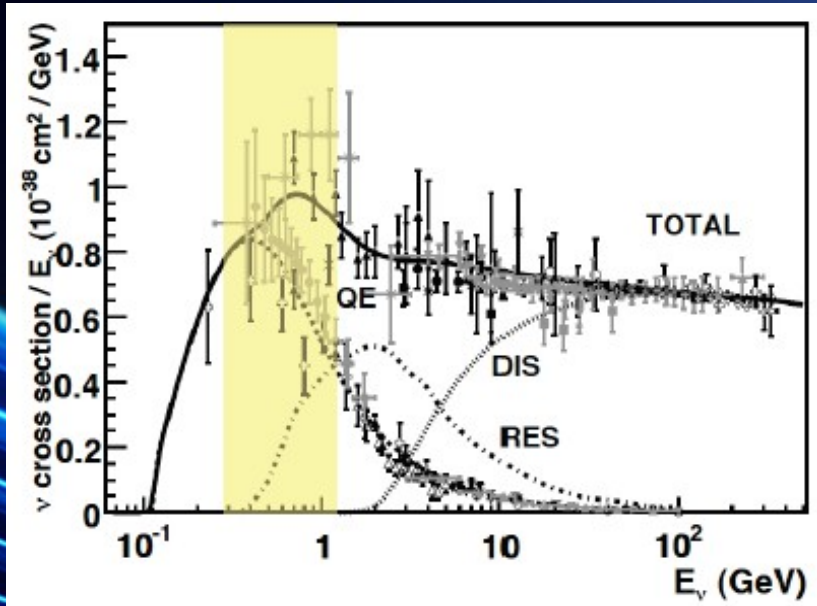
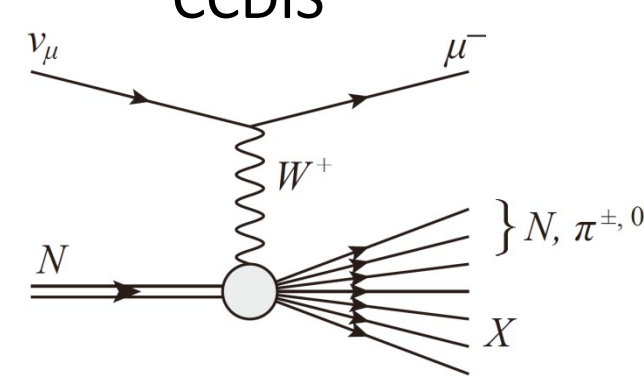
Charge Current quasi-elastic
CCQE



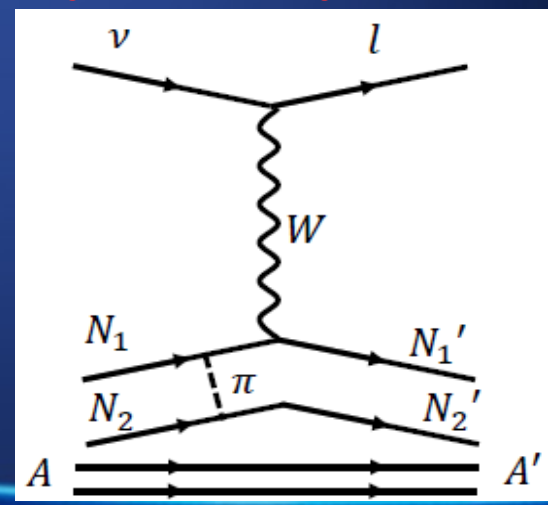
CC resonance
CCRES



CC Deep Inelastic Scattering
CCDIS



Ile mamy oddziaływań 2p2h?



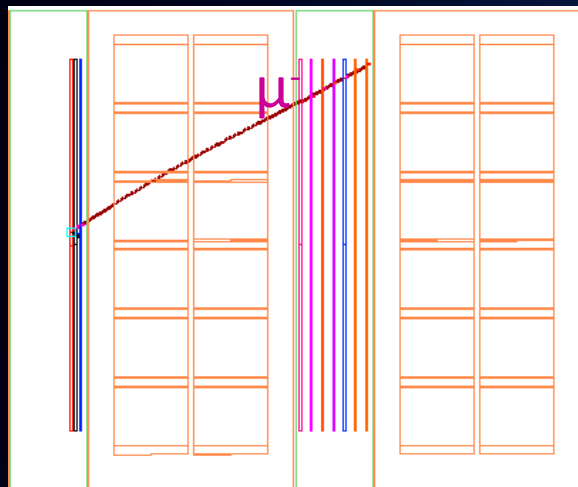
Co mamy w generatorze oddziaływań

Generator oddziaływań NEUT używany w T2K

Typ oddziaływania	Procentowy udział
CCQE	35.7
2p2h	5.3
RES	19.9
DIS	11.1
COH	1.7
NC	26.3

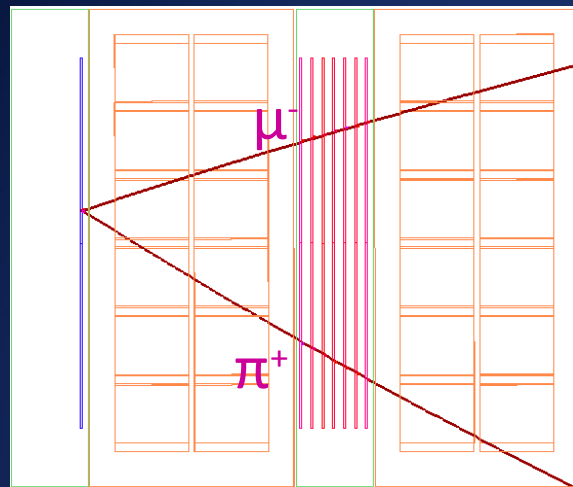
Kategorie przypadków dla wiązki ν

CC 0π sample



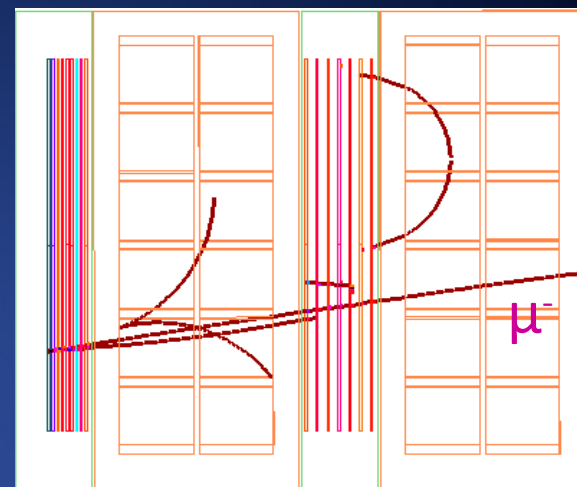
FGD TPC FGD TPC

CC $1\pi^+$ sample



FGD TPC FGD TPC

CC Other sample

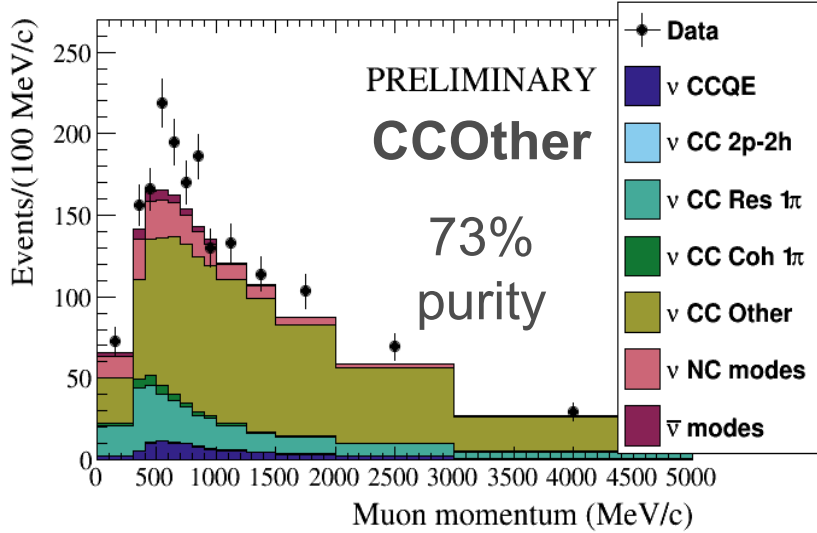
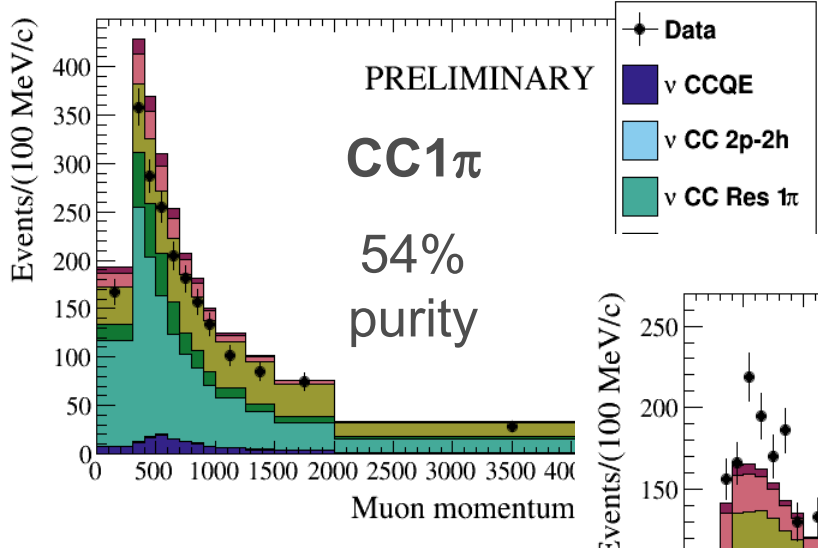
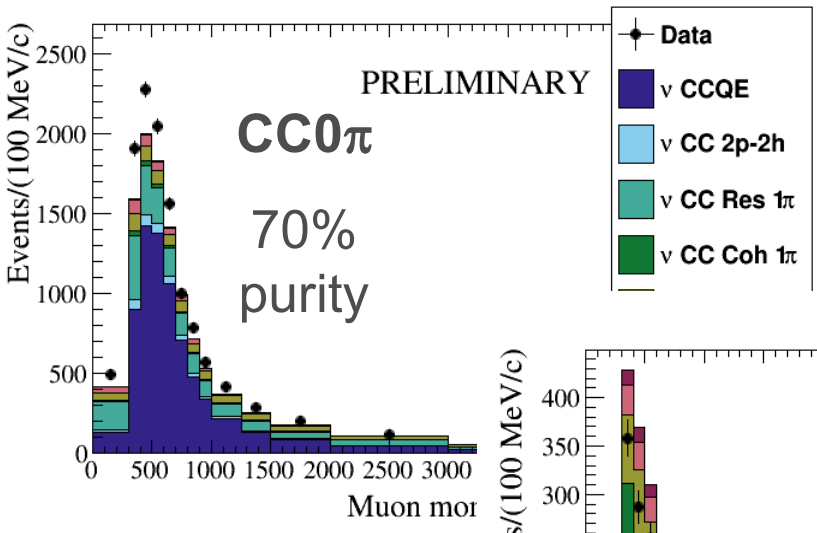


FGD TPC FGD TPC

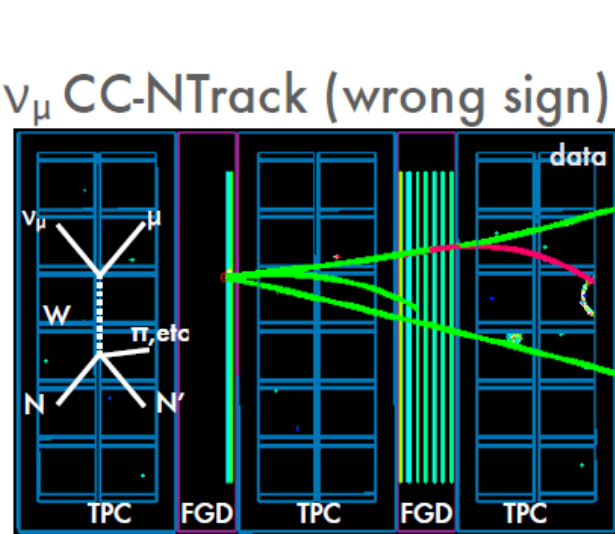
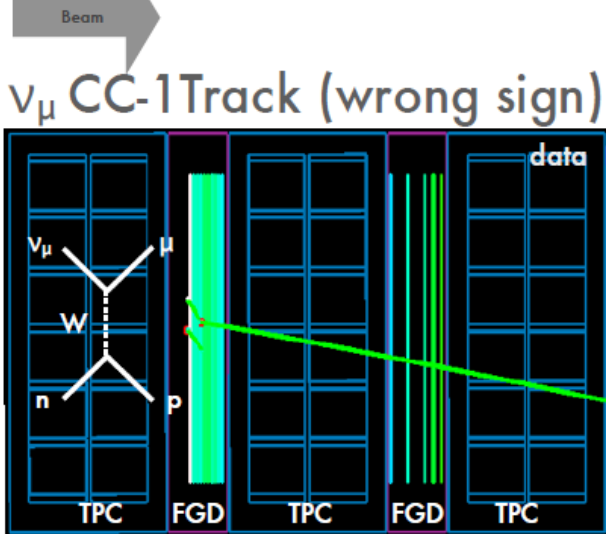
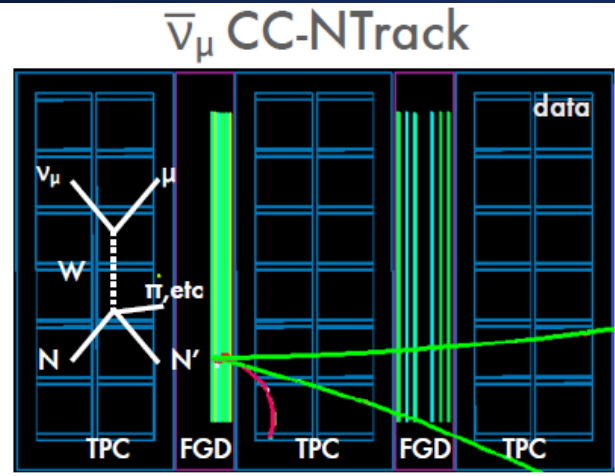
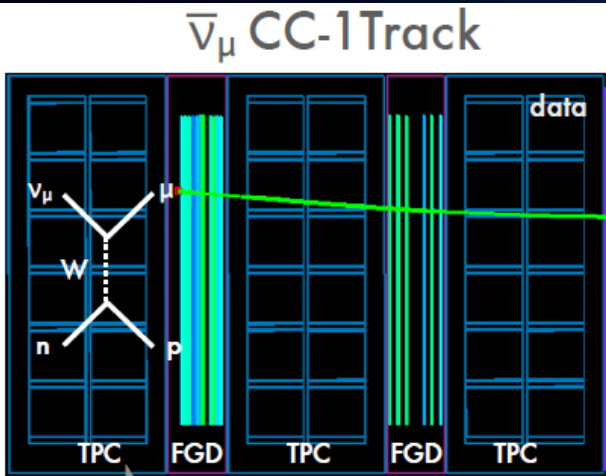
- ◆ Oddziaływania CC bez pionów w wychodzących z jądra, tag μ^-
- ◆ Jeden zdekonstruowany tor π^+
- ◆ π^+ identyfikowany przez dE/dx w TPC albo elektron Michela w FGD
- ◆ Zrekonstruowany tor π^- albo więcej niż jeden tor naładowanego π albo π^0

Informacja z wiązki ν

Oddziaływania 2p2h mają udział
Tylko w próbce $CC0\pi$



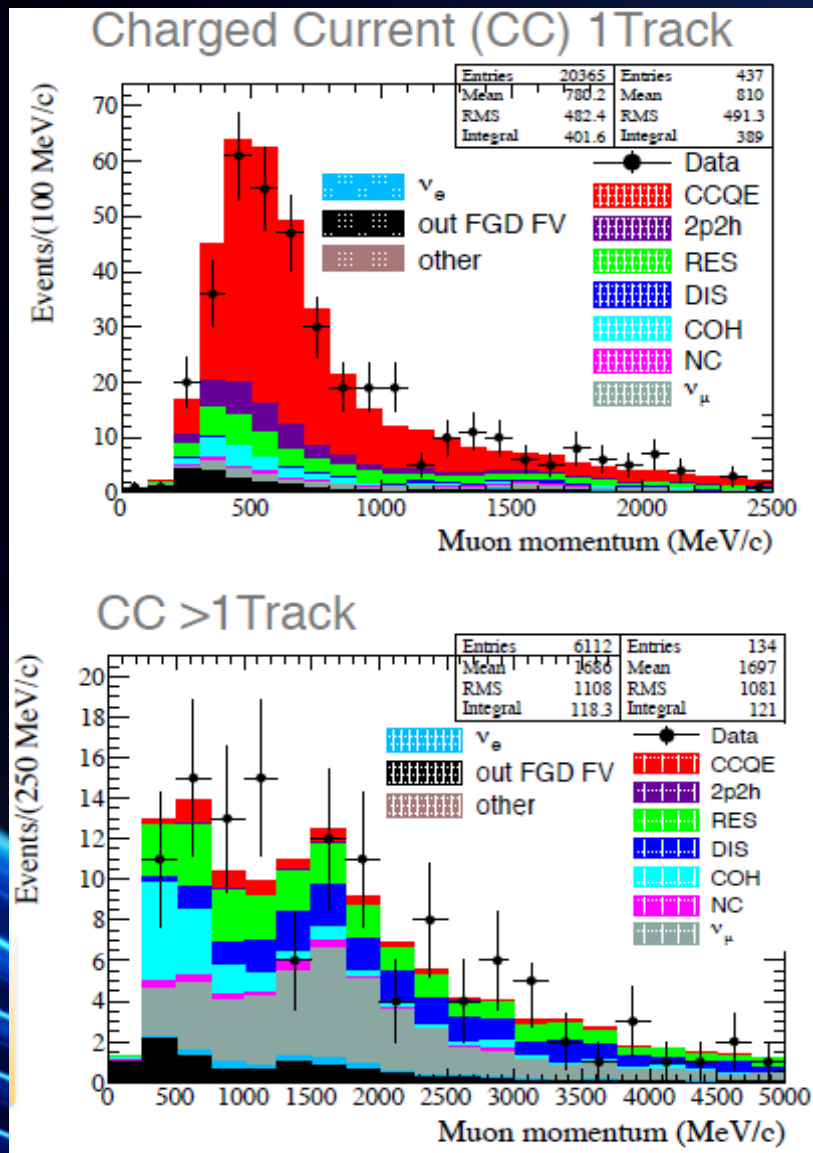
Kategorie przypadków dla wiązki $\bar{\nu}$



Oddziaływania $\bar{\nu}_\mu$ -
wybierane wymagając,
żeby najbardziej energetyczny tor odpowiadał μ^+

Domieszka ν_μ w wiązce $\bar{\nu}_\mu$ (30%) -
wybierana przez zidentyfikowanie negatywnie naładowanego μ^-

Informacja z wiązki $\bar{\nu}$



Fit – dopasowanie do danych ν i $\bar{\nu}$ bliskiego detektora ND280

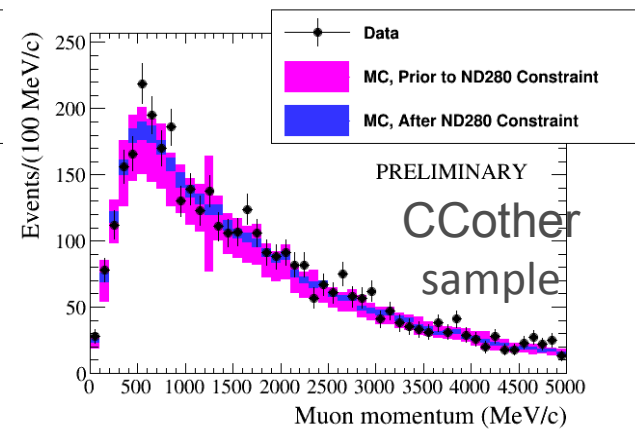
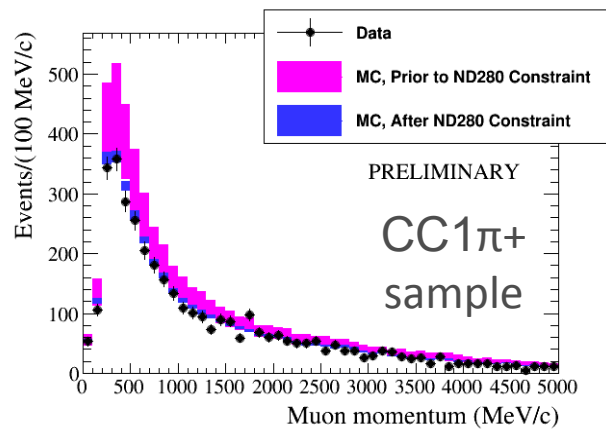
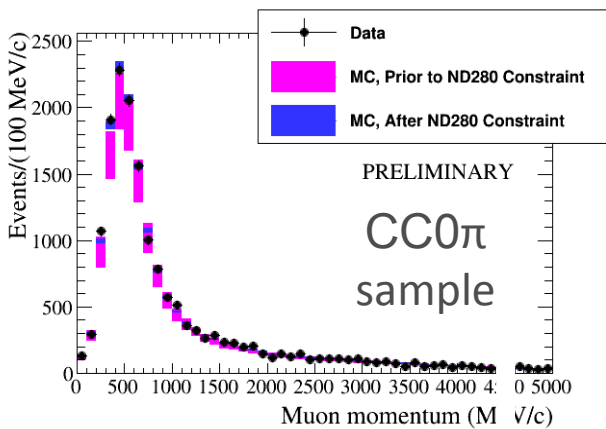
dopasowanie MC do danych wykorzystując 2-wymiarowe rozkłady p - θ zrekonstruowanego pędu i kierunku μ

Mierzone wielkości:

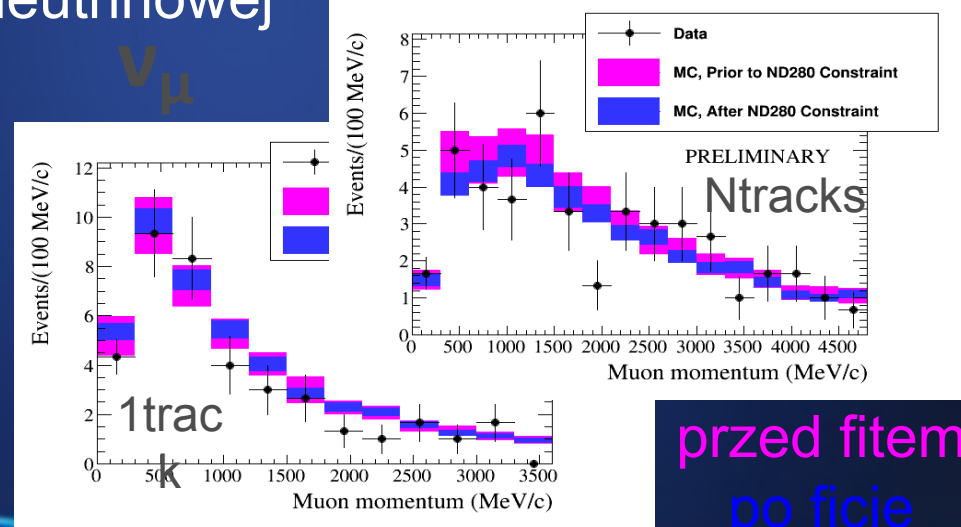
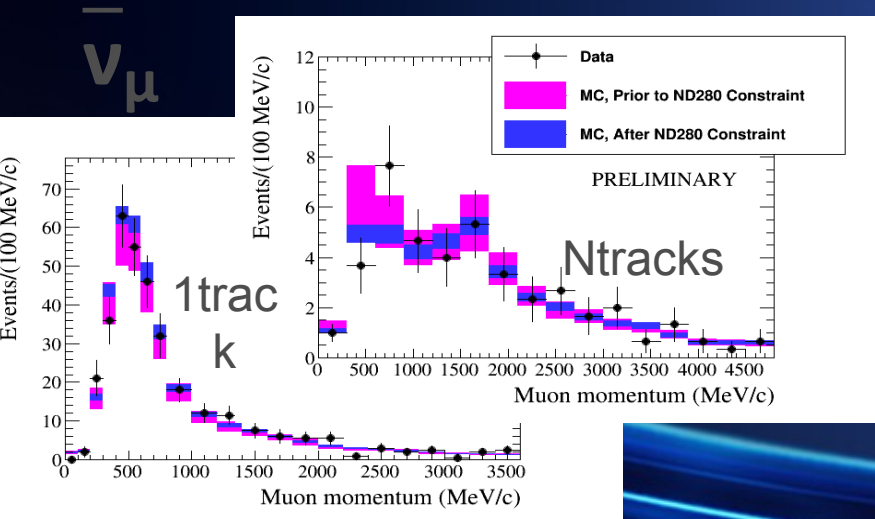
- Strumień ν i $\bar{\nu}$
- M_A^{QE}
- M_A^{RES}
- Normalizacje przekrojów czynnych:
 - CCQE
 - CC1 π
 - 2p2h

Pomiar bliskiego detektora

- Dane zebrane dla wiązki neutronowej



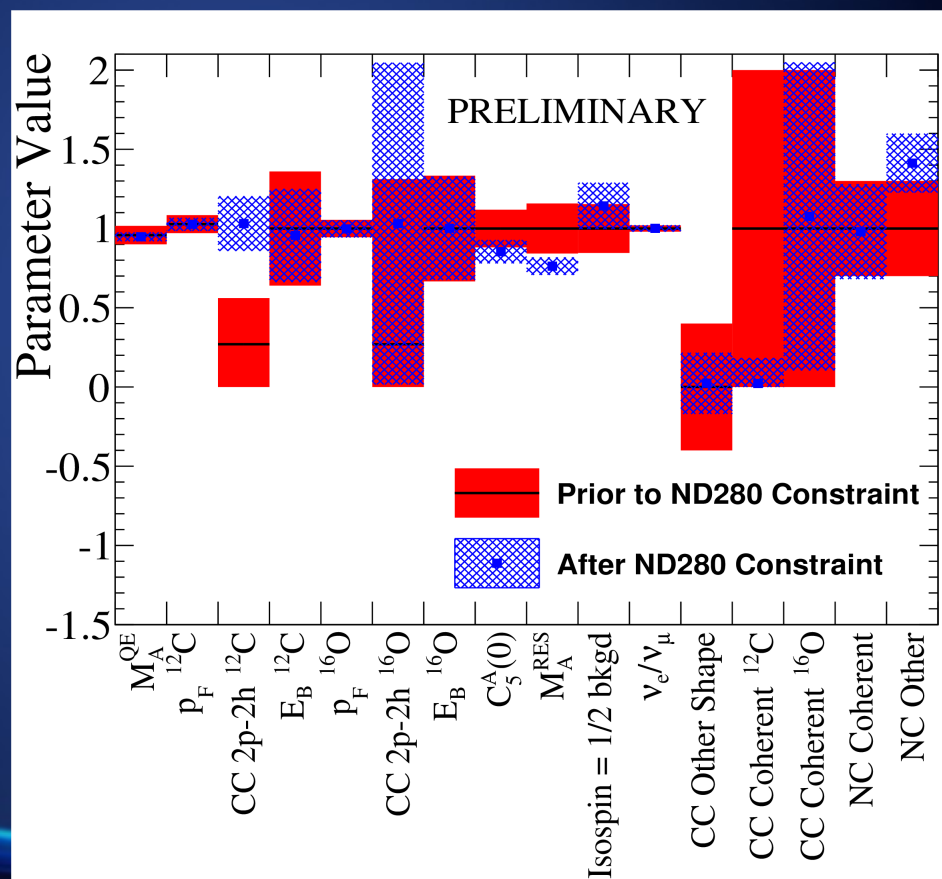
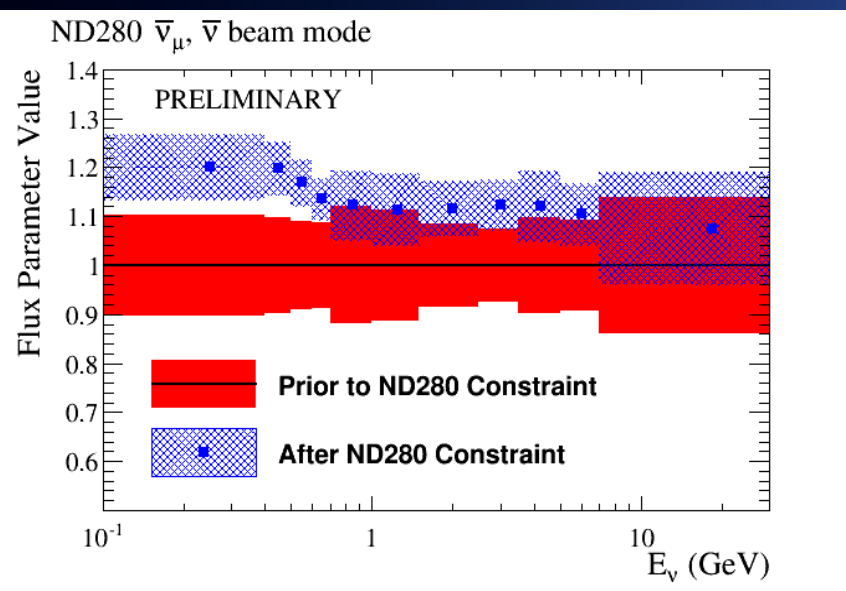
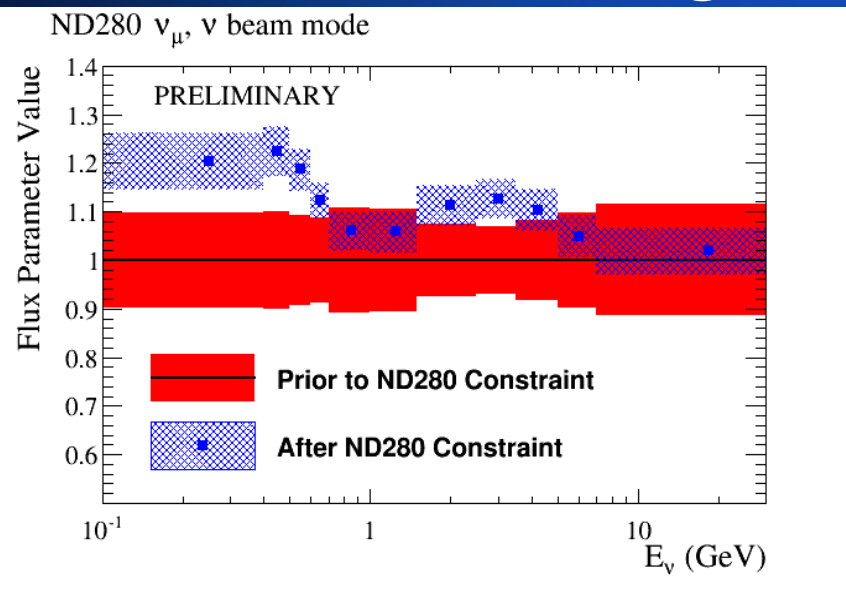
- Dane zebrane dla wiązki anty-neutronowej



przed fitem
po ficie

Pomiar bliskiego detektora

- Strumień ν i $\bar{\nu}$ jest większy niż generowany
- Pomiar jest czuły na normalizację CC 2ph2



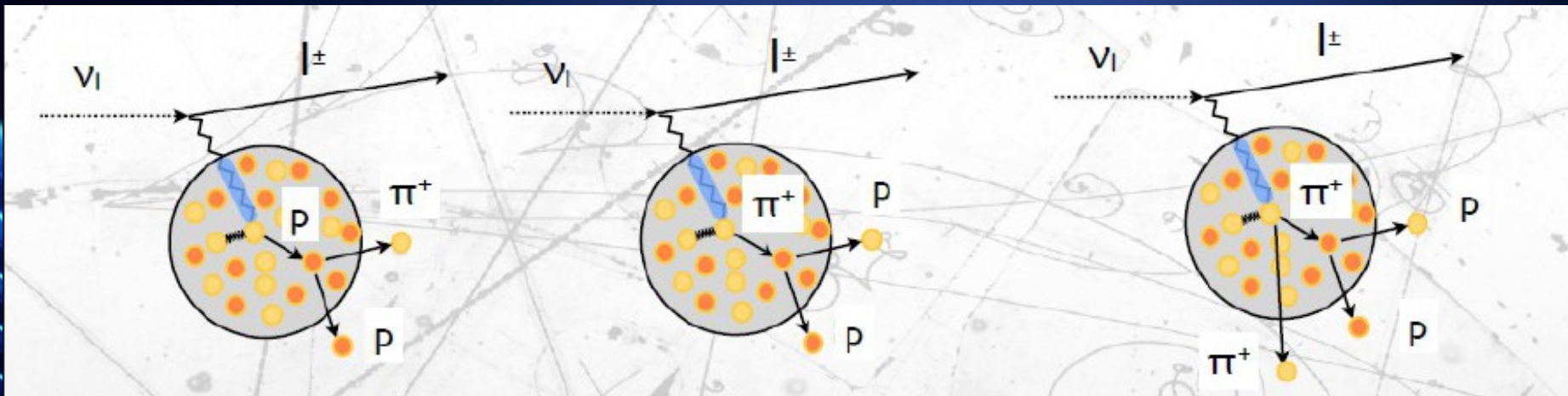
Dalsze plany - oddziaływania ν

Do planowanych eksperymentów mających na celu poszukiwanie łamania CP wymagana jest znajomość systematyki na poziomie 1-3%
W T2K systematyka wynosi obecnie 11%

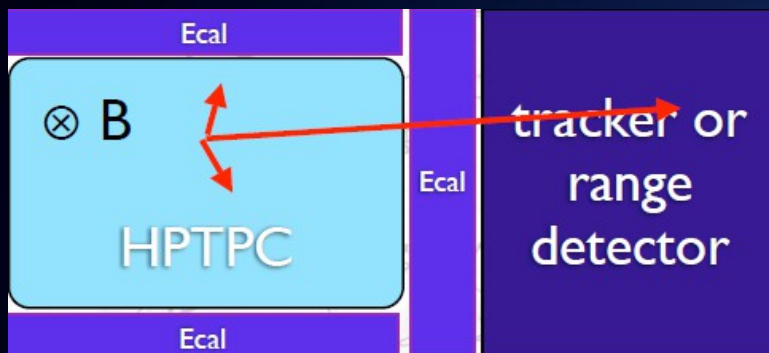
Wymagany precyzyjny opis oddziaływań ν :

- Oddziaływania 2p2h a CCQE
- Produkcja π i absorpcja – procesy Final State Interactions

FSI wpływa na topologię przypadku

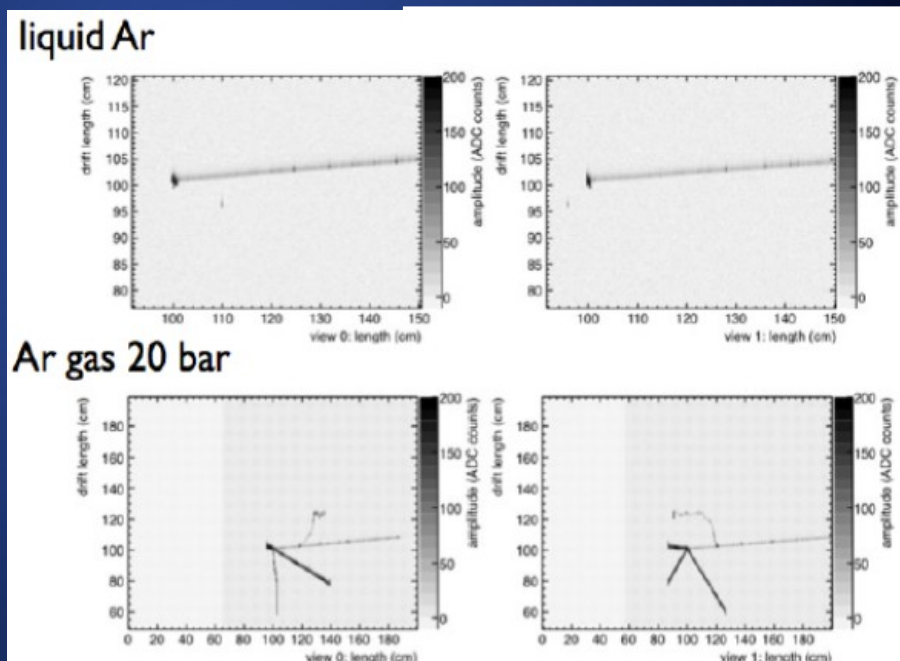


High Pressure TPC

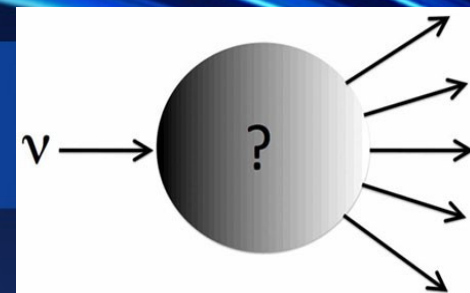


Potrzebny detektor umożliwiający rekonstrukcję niskoenergetycznych hadronów, a jednocześnie będący wystarczająco masywny żeby być tarczą dla oddziaływań neutrin

- Tarcza Ar/ He/ Ne
- Wysokie ciśnienie ~ 10 bars zapewnia większą liczbę oddziaływań n
- Umieszczony w polu magnetycznym
- 3 wymiarowa rekonstrukcja w 4π
- Oddziaływania ν i rekonstrukcja w gazie – brak obszaru martwego
- Niski próg na detekcję hadronów
- Doskonałe właściwości identyfikacji cząstek - PID



Podsumowanie



- Zrozumienie oddziaływań 2p2h ma wpływ na precyzyjne pomiary oscilacji w obecnych i przyszłych eksperymentach
- Oddziaływania 2p2h już są modelowane w istniejących Generatorach oddziaływań neutrin NuWro, NEUT
- Po raz pierwszy wykonano pomiar na danych bliskiego Detektora z uwzględnieniem oddziaływań CC-2p2h
- Prowadzonych jest kilka analiz dedykowanych pomiarom sygnału od oddziaływań 2p2h:
 - Wykazanie, że bez oddziaływań 2p2h nie można opisać danych
 - Wyznaczenie rozkładów zmiennych czułych na 2p2h