

Badanie oddziaływań neutrin w eksperymencie T2K pod kątem obecnych i przyszłych badań oscylacji neutrin



Marcela Batkiewicz-Kwaśniak

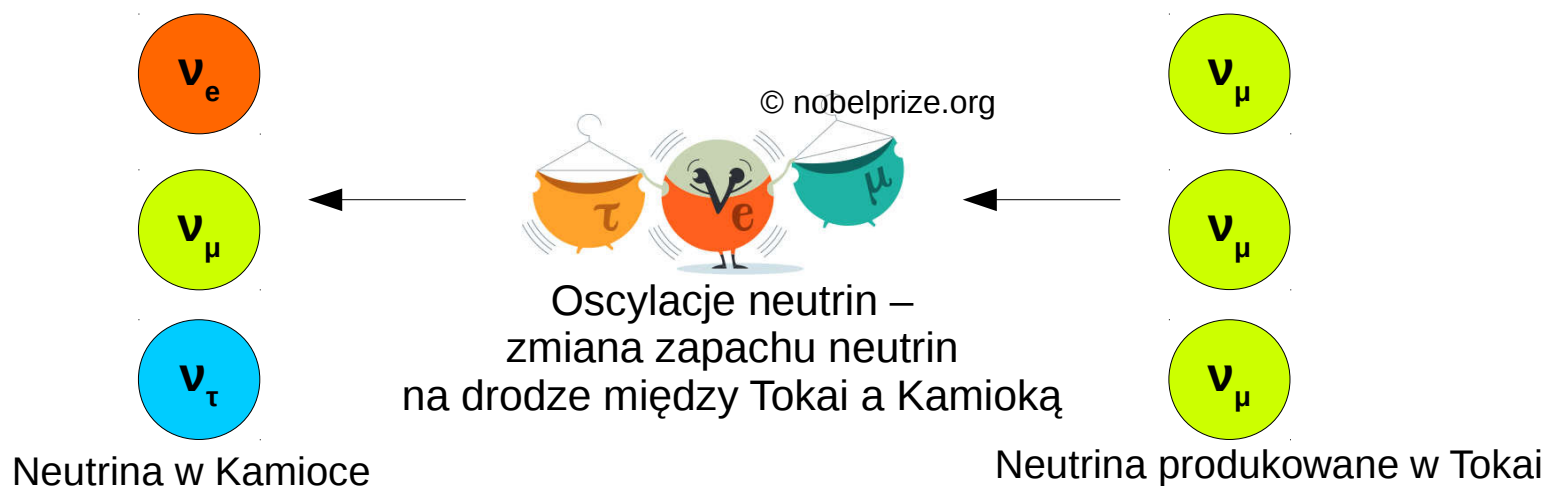
NZ15, IFJ PAN

auger.ifj.edu.pl

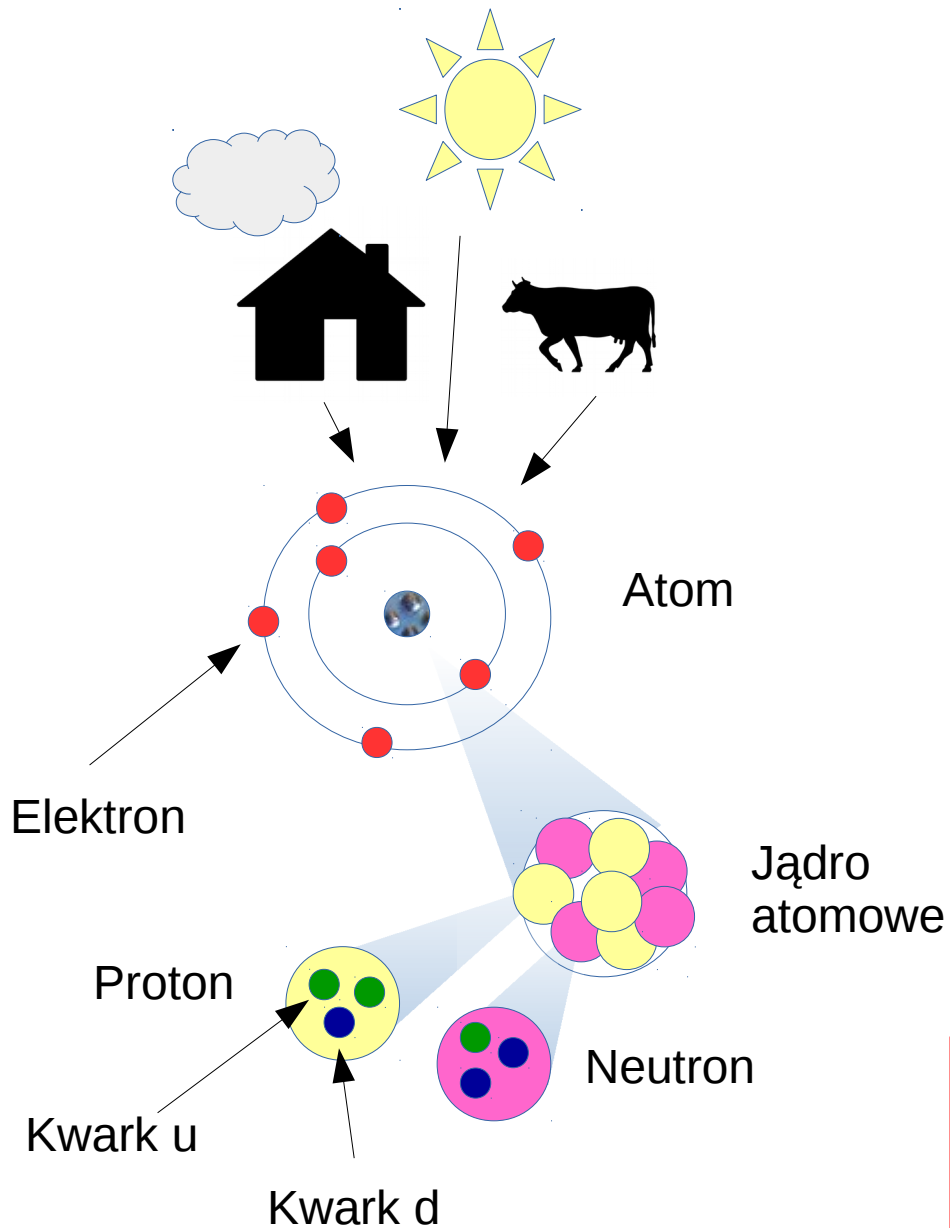
IFJ PAN – Dzień Otwarty
18 czerwca 2021

Wstęp

- Eksperyment T2K (Tokai to Kamioka)
 - eksperyment badający oscylacje neutrin (w tym łamanie symetrii CP w oscylacjach) oraz oddziaływania neutrin
 - prowadzony w Japonii przez współpracę około 60 instytucji (w tym IFJ PAN) z ponad 10 krajów
 - w kwietniu 2020 opublikował w *Nature* pierwsze wyniki ograniczające możliwe wartości fazy δ_{CP} – parametru związanego z symetrią CP, której ewentualnie łamanie objawia się różnicami między materią i antymaterią
 - łamanie tej symetrii jest jednym z warunków koniecznych do wyjaśnienia dlaczego Wszechświat, jaki widzimy obecnie, jest zbudowany prawie wyłącznie z materii i nie ma w nim prawie antymaterii



Składniki materii



Cząstki elementarne

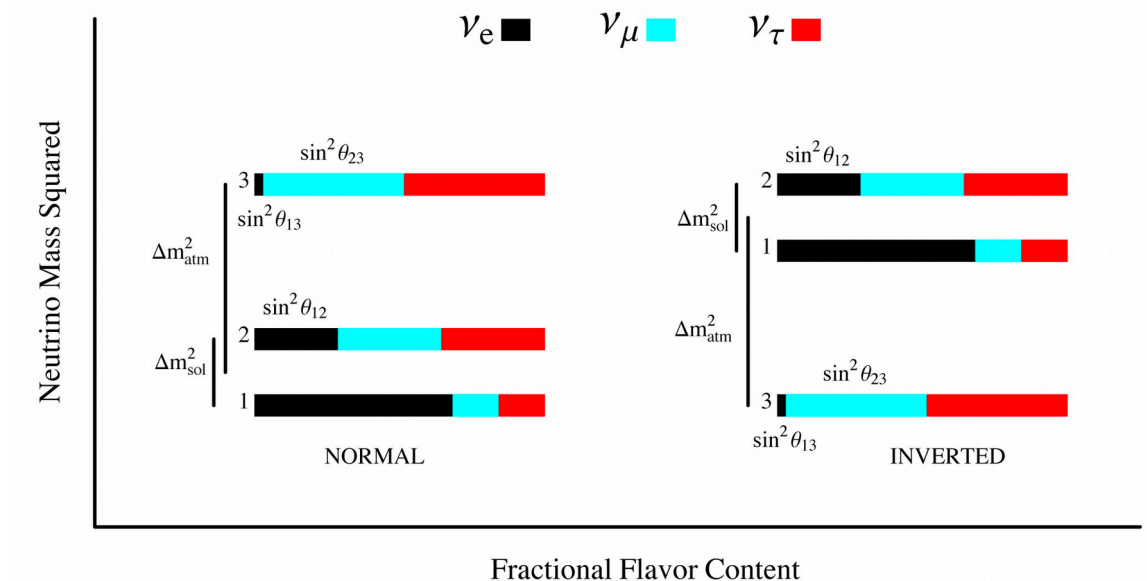
Rodzina:	I	II	III
Kwarki	u	c	t
	d	s	b
Leptony	e	μ	τ
	ν_e	ν_μ	ν_τ

Trzy rodzaje (zapachy) neutrin:

- ν_e - elektronowe
- ν_μ - mionowe
- ν_τ - taonowe

+ antycząstki

Mieszanie neutrin

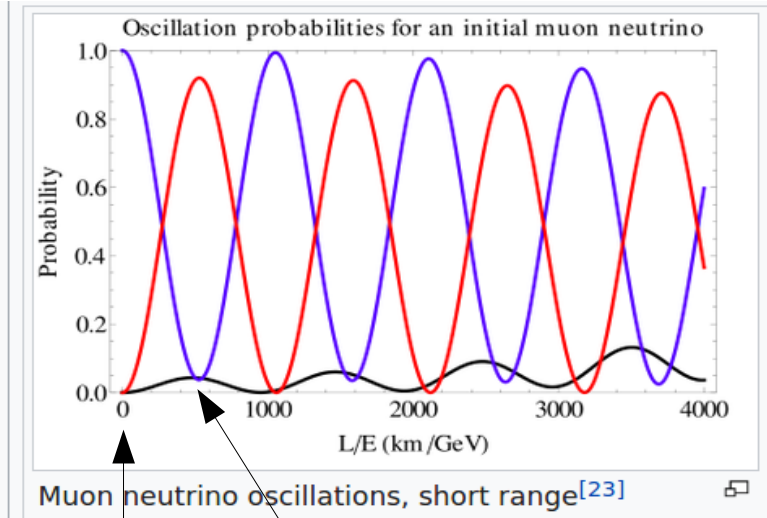
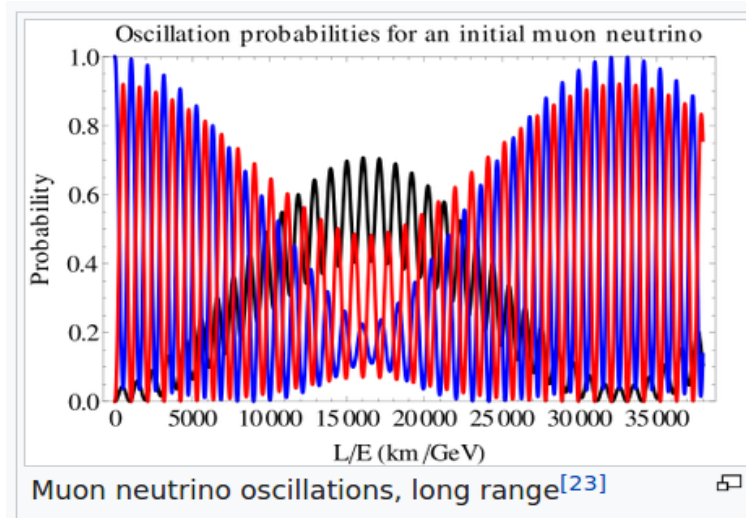


$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

$$U = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix}}_{\text{atmospheric neutrino oscillation}} \underbrace{\begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix}}_{\text{CP violation}} \underbrace{\begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\text{solar neutrino oscillation}}$$

where $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$, $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$ and $\delta = \delta_{CP}$.

Oscylacje neutrin



© <https://demonstrations.wolfram.com/NeutrinoOscillations/>

bliski detektor
bada wiązkę
przed zejściem
oscylacji

daleki detektor
bada wiązkę w
maksimum
oscylacji

Prawdopodobieństwo oscylacji zależy też od dwóch parametrów „eksperymentalnych”:
E – energii neutrina
L – przebytej odległości

$$J_{CP} = \frac{1}{8} \cos \theta_{13} \sin(2\theta_{12}) \sin(2\theta_{23}) \sin(2\theta_{13}) \sin \delta_{CP} = 0.033 \sin \delta_{CP}$$

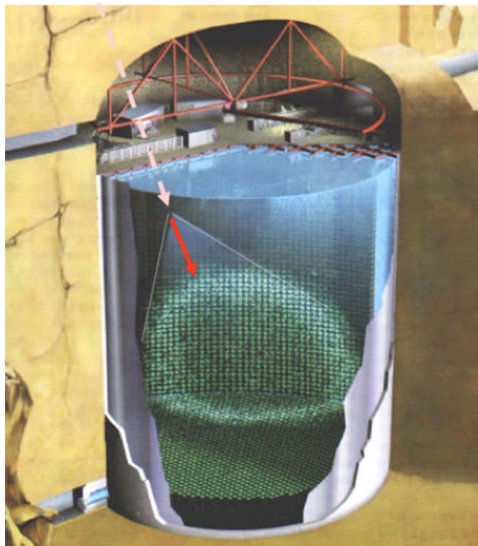
$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) \approx 1 - 4 \cos^2 \theta_{13} \sin^2 \theta_{23} \times (1 - \cos^2 \theta_{13} \sin^2 \theta_{23}) \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m_{32}^2 L}{E} \right)$$

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \approx \sin^2(2\theta_{13}) \sin^2 \theta_{23} \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m_{32}^2 L}{E} \right) \mp \frac{1.27 \Delta m_{21}^2 L}{E} 8 J_{CP} \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m_{32}^2 L}{E} \right)$$

“-” dla ν
“+” dla $\bar{\nu}$

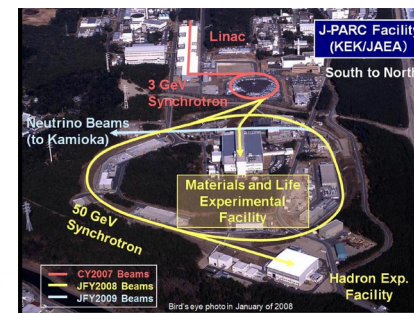
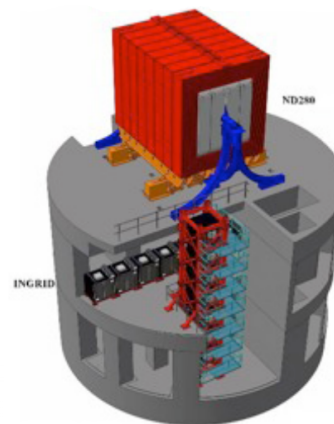
Eksperyment T2K

Daleki detektor w Kamioce



Super-Kamiokande

Kompleks akceleratorów i bliskie detektory w Tokai



Near Detectors

J-PARC

Neutrina w Kamioce po
zajściu oscylacji. Różnica
między prawdopodobieństwami pojawienia
się $\nu_e/\bar{\nu}_e$ w wiązce ν_μ i $\bar{\nu}_\mu$
zależy od δ_{CP}

Oscylacje neutrin

295 km

Neutrino Beam

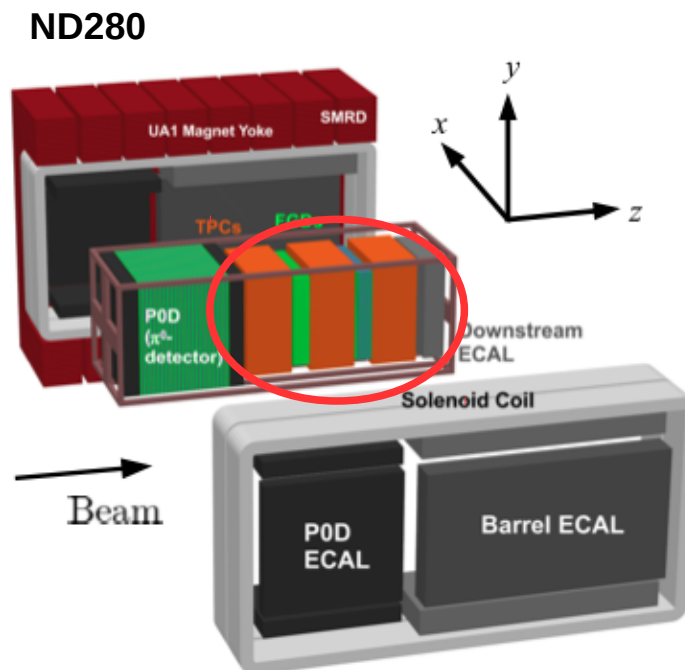
Neutrina mionowe
produkowane w Tokai



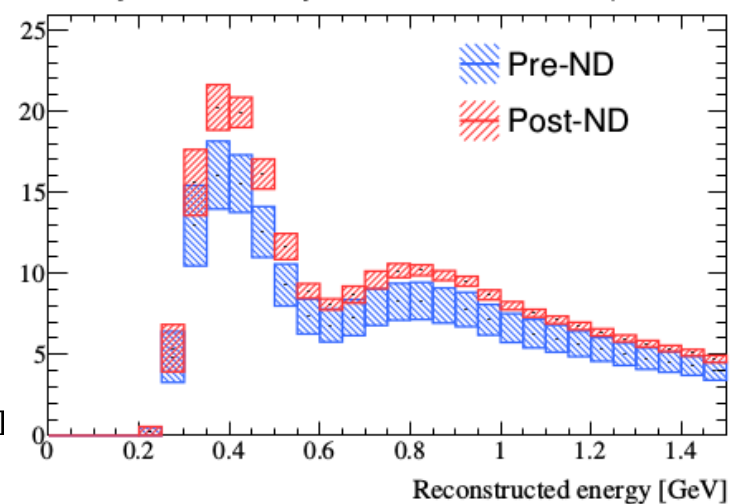
18.06.202

Bliski detektor ND280

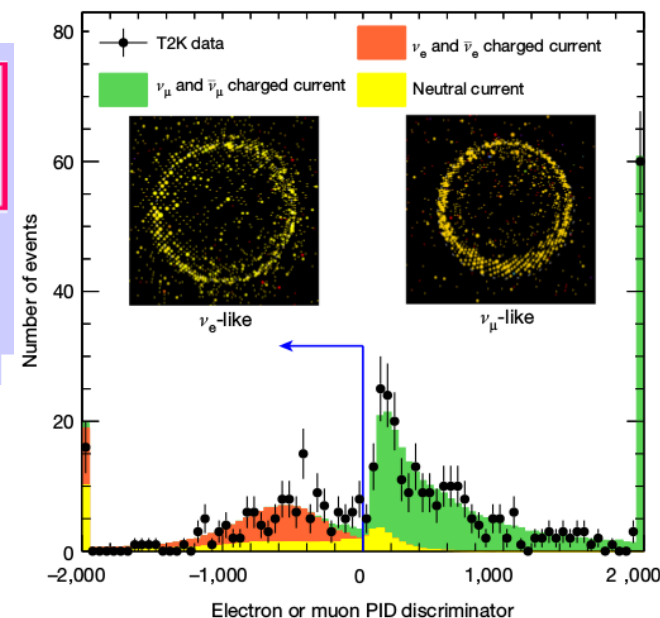
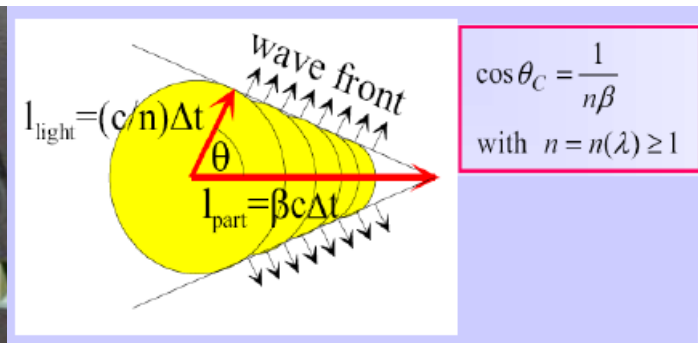
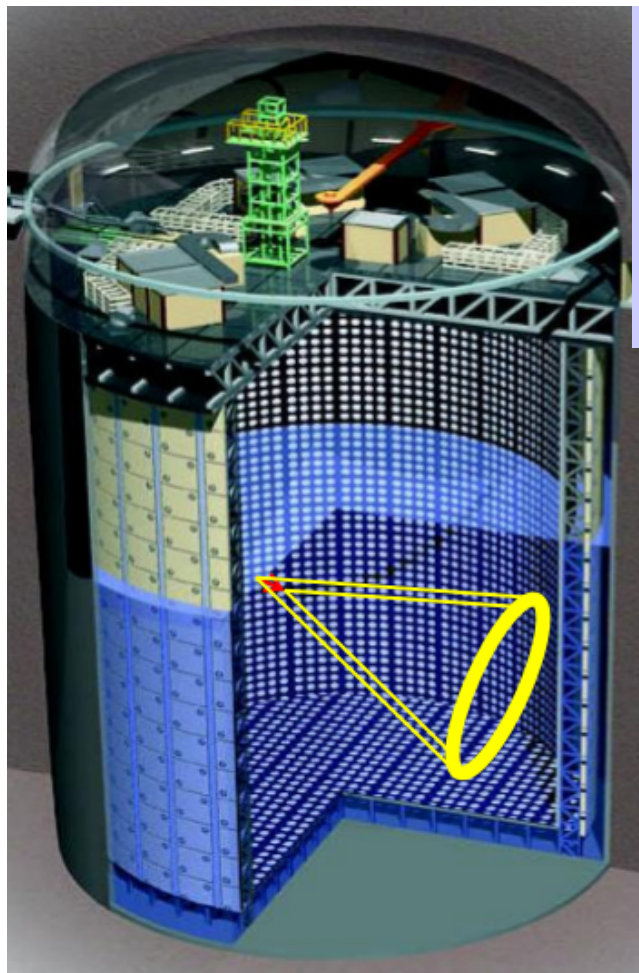
- ND280 (off-axis – 2.5°)
 - 3 pionowe komory projekcji czasowej (TPC)
 - aktywny materiał – scyntylator plastikowy
 - pasywny materiał – woda, żelazo, ołów
 - pole magnetyczne – 0.2 T
 - Badanie składu wiązki przed zejściem oscylacji
 - Badanie oddziaływań neutrin
- Obecny detektor śladowy:
 - 2 detektory FGD (Fine Grained Detectors):
FGD1 – scyntylator, FGD2 – scyntylator/woda
 - FGD umieszczone na przemian z 3 komorami TPC
 - otoczony przez kalorymetr elektromagnetyczny (ECal)
 - FGD: tarcza dla oddziaływań neutrin; detekcja krótkich torów nisko-energetycznych cząstek
 - TPC: identyfikacja cząstek naładowanych i bardzo dobry pomiar ich pędu
 - ECal: kalorymetr otaczający detektor śladowy – rejestracja cząstek neutralnych (fotonów/neutronów) i pomiar ich energii



Total syst uncertainty on neutrino mode 1Rμ events



Daleki detektor Super-Kamiokande



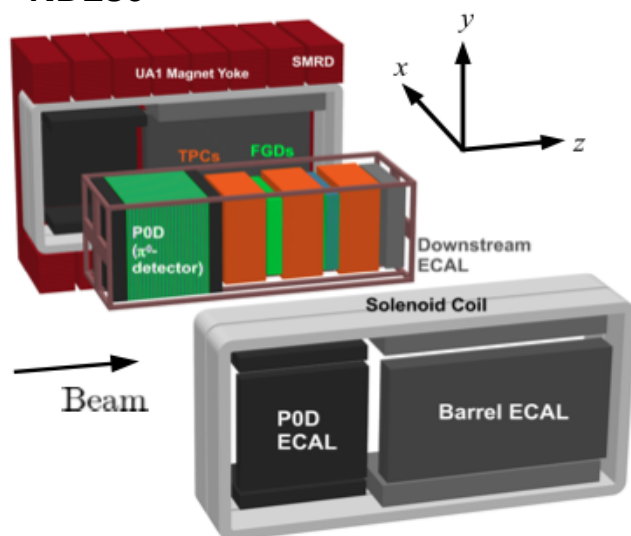
- Wodny detektor Czerenkow: walec o średnicy ~40 m i wysokości ~40 m zawierający 50 kton wody i ~13 000 fotopowielaczy
- Rejestracja cząstek naładowanych poruszających się szybciej niż światło w wodzie, produkujących stożek światła Czerenkowa
- Rozróżnienie elektronów od mionów na podstawie kształtu pierścienia światła:
 - elektrony – rozmyty pierścień (mała masa → łatwe rozpraszanie)
 - mion – pierścień o ostrych krawędziach

T2K – plany na przyszłość

- T2K faza II (T2K II) → 2023
 - modernizacja wiązki neutrin
 - modernizacja bliskiego detektora ND280
- Eksperyment Hyper-Kamiokande → 2027
 - budowa pośredniego wodnego detektora Cherenkowa IWCD (Intermediate Water Cherenkov Detector)
 - budowa dalekiego detektora Hyper-Kamiokande (o wielkości 5 x Super-Kamiokande)

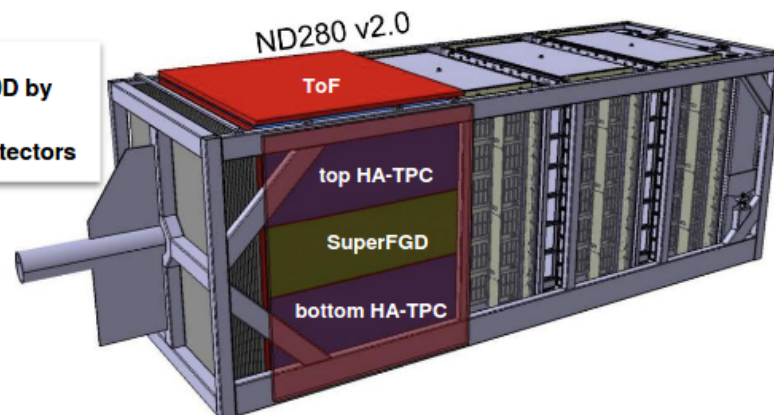
Modernizacja detektora ND280

ND280

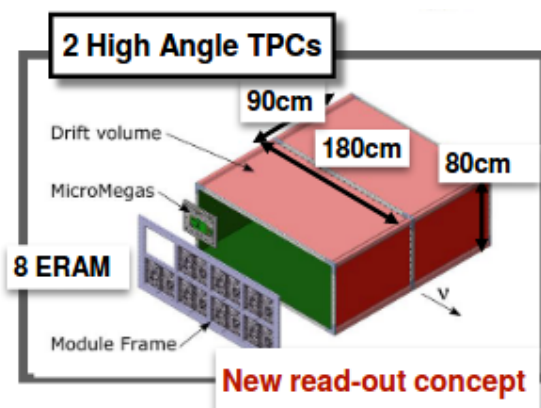


modernizacja

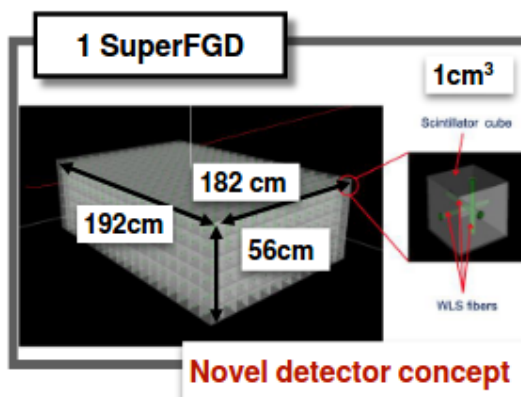
Replace P0D by
new subdetectors



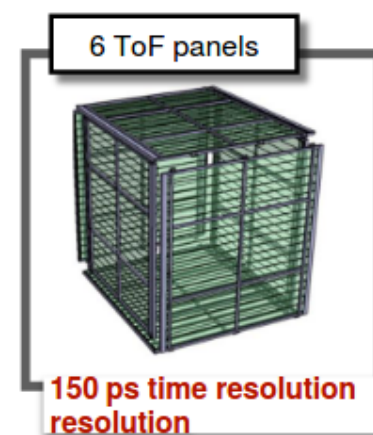
- 1 x SuperFGD – detektor z 2 mln kostek o wymiarach 1cm^3 ze scyntylatora plastikowego i odczytem 3D
- 2 x poziome komory TPC
- 6 x detektory czasu przelotu TOF (Time Of Flight)



NIM A 957 163286 (2020)

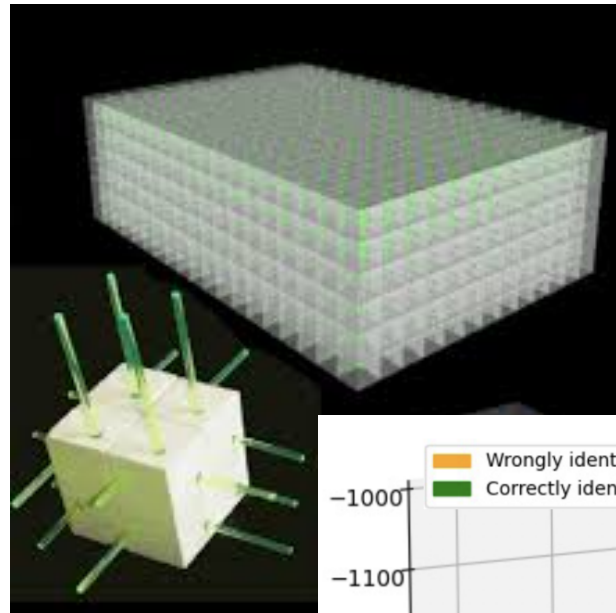


JINST 13, P02006 (2018)
JINST 15 P12003 (2020)

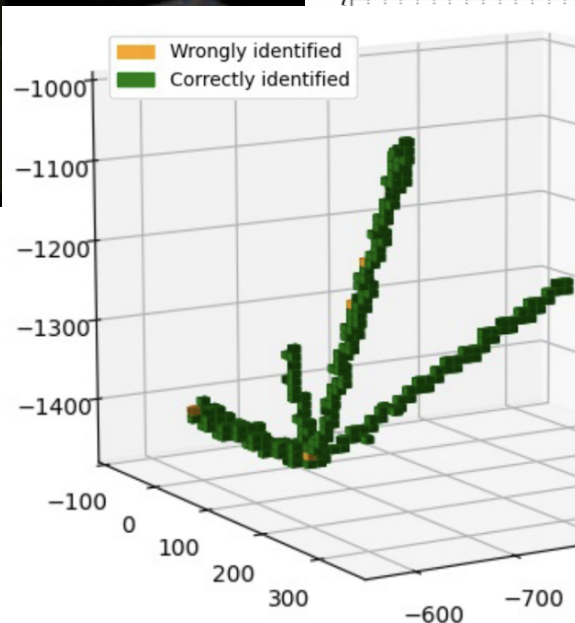
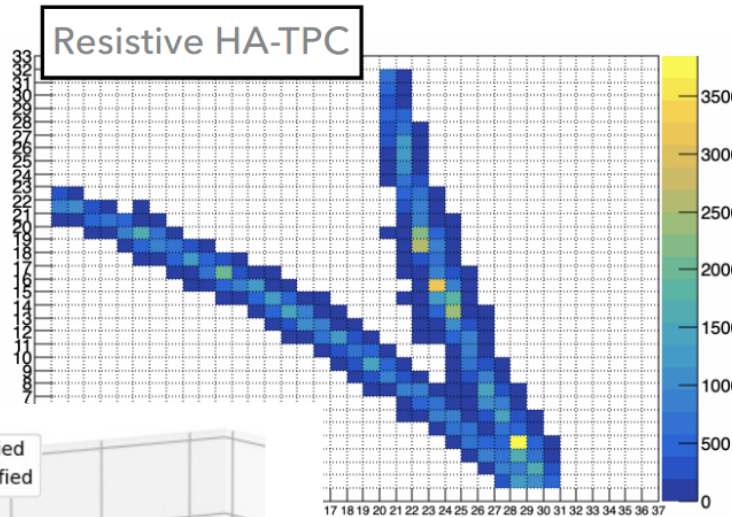


JPS Conf. Proc. 27, 011005 (2019)

Oddziaływania neutrin w nowym poddetektorze śladowym ND280

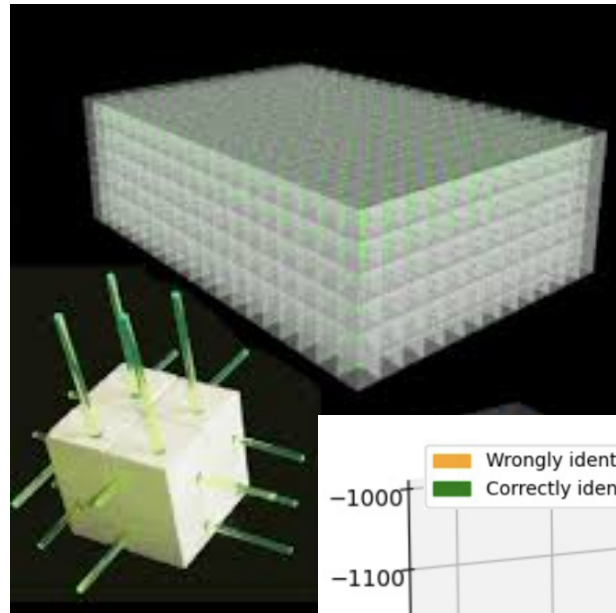


SuperFGD

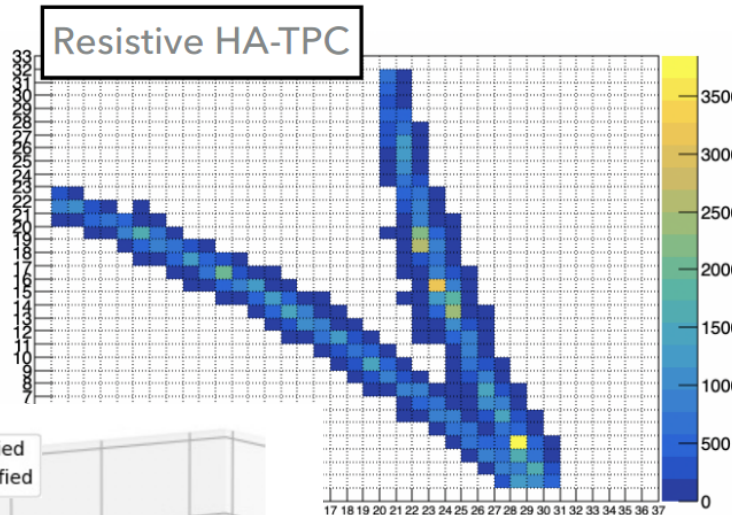
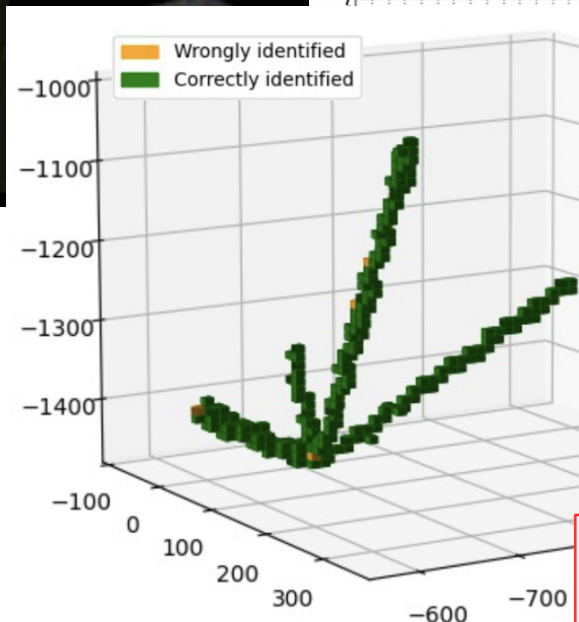


- Poziome TPC – rejestracja cząstek produkowanych pod dużymi kątami
 - TOF – rozróżnienie cząstek wchodzących i wychodzących oraz pomoc w identyfikacji na podstawie pomiaru prędkości cząstki (dla danego pędu)
 - SuperFGD – rejestracja nisko-energetycznych cząstek we wszystkich kierunkach dzięki bardzo dużej granulacji, zastosowaniu kostek zamiast pasków i odczytowi wszystkich współrzędnych dla pojedynczej cząstki
- ➔ Znacznie lepsze rozróżnienie oddziaływań neutrin oraz ich właściwości kinematycznych

Oddziaływania neutrin w nowym poddetektorze śladowym ND280



SuperFGD



- Poziome TPC – rejestracja cząstek produkowanych pod dużymi kątami
- TOF – rozróżnienie cząstek wchodzących i wychodzących oraz pomoc w identyfikacji na podstawie pomiaru prędkości cząstki (dla danego pędu)

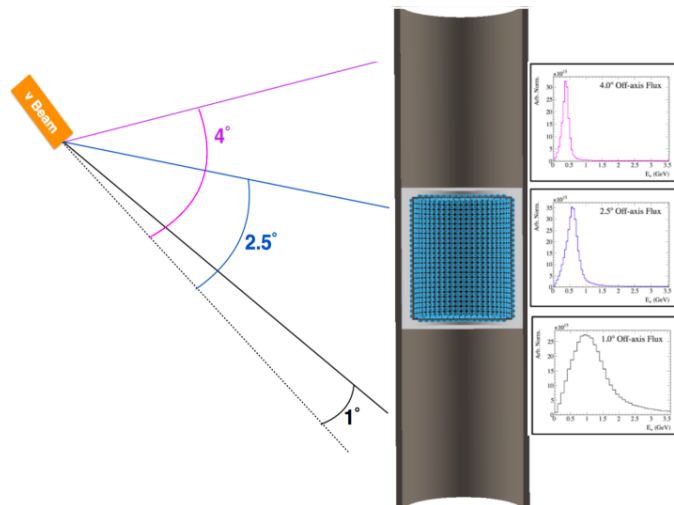
- SuperFGD – rejestracja nisko-energetycznych cząstek we wszystkich kierunkach dzięki bardzo dużej granulacji, zastosowaniu kostek zamiast pasków i odczytowi wszystkich współrzędnych dla pojedynczej cząstki

➔ Znacznie lepsze rozróżnienie oddziaływań neutrin oraz ich właściwości kinematycznych

Możliwe prace lic/mgr/inż związane z opracowaniem metod rekonstrukcji cząstek oraz wyborem próbek oddziaływań neutrin z użyciem nowych poddetektorów

Hyper-Kamiokande

- Budowa tunelu już się rozpoczęła
- Planowane rozpoczęcie zbierania danych to 2027
- Potwierdzenie na poziomie 5σ czy symetria CP jest zachowana czy łamana w oscylacjach neutrin dzięki większej statystyce i mniejszych błędach systematycznych

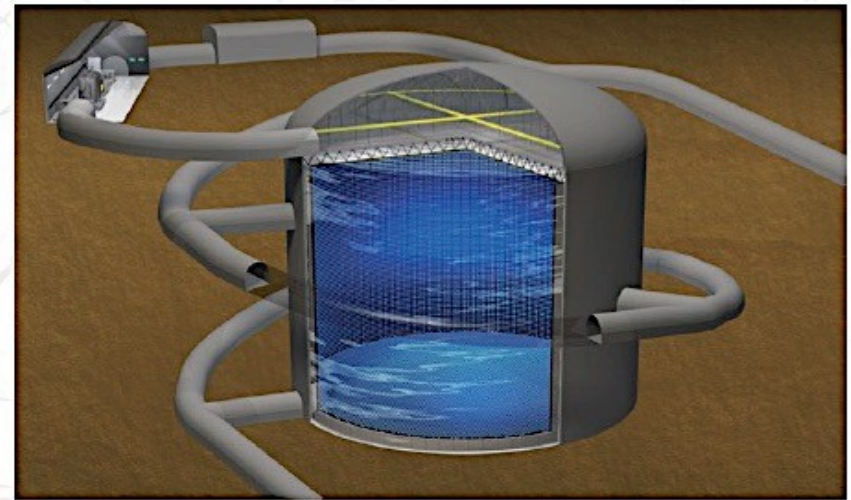


Pośredni wodny detektor Cherenkova IWCD

18.06.2021

Dzień Otwarty IFJ PAN, eksperyment T2K

Detektor Hyper-Kamiokande



	SK	HK
Site depth	Mozumi (1000m)	Tochibora (650m)
# PMT	11,129	40,000
Photo-coverage	40 %	40% (x2 QE)
Mass	50 ktons	260 ktons
Fiducial mass	22.5 ktons	188 ktons

Proponowane tematy prac

<https://auger.ifj.edu.pl/kisd.html>

- licencjackie/magisterskie/inżynierskie
 - Rekonstrukcja pionów neutralnych w nowym poddetektorze śladowym zmodernizowanego bliskiego detektora ND280 w eksperymencie T2K