

# Oscylacje neutrin - najnowsze wyniki

Katarzyna Grzelak

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych  
IFD UW

Seminarium Fizyka Jądra Atomowego  
22.11.2012

- Przez blisko dziesięć lat, jednym z najważniejszych celów eksperymentów neutrinowych było zmierzenie brakującego elementu modelu oscylacji neutrin: kąta  $\theta_{13}$
- Niezerowe (podobnie jak dwa pozostałe kąty mieszania)  $\theta_{13}$  otwiera możliwość pomiaru fazy łamania symetrii CP

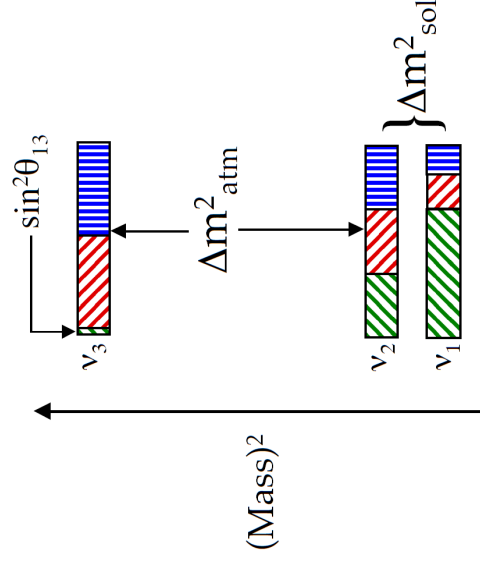
# PLAN

- 1 Wprowadzenie
- 2 Eksperymenty reaktorowe vs. eksperymenty akceleratorowe
- 3 Pomiar  $\theta_{13}$  w eksperymencie T2K
- 4 Pomiar  $\theta_{13}$  w eksperymencie Daya Bay

# MACIERZ MIESZANIA DLA NEUTRIN

Trzy zapachy neutrin jako kombinacja trzech stanów własnych masy.

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



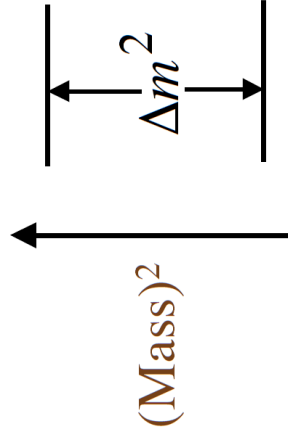
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} =$$

$$\underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix}}_{\nu \text{ atmosferyczne}} \underbrace{\begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13} e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13} e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix}}_{\nu \text{ reaktorowe, LBL}} \underbrace{\begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\nu \text{ słoneczne}} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

$\nu$  atmosferyczne       $\nu$  reaktorowe, LBL       $\nu$  słoneczne

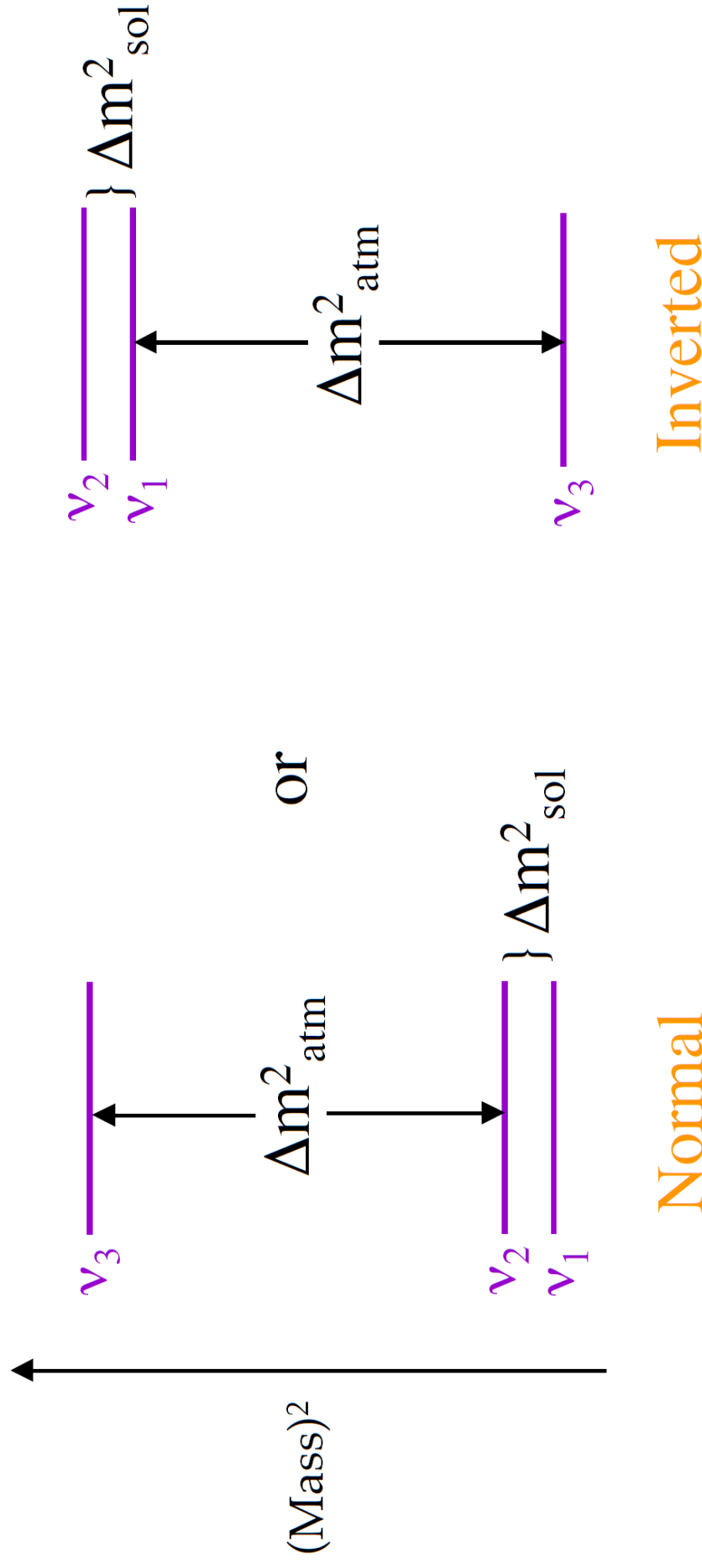
$s_{ij} = \sin \theta_{ij}$ ,  $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$ ,  $\delta \rightarrow$  faza łamania CP

- **Parametry modelu oscylacji neutrino:** 3 kąty mieszania  $\theta_{23}$ ,  $\theta_{13}$  i  $\theta_{12}$ , 1 faza łamania symetrii CP  $\delta$  i dla trzech rodzajów neutrino 2 niezależne różnice mas  $\Delta m^2$ . ( $\Delta m_{kj}^2 \equiv m_k^2 - m_j^2$ )
- W sytuacji gdy widmo mas neutrino ma efektywnie tylko 2 poziomy:



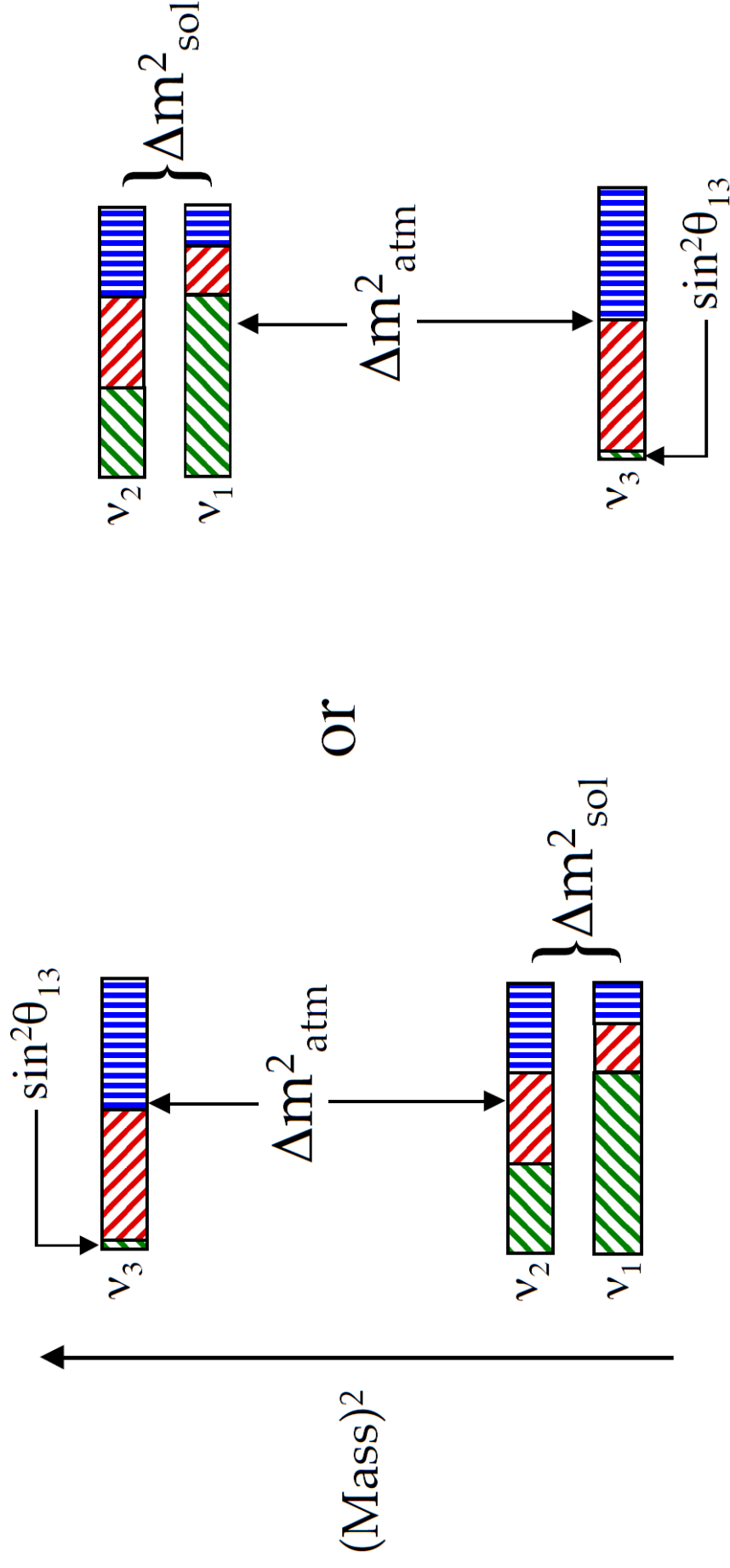
$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) \simeq \sin^2 2\theta_{\alpha\beta} \sin^2 \left[ 1.27 \Delta m^2 (\text{eV}^2) \frac{L(\text{km})}{E_\nu(\text{GeV})} \right]$$

# Model z trzema zapachami neutrin



$$\Delta m^2_{\text{sol}} \cong 7.5 \times 10^{-5} \text{ eV}^2, \quad \Delta m^2_{\text{atm}} \cong 2.3 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

# Model z trzema zapachami neutrin



Normal

Inverted

$$\nu_e [ |U_{e1}|^2 ]$$

$$\nu_\mu [ |U_{\mu i}|^2 ]$$

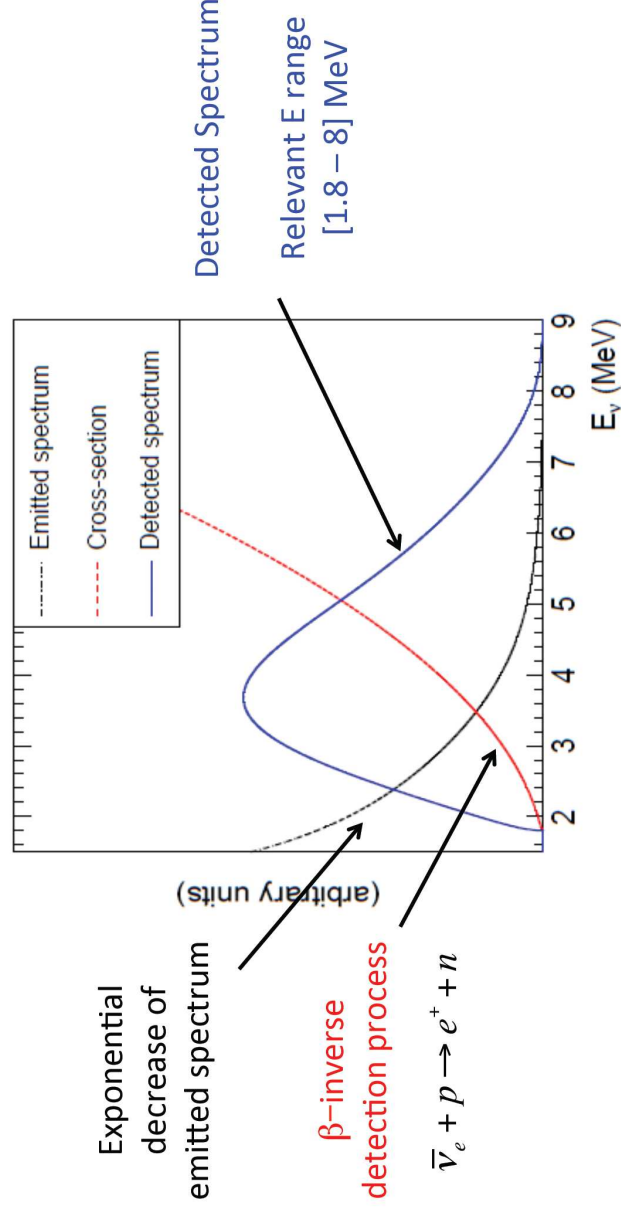
$$\nu_\tau [ |U_{\tau i}|^2 ]$$

# EKSPERYMENTY REAKTOROWE VS EKSPERYMENTY AKCELERATOROWE



- Neutrina z rozpadów  $\beta$  produktów rozszczepienia U i Pu
- Czysta wiązka  $\bar{\nu}_e$
- $E \sim \text{MeV}$
- $\sim 2 \cdot 10^{20} \bar{\nu}_e / \text{GW}$
- **Badanie zanikania  $\bar{\nu}_e$**

## EKSPERYMENTY REAKTOROWE



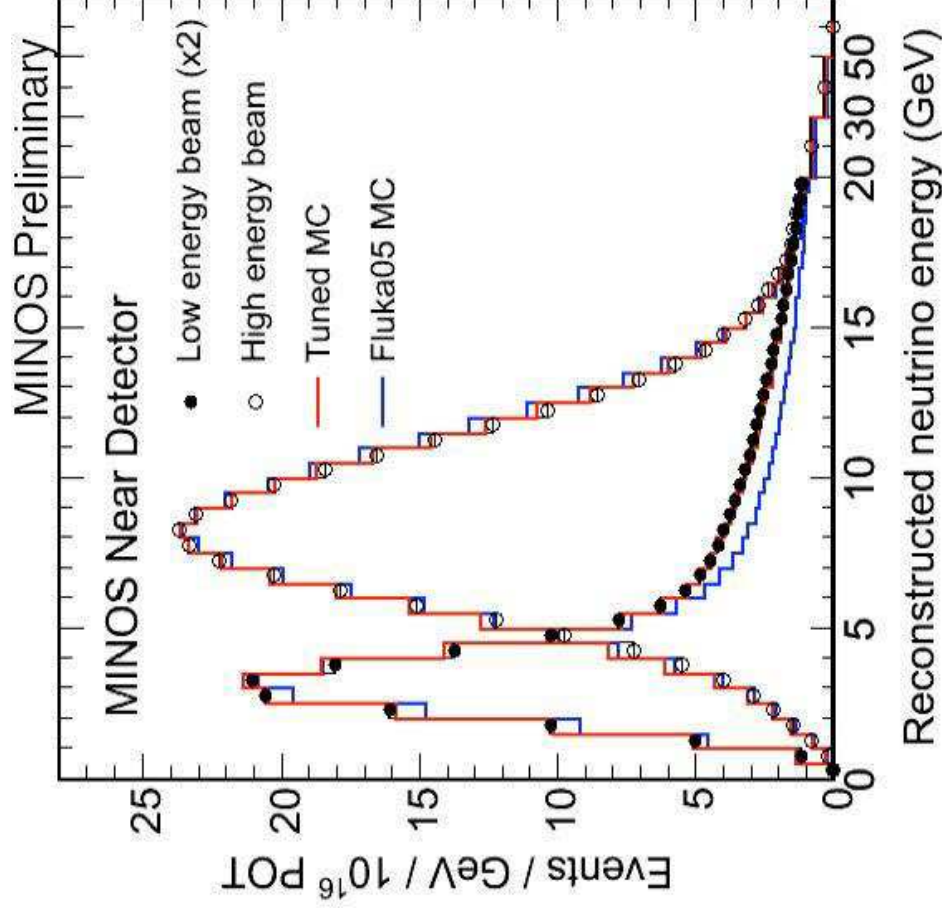
Kyoto - Neutrino 2012

D. Lhuillier - CEA Saclay

4

## EKSPERYMENTY AKCELERATOROWE

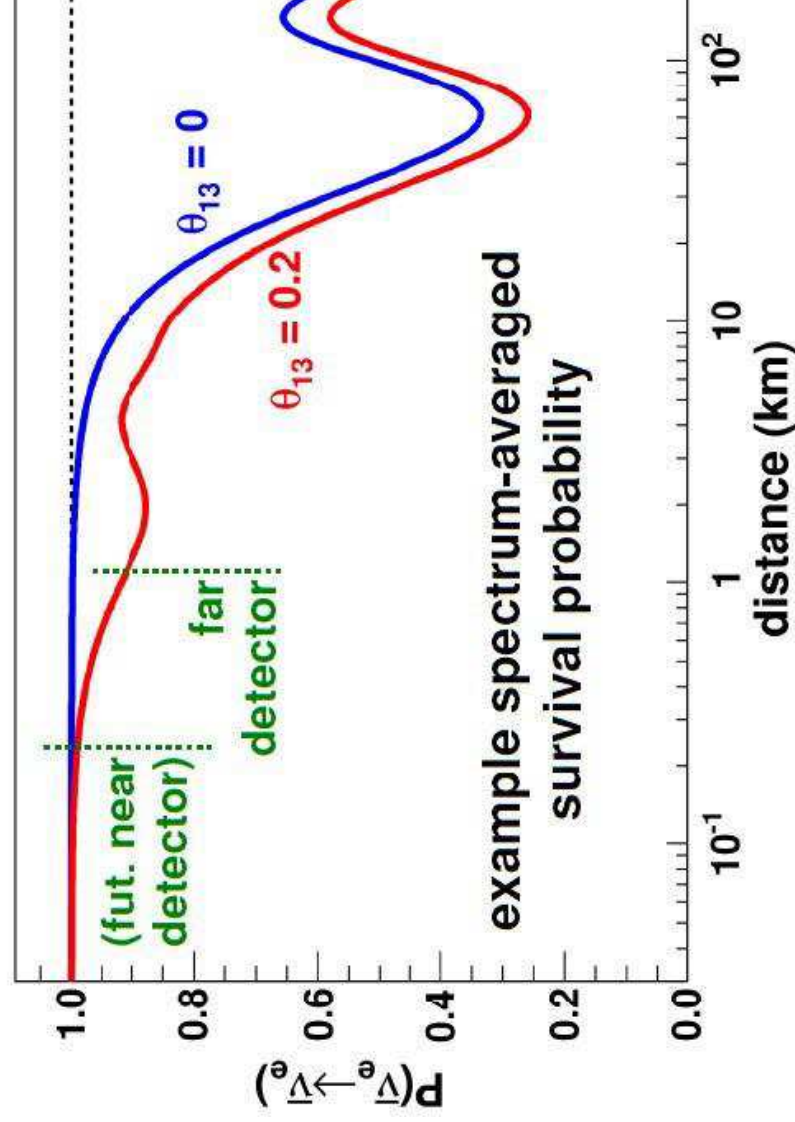
- Neutrino głównie z rozpadów  
 $\pi \rightarrow \mu + \nu_\mu$
- Przykładowa intensywność:  
( $\sim 6$  lat pracy eksp. MINOS  
 $\rightarrow \sim 1.5 \times 10^{21}$  pot  
(protonów-na-tarczę)
- Kontrolowana wiązka  $\nu_\mu$  z  
domieszkami  $\bar{\nu}_\mu, \nu_e, \bar{\nu}_e$
- $E \sim \text{GeV}$
- **Badanie pojawiania się  $\nu_e$  ( $\bar{\nu}_e$ )**



# Poszukiwanie $\theta_{13}$

Prawdopodobieństwo oscylacji w eksperymentach reaktorowych

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) \simeq 1 - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2\left(\frac{1.27 \Delta m_{atm}^2 L}{E_\nu}\right) - \cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{12} \sin^2\left(\frac{1.27 \Delta m_{sol}^2 L}{E_\nu}\right)$$



Przy ustalonej energii  
neutrino, pierwszy człon  
dominujący dla mniejszych  
 $L$   
(rzędu km),  
drugi dla większych  
(rzędu 100 km).

Czystszy pomiar  $\theta_{13}$

# Poszukiwanie $\theta_{13}$

Prawdopodobieństwo oscylacji w eksperymentach akceleratorowych

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = 4C_{13}^2 S_{13}^2 S_{23}^2 \cdot \sin^2 \Delta_{31}$$

leading term

CP violating (flips sign for anti- $\nu$ )

$$+8C_{13}^2 S_{12} S_{13} S_{23} (C_{12} C_{23} \cos \delta - S_{12} S_{13} S_{23}) \cdot \cos \Delta_{32} \cdot \sin \Delta_{31} \cdot \sin \Delta_{21}$$

$$-8C_{13}^2 C_{12} C_{23} S_{12} S_{13} S_{23} \sin \delta \cdot \sin \Delta_{32} \cdot \sin \Delta_{31} \cdot \sin \Delta_{21}$$

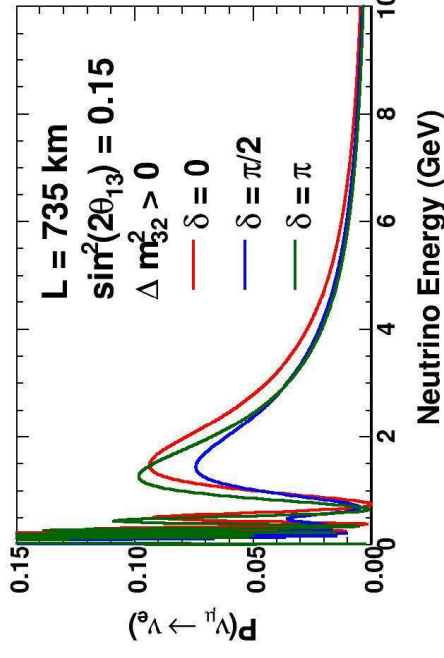
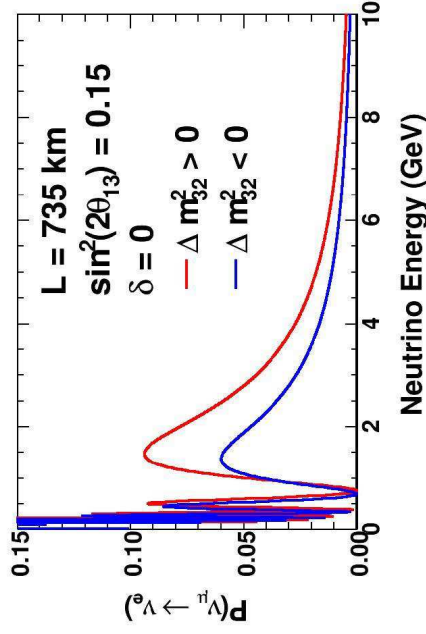
$$+4S_{12}^2 C_{13}^2 (C_{12}^2 C_{23}^2 + S_{12}^2 S_{23}^2 S_{13}^2 - 2C_{12} C_{23} S_{12} S_{23} S_{13} \cos \delta) \cdot \sin^2 \Delta_{21}$$

Solar

$$-8C_{13}^2 S_{12}^2 S_{23}^2 \cdot \frac{aL}{4E_\nu} (1 - 2S_{13}^2) \cdot \cos \Delta_{32} \cdot \sin \Delta_{31}$$

Matter

$$+8C_{13}^2 S_{13}^2 S_{23}^2 \frac{a}{\Delta m_{13}^2} (1 - 2S_{13}^2) \sin^2 \Delta_{31}$$



Mierzona kombinacja parametrów, a nie samo  $\theta_{13}$ . Dostęp do  $\delta_{CP}$  (!)

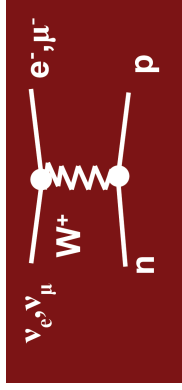
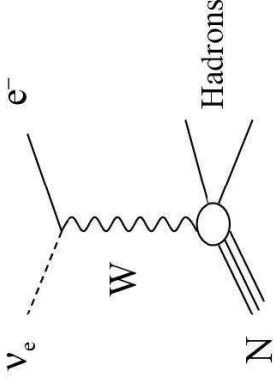
# Reaktorowe eksperymenty mierzące $\theta_{13}$

Metoda detekcji: odwrotny rozpad beta  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$

Tarcza: ciekły scyntylator z dodatkiem gadolinu

	Double Chooz	RENO	Daya Bay
Lokalizacja	Francja	Korea Płd.	Chiny
Reaktory	2(8.54GW)	6(16.52 GW)	6(17.4 GW)
Detektory	1(+1)	1+1	3+3 (4+4)
Masa	8.2t(+8.2t)	2*16.5t	6*20t
Zbieranie danych	227.9 dni	228 dni	127 dni
Liczba przyp. w dalekich det.	8249	17102	28909
Odległości	(400m)-1050m	290-1380m	364-1900m

# Akseleratorowe eksperymenty mierzące $\theta_{13}$

	T2K	MINOS
Lokalizacja	Japonia	USA
Odległości	295km	735km
Energia	0.6 GeV (pik)	3 GeV (pik)
Oddziaływania	$\nu_e + n \rightarrow e^- + p$ 	$\nu_e + N \rightarrow e^- + X$ 
Daleki det.	22kt $H_2O$	4.5kt Fe+scynt.
Liczba przyp. w dalekim det.	172	10
Inne	off-axis	pole magnet.

# POMIAR $\theta_{13}$ W EKSPERYMENCIE T2K

# EKSPERYMENT T2K



**Super-Kamiokande**  
(ICRR, Univ. Tokyo)



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

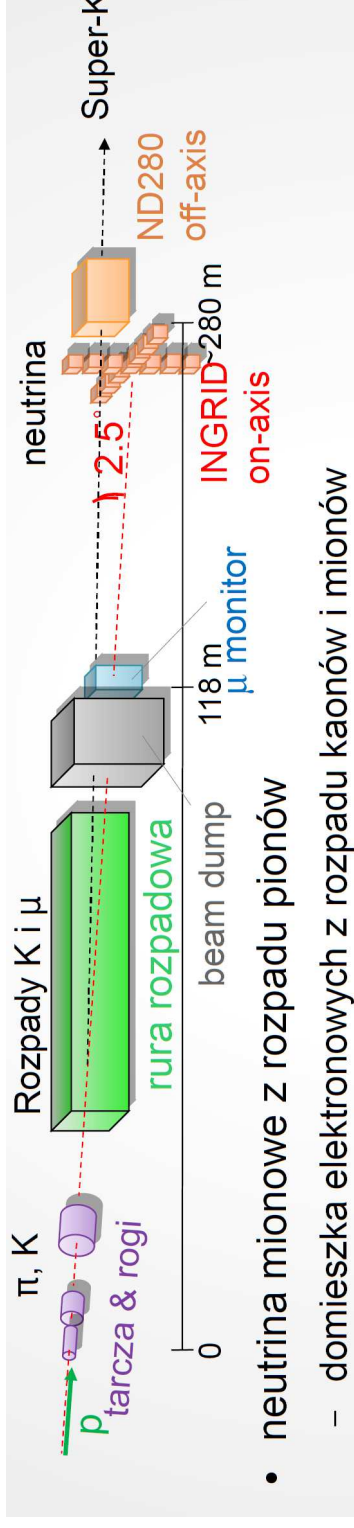


- Eksperyment w Japonii (J-PARC-Kamioka)
- Współpraca: instytucje z całego świata (w tym 6 z Polski)
- Bliski detektor (ND280) złożony z kilku komponentów, pole magnetyczne
- Daleki detektor (Super Kamiokande)
- Odległość do dalekiego detektora: 295km



# Wiązka neutrin z akceleratora

## WIAZKA off-axis EKSPERYMENTU T2K

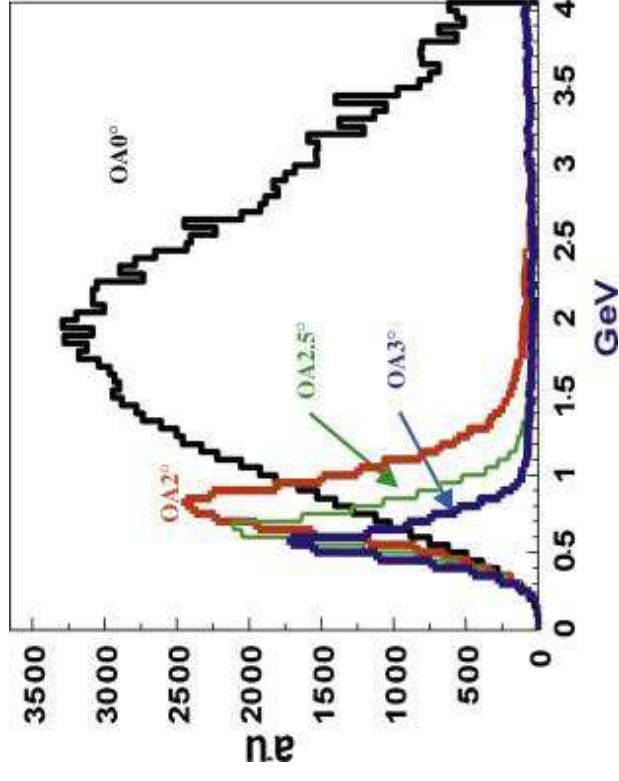
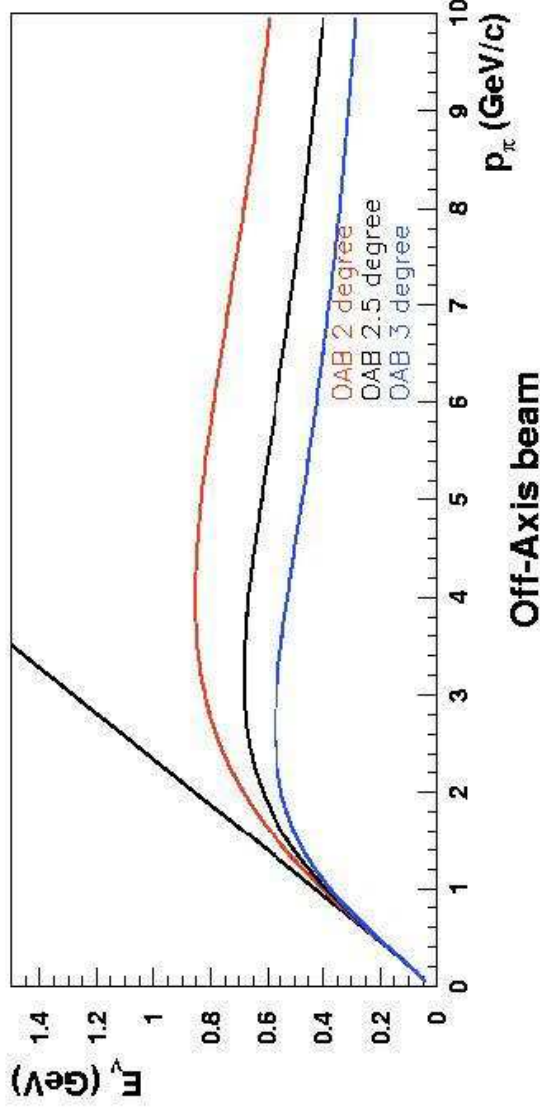


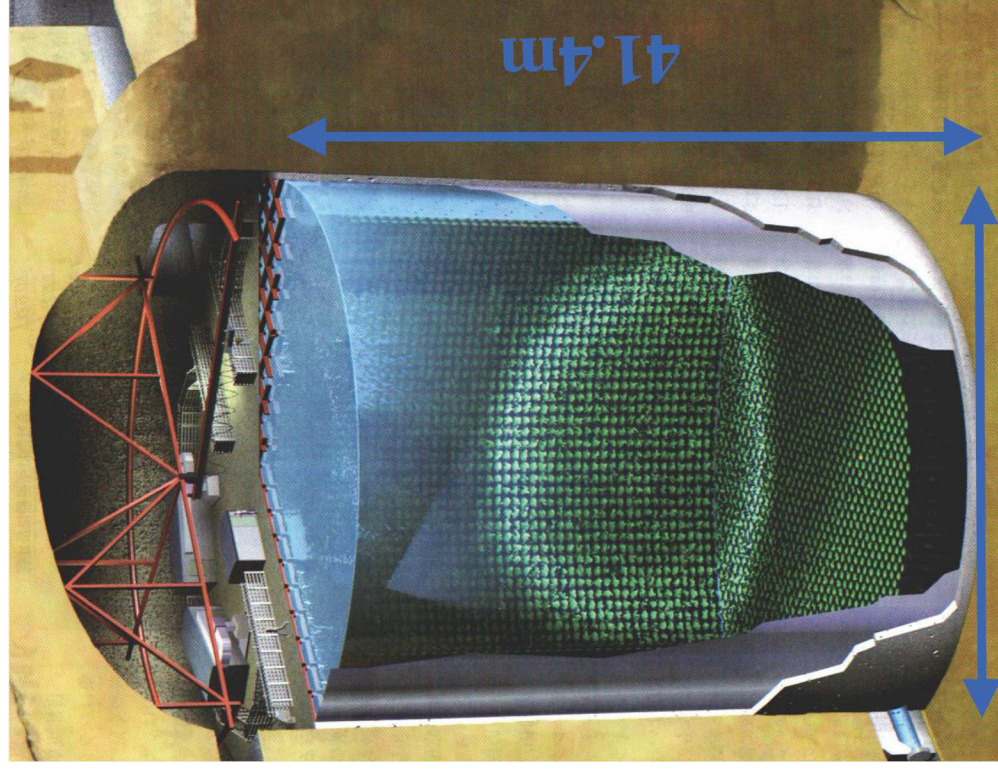
- neutrino mionowe z rozpadu pionów

– domieszka elektronowych z rozpadu kaonów i mionów

Dla małych kątów pomiędzy kierunkiem

$\pi$  i  $\nu$  energia  $\nu$  słabo zależy od  $p_\pi$

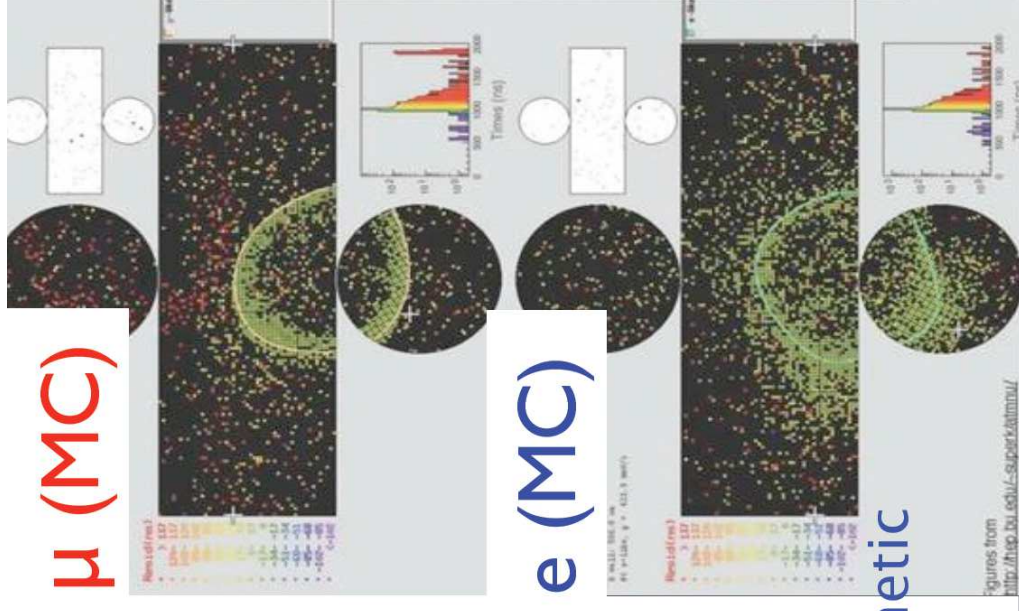
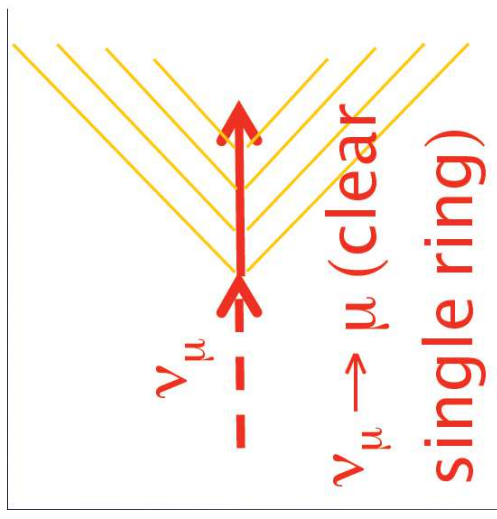
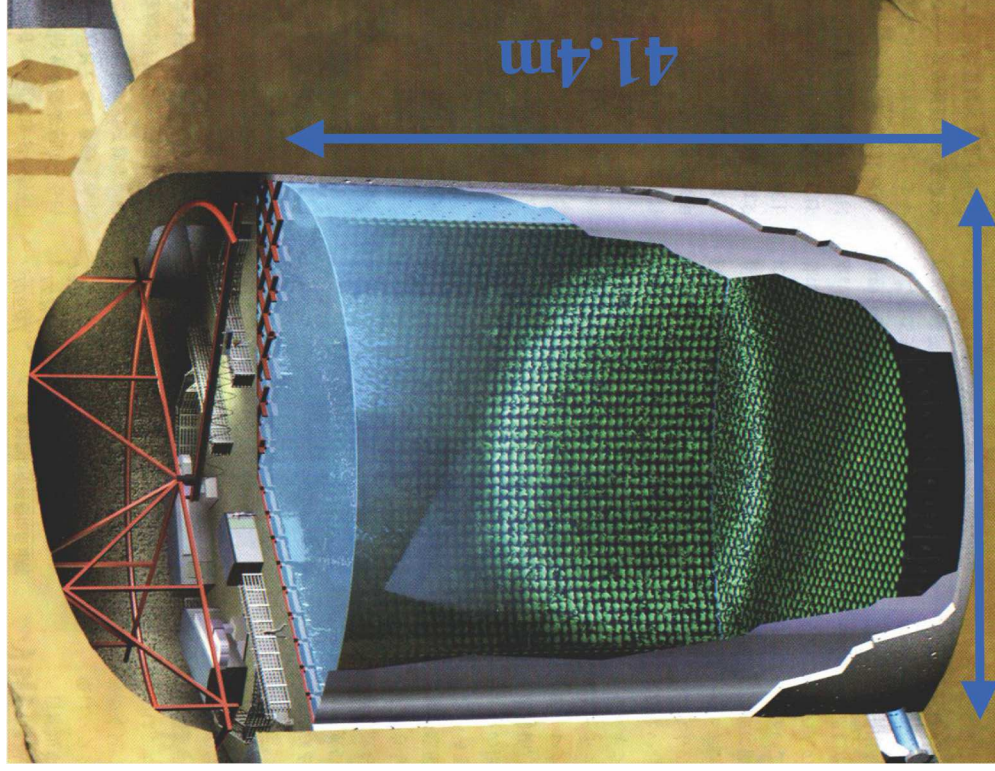




## Detektor Super-Kamiokande

- 50kt (obszar wiarygodny 22.5 kt)
- Optycznie podzielony na wewnętrzny (ID) i zewnętrzny (OD)
- Odczyt: fotopowielacze
- 1000 m pod ziemią

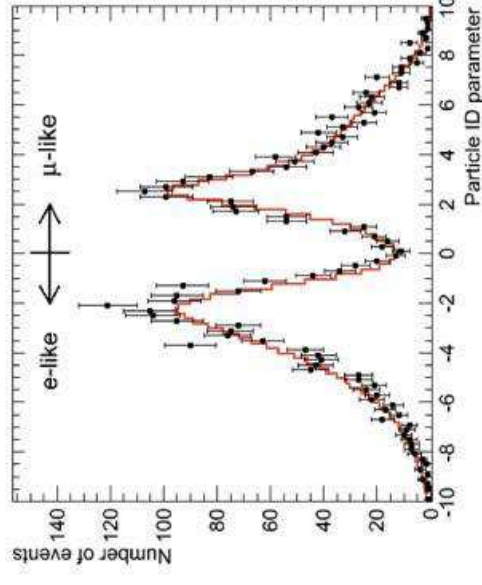
# Oddziaływania w detektorze T2K



Kandydaci na oddziaływania  $\nu_e$ :

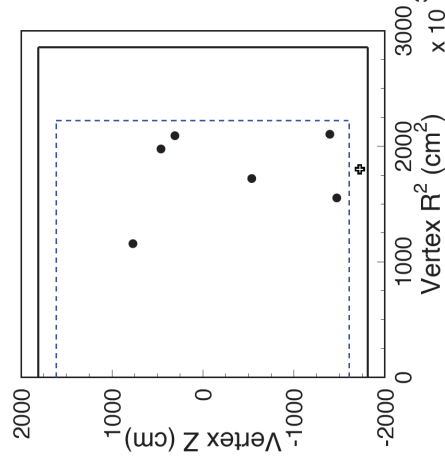
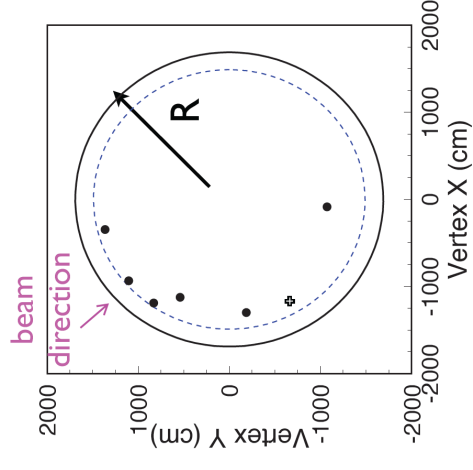
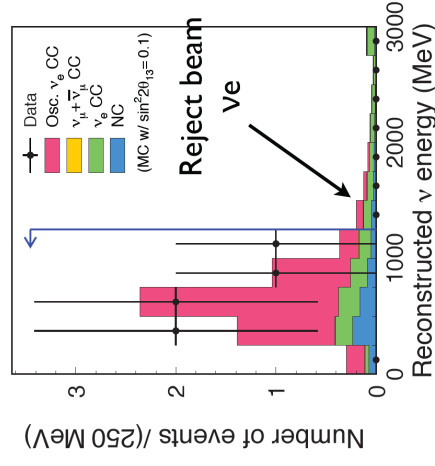
- synchronizacja z czasem nadejścia wiązki
- przypadki zawarte wewnątrz ID, minimalna aktywność w OD
- wierzchołek w wiarygodnym obszarze
- liczba okręgów Czerenkowa = 1
- algorytm odróżniający przypadki typu elektronowego i mionowego: przypadek typu elektronowego
- masa niezmiennicza przy założeniu dwóch okręgów  $< 105 \text{ MeV}/c^2$
- Zrekonstruowana  $E_\nu < 1250 \text{ MeV}$

Działanie algorytmu odróżniania elektronów od mionów dla atmosferycznych neutrin.

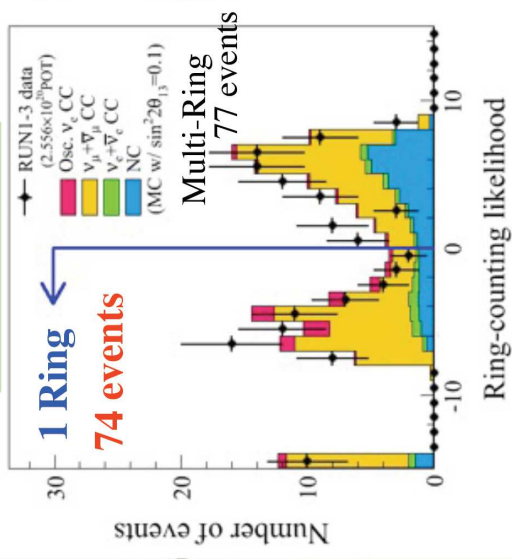


- 11.03.2011 trzęsienie ziemi
- 13.06.2011 pierwsze doniesienie o pomiarze niezerowej wartości  $\theta_{13}$ : **6** kandydatów  $\nu_e$  (tło  $1.5 \pm 0.3$ ) ( $2.5 \sigma$ )
- 03.2012 powrót do normalnego działania
- 5.06.2012 nowe wyniki (Neutrino 2012)

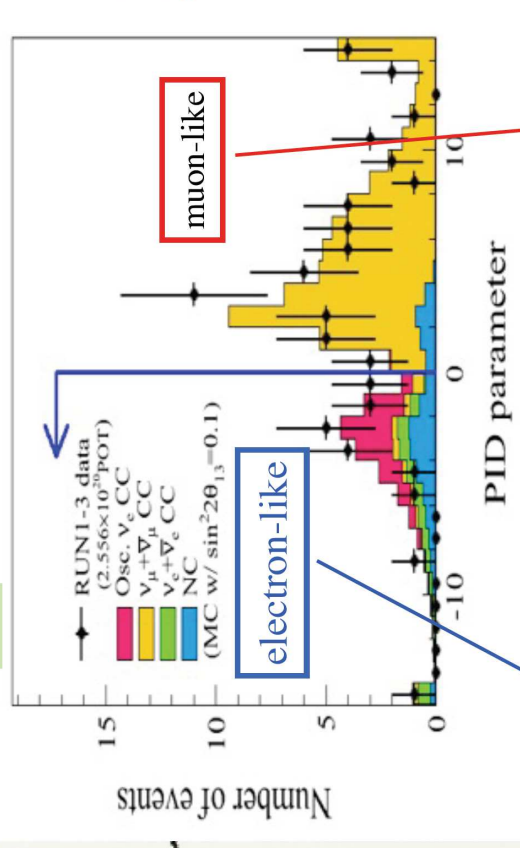
#### 4) Rec neutrino energy < 1250 MeV $\rightarrow N=6$



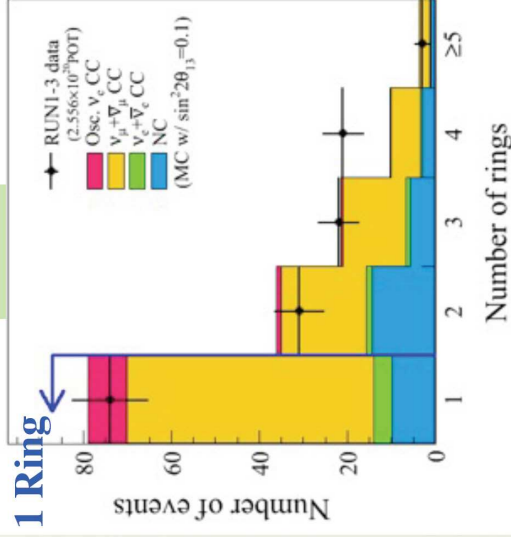
## Ring Counting



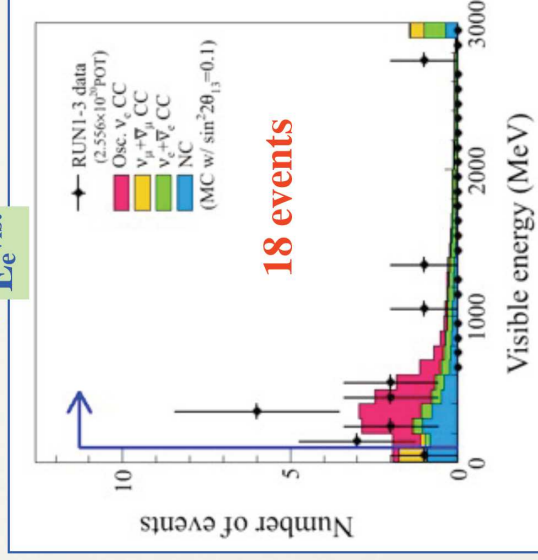
## PID



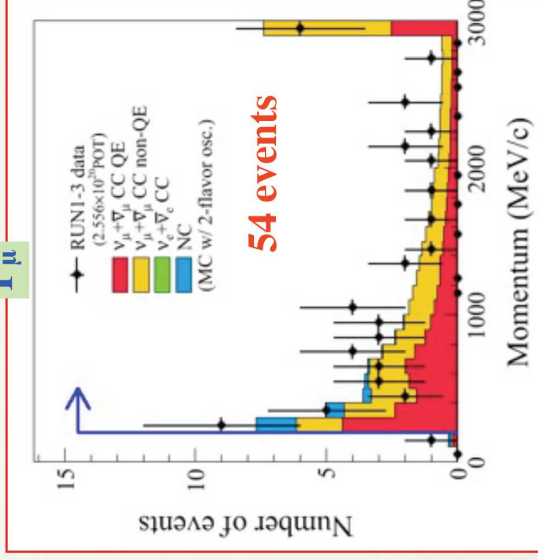
## #Rings



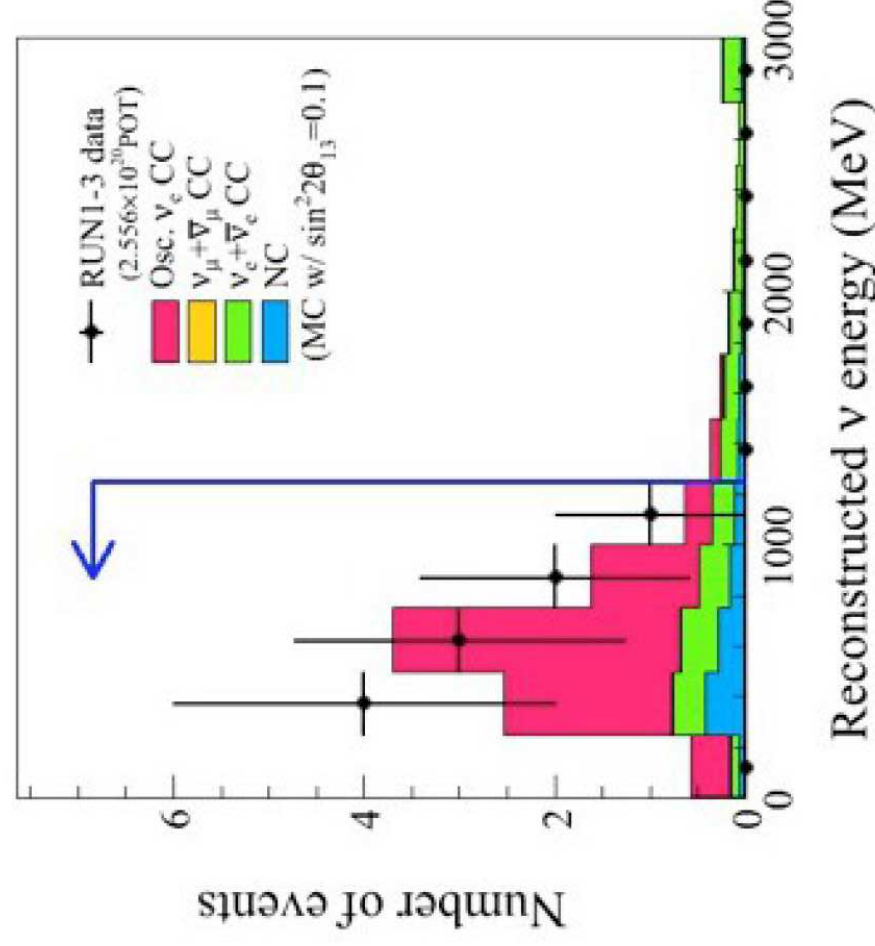
## $E_e^{vis.}$



## $P_\mu$

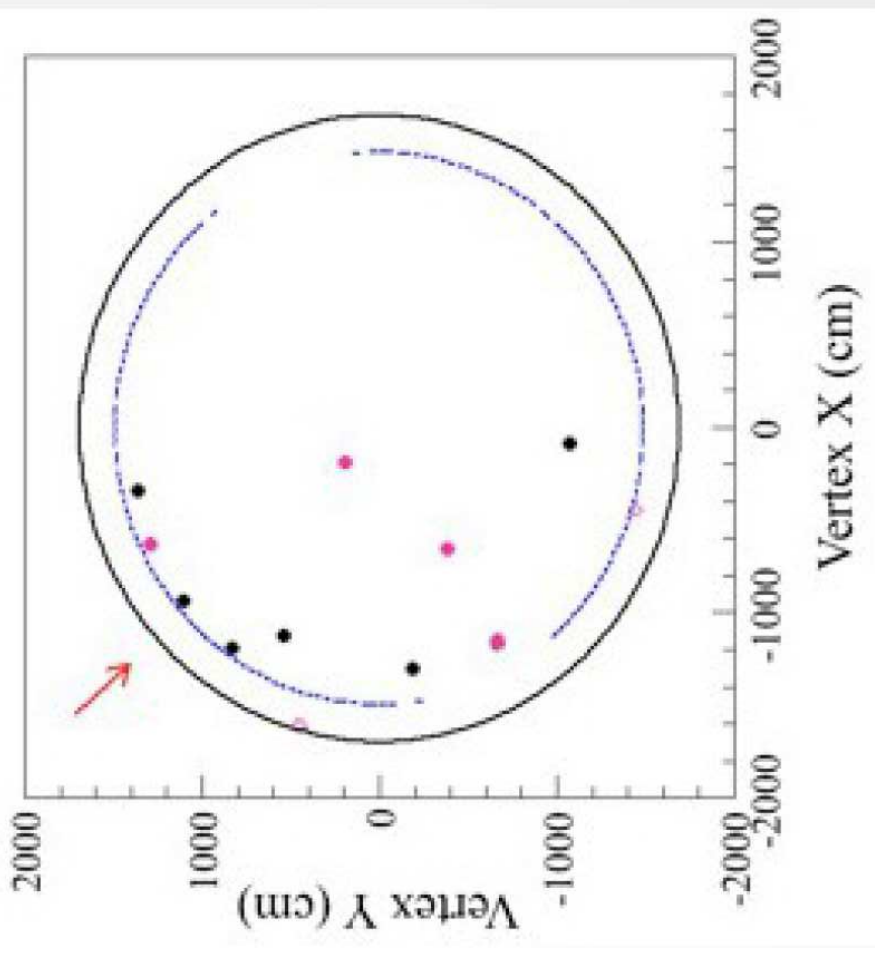


# T2K - Nowe dane

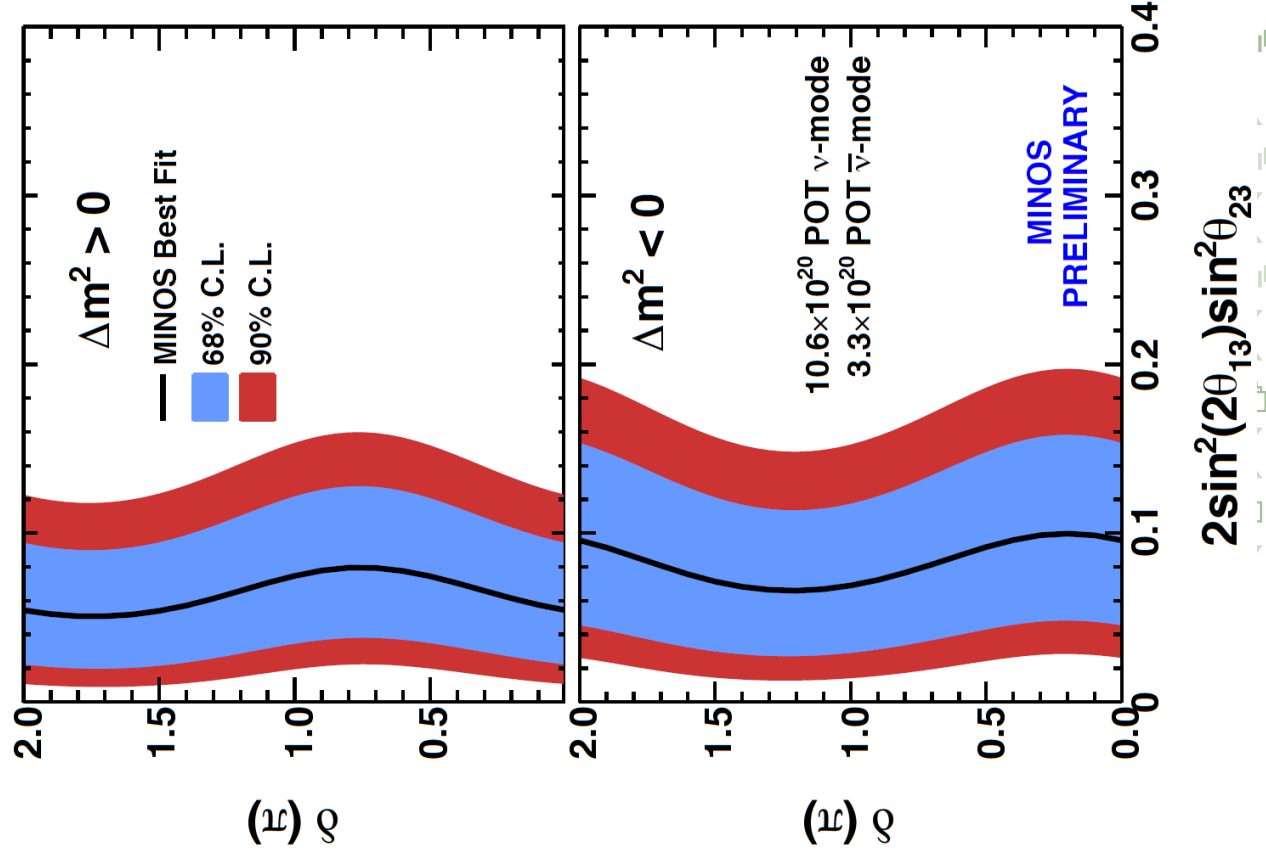
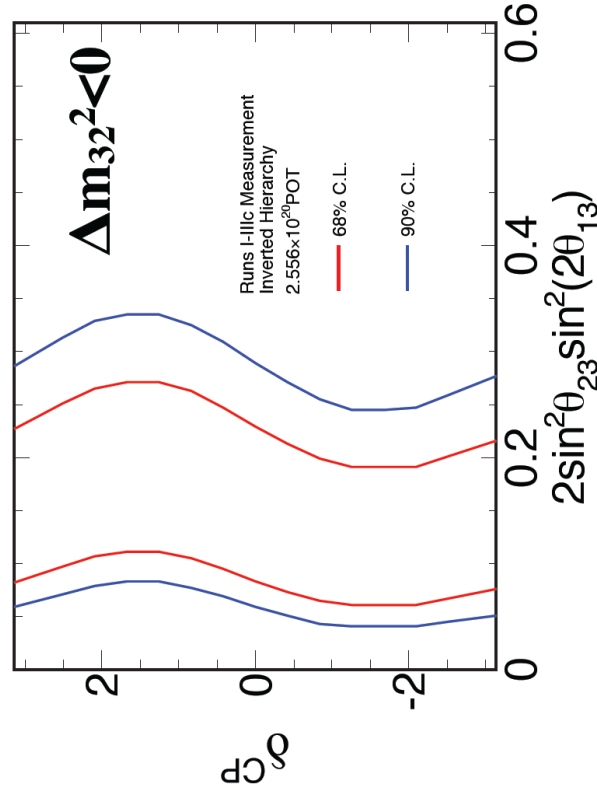
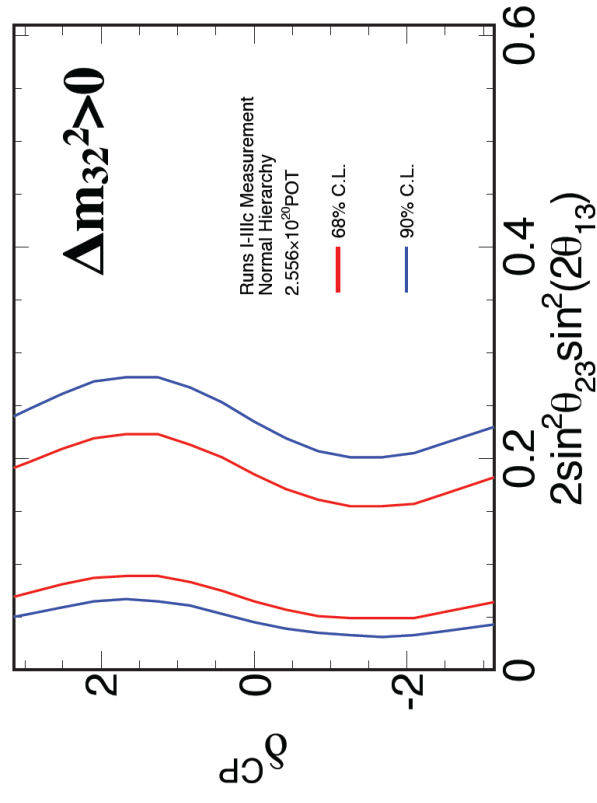


10 kandydatów na oddziaływania  $\bar{\nu}_e$

Tłó  $2.73 \pm 0.37$



# Porównanie wyników T2K i MINOS





# POMIAR $\theta_{13}$ W EKSPERYMENCIE DAYA BAY

# EKSPERYMENT Daya Bay

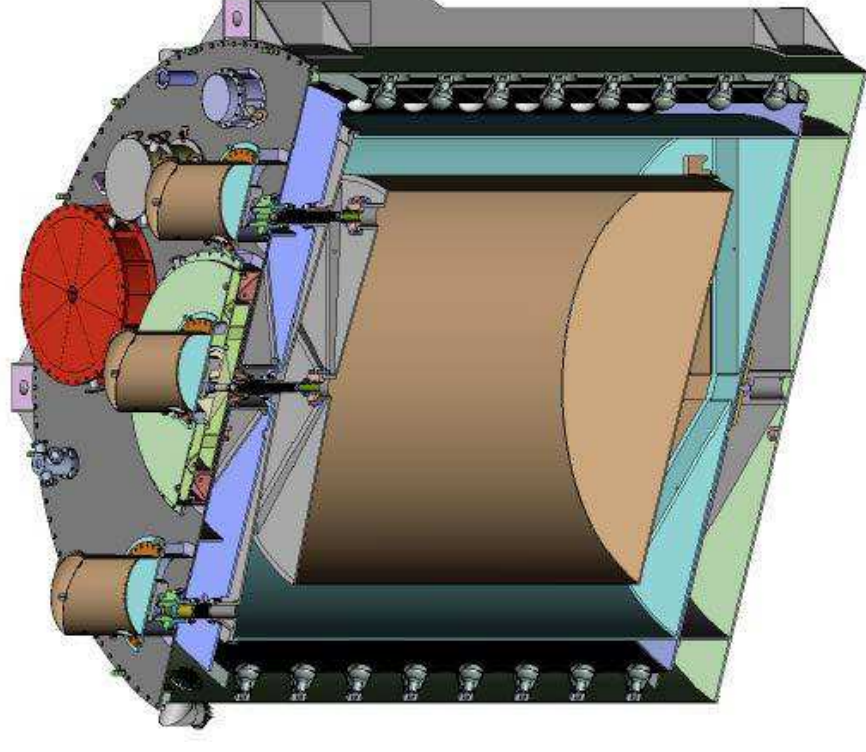


- Eksperyment w Chinach
- Współpraca: instytucje z Azji (20), USA(16), Europy(2)
- 6 komercyjnych reaktorów (całkowita moc 17.4 GW)
- 6 identycznych detektorów  $\times$  20t (docelowo 8)



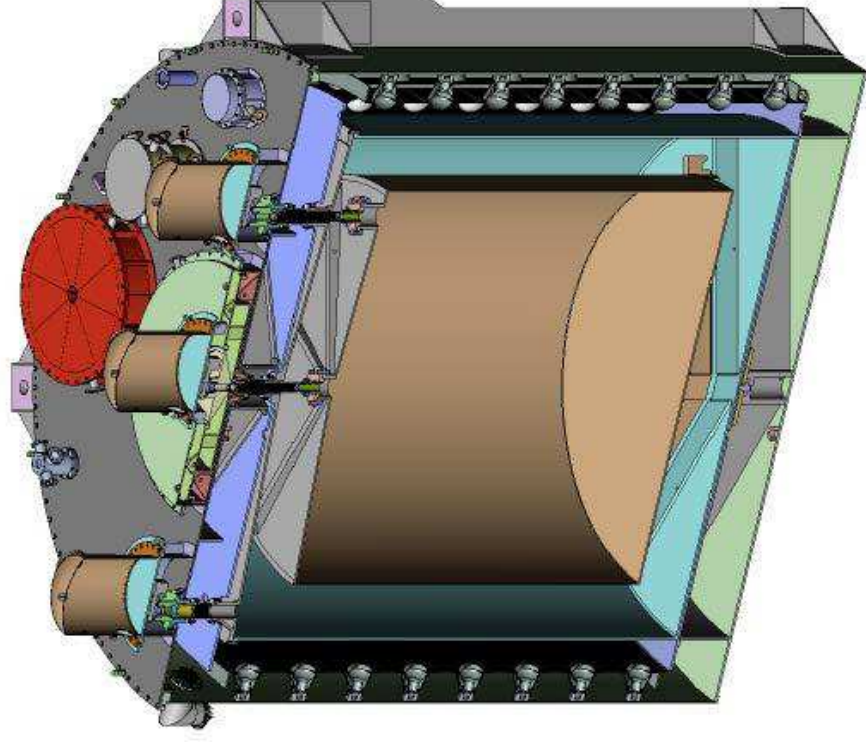
# Daya Bay - Metoda detekcji $\nu$

- $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$   
( $e^+$  unosi większość energii  $\nu$ )
- Sygnatura: koincydencja szybkiego sygnału scyntylacyjnego z  $e^+$  i opóźnionego z wychwytu  $n$  na Gd



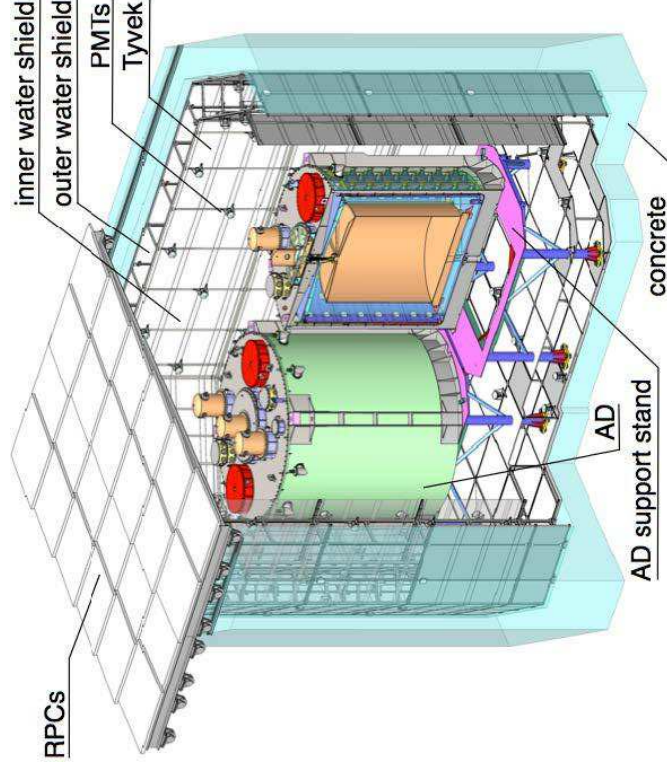
Pojedynczy detektor:

- Trzy współosiowe zbiorniki
- Ścianki z przezroczystego akrylu
- Wewnętrzny: 20t ciekłego scyntylatora (LS) z Gd (**tarcza**)
- Środkowy: nie domieszkowany LS (**wyłapywanie  $\gamma$** )
- Zewnętrzny: olej mineralny (**osłona**)

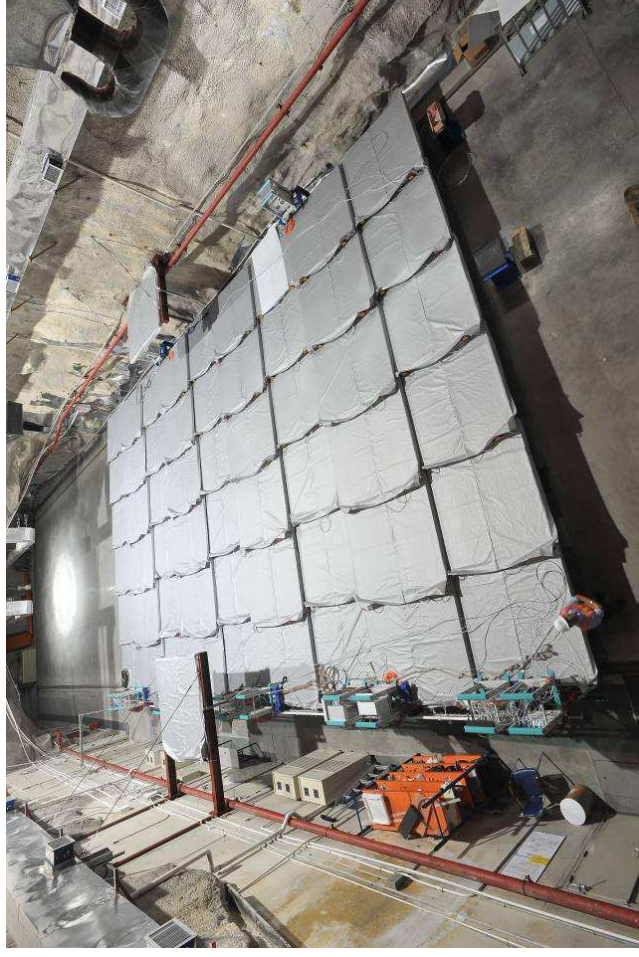
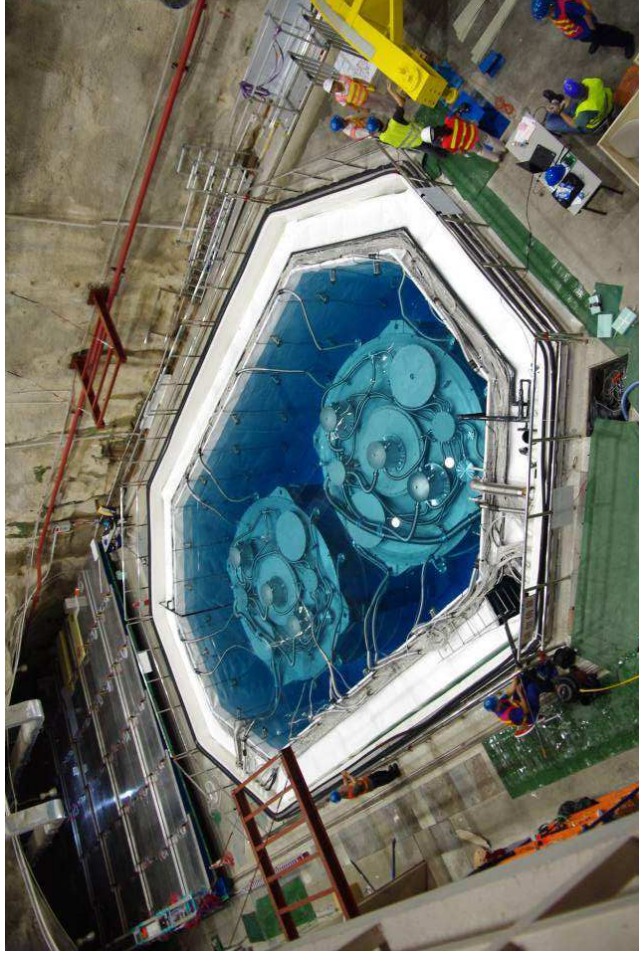


Pojedynczy detektor:

- Pionowe ściany - fotopowielacze
- Poziome ściany - reflektory
- Detektory umieszczone w basenach z ultraczystą wodą (**osłona radiacyjna i veto na miony**)
- Baseny przykryte warstwami komór RPC (**dodatkowe veto na kosmiczne miony**)



# Daya Bay - Detektory



Kandydaci na oddziaływania  $\bar{\nu}_e$ :

- veto na miony
- energia bezpośredniego sygnału (prompt) pomiędzy 0.7 i 12 MeV
- energia opóźnionego sygnału pomiędzy 6 i 12 MeV
- czas pomiędzy sygnałami pomiędzy 1 i 200  $\mu\text{s}$
- żadnych innych sygnałów 400  $\mu\text{s}$  przed i 200  $\mu\text{s}$  po opóźnionym sygnale

Dla bliskich (dalekich) detektorów:

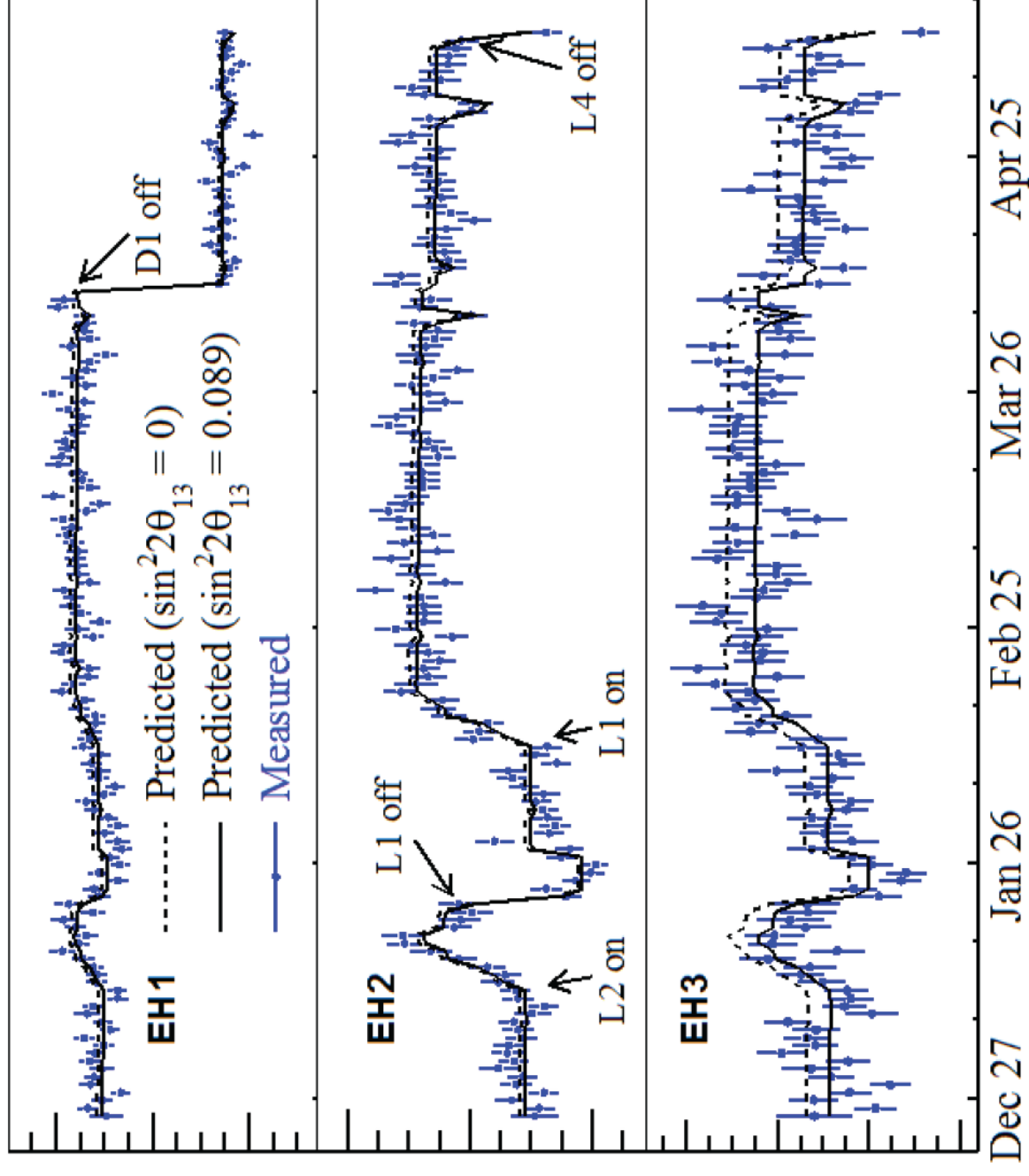
- Częstość układu wyzwalania  $\sim 250$  Hz ( $\sim 140$  Hz)
- Częstość rejestracji neutron  $\sim 650$ /dzień ( $\sim 75$ /dzień)

# Daya Bay - Wyniki liczbowe

	Near Sites				Far Site			
	EH1		EH2		EH3			
	AD1	AD2	AD3	AD4	AD5	AD6		
IBD Candidates	69121	69714	66473	9788	9669	9452		
DAQ livetime (hours)	127.5470		127.3763	126.2646				
Efficiency	0.8015	0.7986	0.8364	0.9555	0.9552	0.9547		
Accidentals (/day)	9.73±0.10	9.61±1.10	7.55±0.08	3.05±0.04	3.04±0.04	2.93±0.03		
Fast neutrons (/day)	0.77±0.24		0.58±0.33	0.05±0.02				
$^8\text{He}/^9\text{Li}$ (/AD/day)	2.9±1.5		2.0±1.1	0.22±0.12				
AmC (/AD/day)	0.2 ± 0.2							
$^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$ (/AD/day)	0.08±0.04	0.07±0.04	0.05±0.03	0.04±0.02	0.04±0.02	0.04±0.02		
Antineutrino Rate (/day)	662.47±3.00	670.87±3.01	613.53±2.69	77.57±0.85	76.62±0.85	74.97±0.84		

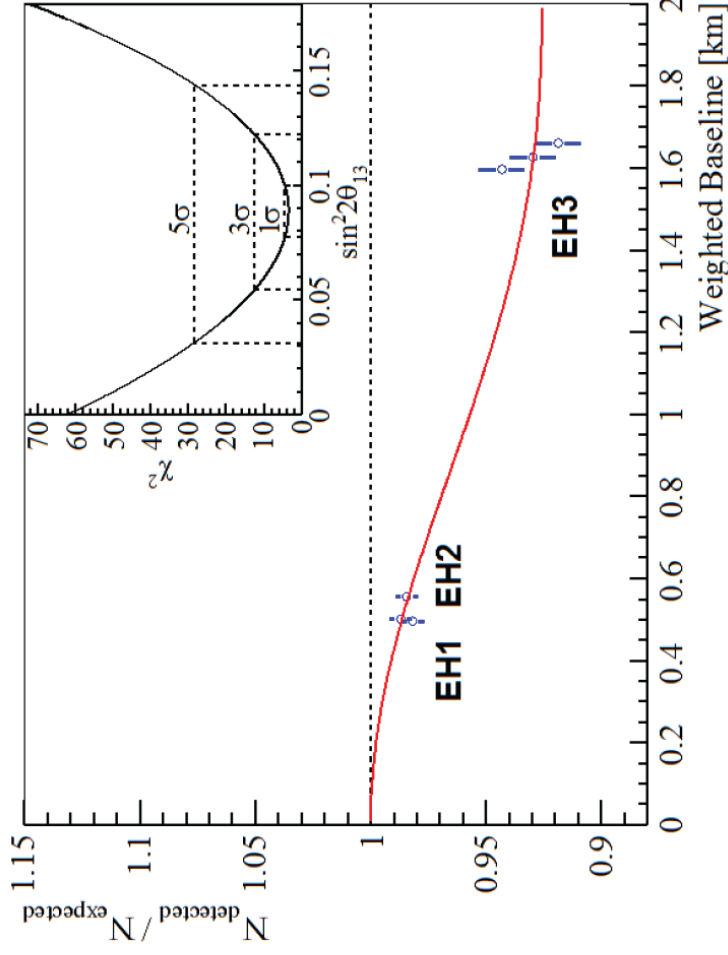


# Daya Bay - porównanie z pracą reaktorów



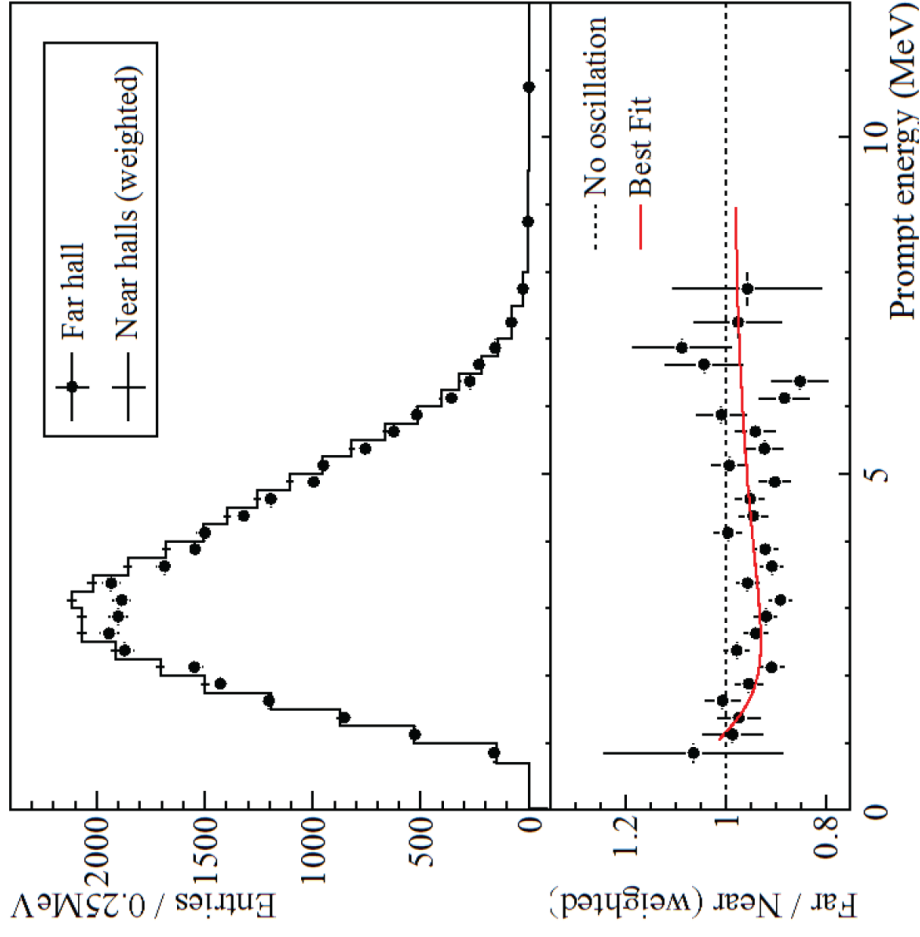
Run time

# $\theta_{13}$ - Wyniki Daya Bay

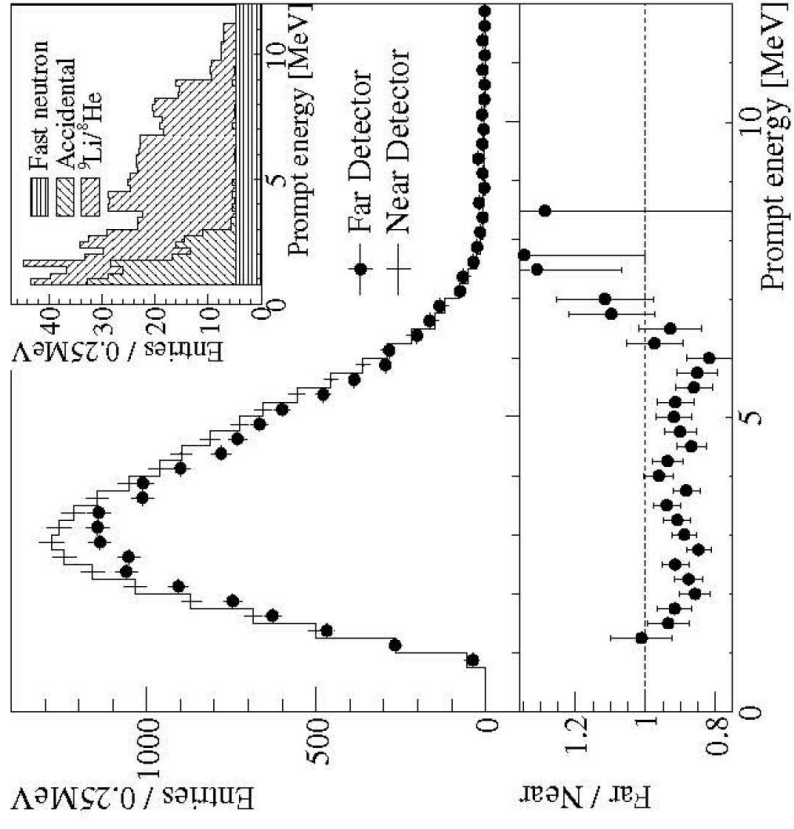
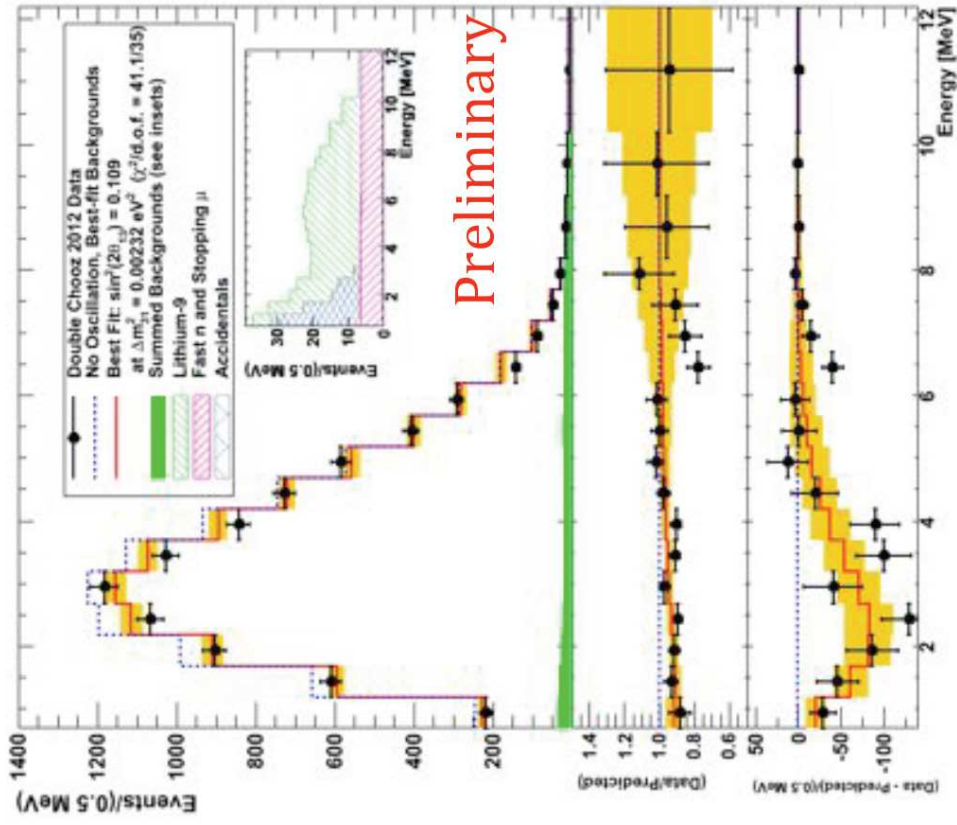


$$R = 0.944 \pm 0.007(\text{stat}) \pm 0.003(\text{syst})$$

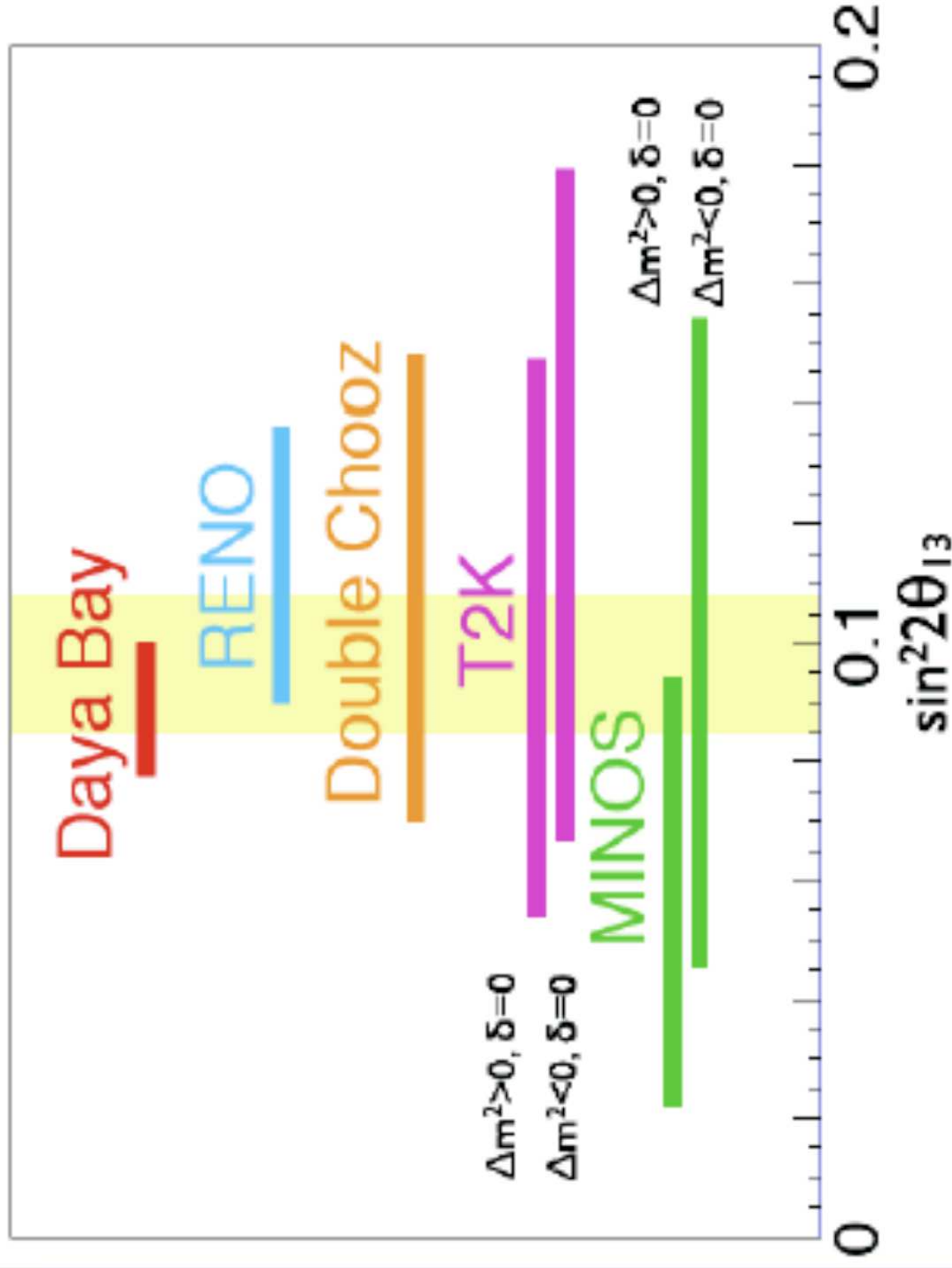
$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.089 \pm 0.010(\text{stat}) \pm 0.005(\text{syst})$$



# $\theta_{13}$ - Wyniki RENO i Double Chooz



# Pomiary $\theta_{13}$ - PODSUMOWANIE



- **Od 2012 roku  $\theta_{13}$  znamy wszystkie kąty mieszania neutrin !**
- Obecnie największą znaczącość statystyczną (wykluczenie zerowej wartości  $\sin^2 2\theta_{13}$  na poziomie ponad  $5\sigma$ ) ma wynik z reaktorowego eksperymentu Daya Bay:

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.089 \pm 0.010(\text{stat}) \pm 0.005(\text{syst})$$

- Wynik Daya Bay zgodny z wynikami RENO, Double CHOOZ, T2K i MINOS.
- Niezerowa i duża wartość  $\theta_{13}$  otwiera eksperymentom akceleratorowym drogę do wyjaśnienia pozostałych niewiadomych w sektorze neutrin

# Oscylacje neutrin - co dalej ?

- Dalsze precyzyjne pomiary parametrów oscylacji
- Pojawianie się neutrin taonowych
- Neutrino sterylne ?
- Odwrócona czy normalna hierarchia mas neutrin ?
- Łamanie symetrii CP w sektorze neutrinowym ?

# ANOMALIA REAKTOROWA - deficyt strumieni neutronów z reaktorów

■ Observed/predicted averaged event ratio:  $R=0.927\pm 0.023$  (3.0  $\sigma$ )

