



Paweł Przewłocki  
Warszawska Grupa Neutrinowa  
Narodowe Centrum Badań Jądrowych

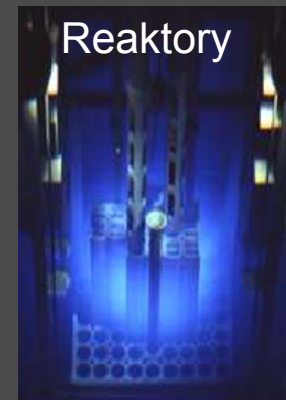
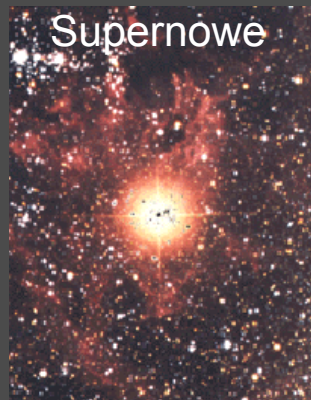
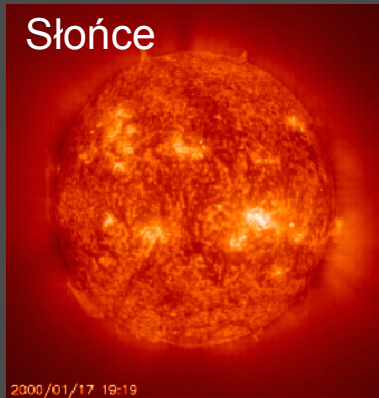
# NOWOŚCI W FIZYCE OSCYLACJI NEUTRIN: WYNIKI Z DAYA BAY

# O czym będę mówił

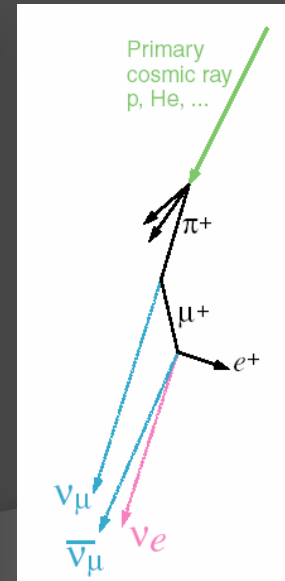
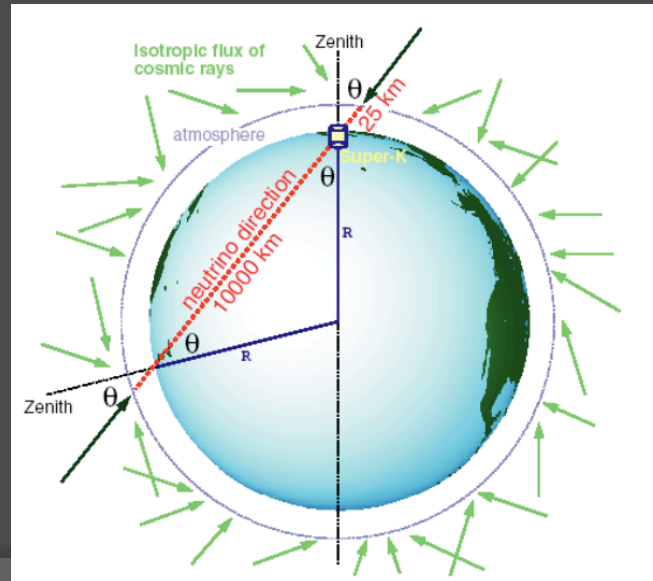
- Oscylacje neutrin
- Neutrina reaktorowe
- Eksperyment Daya Bay i jego odkrycie
- Potwierdzenie z eksperymentu RENO
- Spojrzenie w przyszłość



# Skąd się biorą neutrino



## Promieniowanie kosmiczne

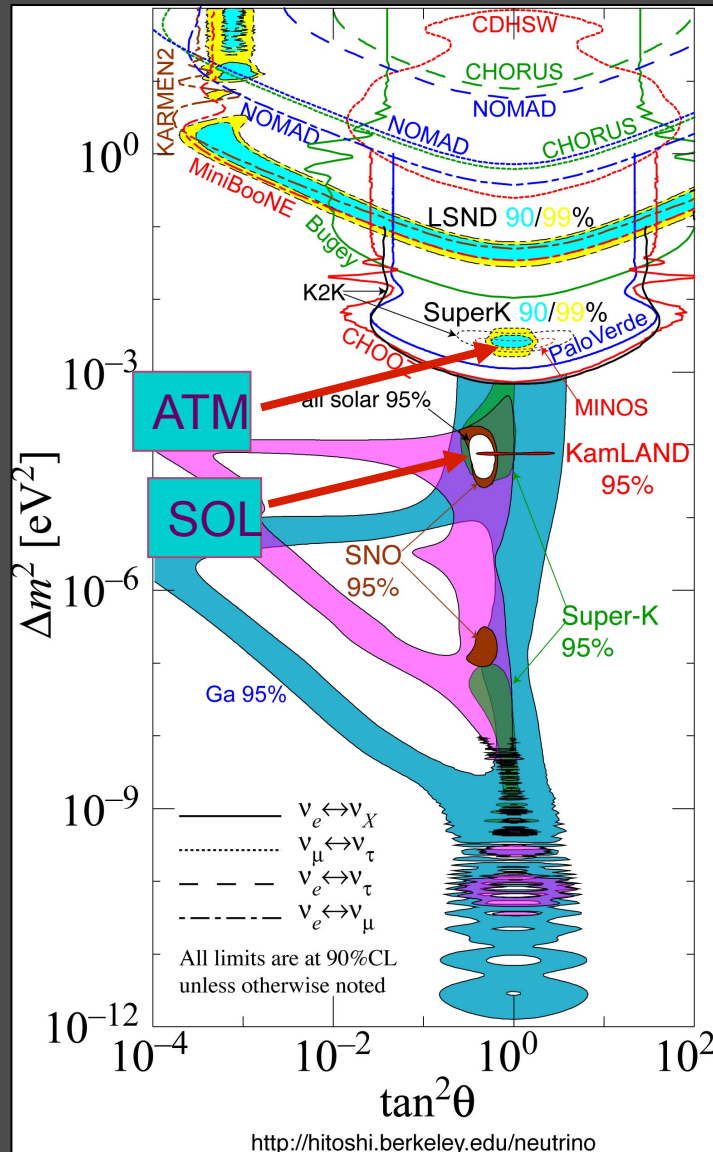


# Oscylacje neutrin

- 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)

Oscylują 3 zapachy

# Oscylacje neutrin

FLAVOR

MASS

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

„atmospheric”  
**SK, K2K, MINOS**

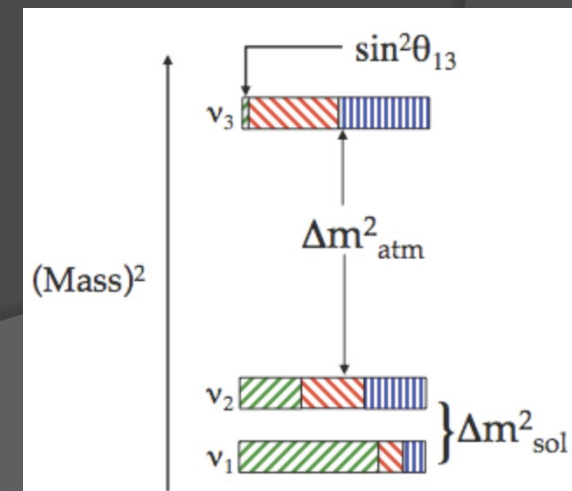
**CHOOZ,**  
**Daya Bay, Reno**

„solar”  
**SNO, KamLand**

parameter	best fit	$2\sigma$	$3\sigma$
$\Delta m_{21}^2 [10^{-5} \text{eV}^2]$	$7.59^{+0.23}_{-0.18}$	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
$\sin^2 \theta_{13}$	$0.013^{+0.013}_{-0.009}$	$\leq 0.039$	$\leq 0.053$

Table A1. Current update of Tab. 1: Best-fit values with  $1\sigma$  errors, and  $2\sigma$  and  $3\sigma$  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.

Schwetz et al. arXiv:0808.2016v3 [hep-ph]



# Co dotąd chcieliśmy zmierzyć

- I etap
  - zwiększenie precyzji pomiarów uprzednio zmierzonych parametrów oscylacji
  - Pomiar  $\theta_{13}$
- II etap (potrzebny pomiar  $\theta_{13} > 0$ )
  - Zbadanie symetrii CP w sektorze neutrinowym, hierarchii mas, efektów materii
  - Potrzebne neutrino i antyneutrino
- Realizacja celów – 2 podejścia
  - Eksperymenty reaktorowe (Double Chooz – Francja, Daya Bay – Chiny)
  - Silne wiązki akceleratorowe (T2K – Japonia, Nova – USA), możliwość badania hierarchii mas (efekty materii) i CP

# Jak mierzymy $\theta_{13}$

## Eksperymenty reaktorowe:

$$P_{ee} \approx 1 - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 (1.27 \Delta m_{13}^2 L/E) - \cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 (1.27 \Delta m_{12}^2 L/E)$$

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

## Eksperymenty akceleratorowe z długą bazą:

$$P_{vac}(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2 2\vartheta_{13} \cdot \sin^2 \vartheta_{23} \cdot \sin^2 \frac{1.27 \Delta m_{13}^2 \cdot L}{E} + f(\delta_{CP}, \text{sgn}(\Delta m_{13}^2))$$

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

## Neutrina reaktorowe:

- Czysty sygnał bez wpływów  $\delta$  czy efektów materii
- Relatywnie tanie eksperymety

# Antyneutrino reaktorowe

- Antyneutrino elektronowe emitowane w rozpadach beta minus materiałów promieniotwórczych w reaktorze (izotopy uranu i plutonu)
- Ok. 4.5% energii wyzwalanej w rozpadach ucieka w postaci neutrin
- Rejestrujemy spektrum o energiach rzędu kilku MeV

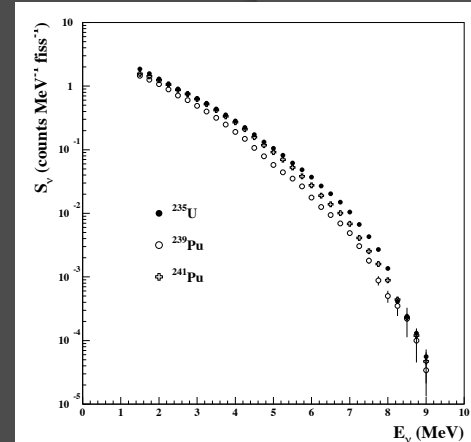
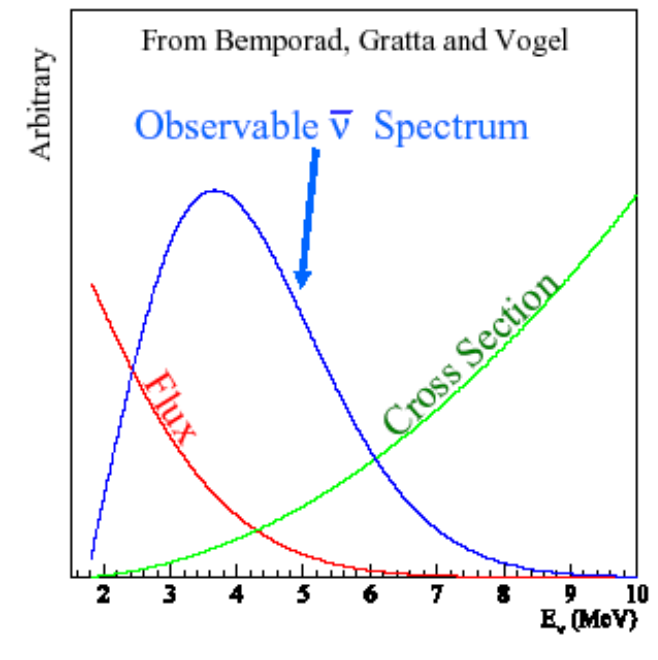
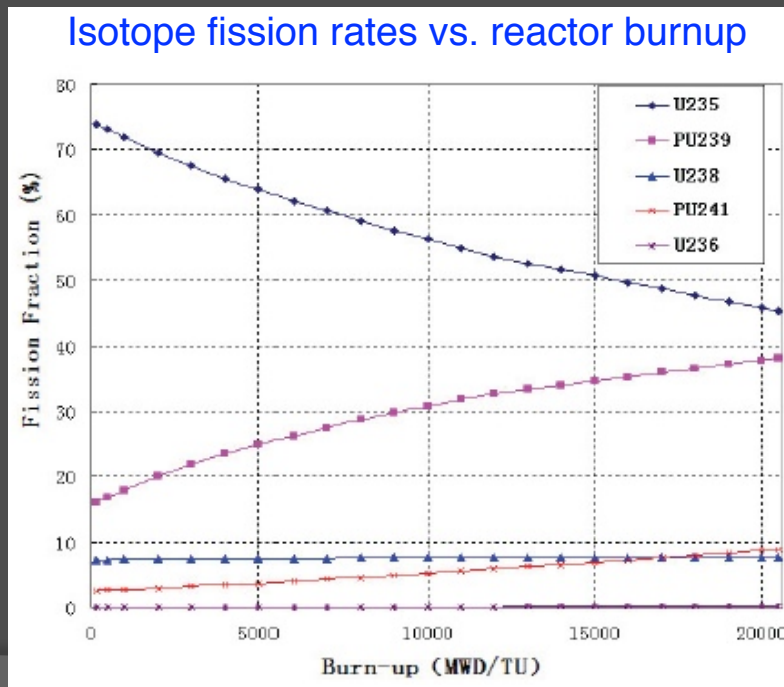


Fig. 1.4. Yield of antineutrinos per fission for the several isotopes. These are determined by converting the corresponding measured  $\beta$  spectra [33].

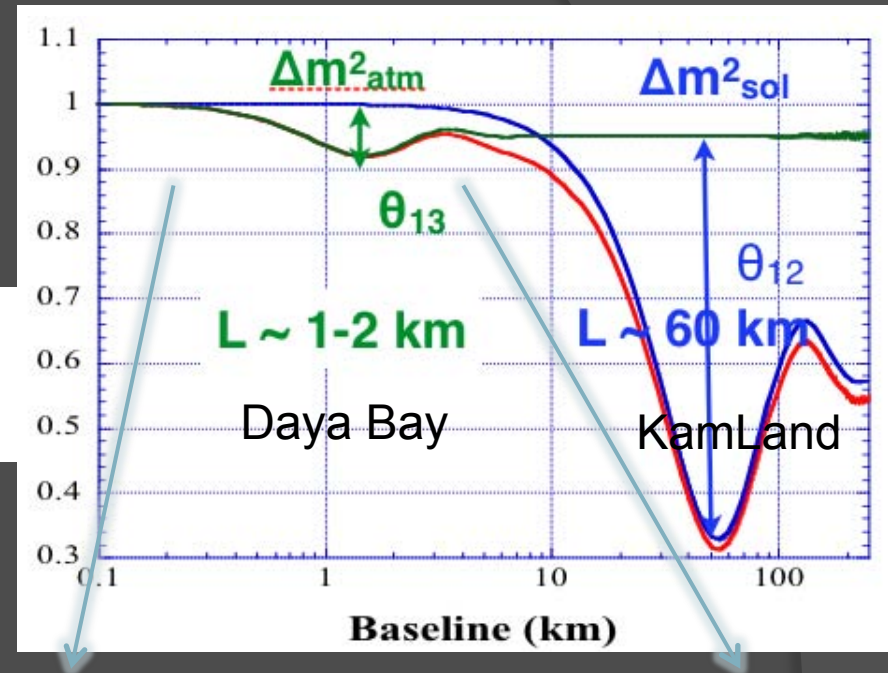




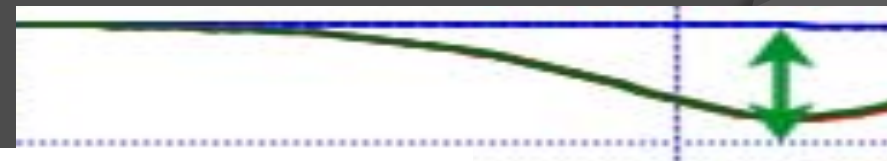
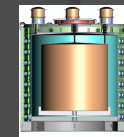
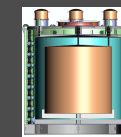
# Oscylacje neutrin reaktorowych

$$P_{ee} \approx 1 - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \left( \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E_\nu} \right) - \cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 \left( \frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E_\nu} \right)$$

- Dwie częstości oscylacji, związane z  $\Delta m_{13}^2$  i  $\Delta m_{12}^2$
- Oscylacje o większym okresie zaobserwowane przez eksperyment KamLAND, bliższe minimum badane przez Chooz, Daya Bay, RENO
- Detektor bliski w celu redukcji błędów systematycznych związanych z niepewnością strumienia neutrin z reaktorów



Daya Bay



First proposed by L. A. Mikaelyan and V.V. Sinev, Phys. Atomic Nucl. 63 1002 (2000)

$$\frac{N_f}{N_n} = \left( \frac{N_{p,f}}{N_{p,n}} \right) \left( \frac{L_n}{L_f} \right)^2 \left( \frac{\epsilon_f}{\epsilon_n} \right) \left[ \frac{P_{sur}(E, L_f)}{P_{sur}(E, L_n)} \right]$$

far/near  $\bar{\nu}_e$  ratio      target mass      distances      efficiency      oscillation deficit

# Pomiary w przeszłości

- Palo Verde & Chooz: brak sygnału

$$\sin^2 2\theta_{13} < 0.15 \text{ @ } 90\% \text{C.L.}$$

if  $\Delta M^2_{23} = 0.0024 \text{ eV}^2$



- T2K:  $2.5 \sigma$

$$0.03 < \sin^2 2\theta_{13} < 0.28 \text{ @ } 90\% \text{C.L. for NH}$$

$$0.04 < \sin^2 2\theta_{13} < 0.34 \text{ @ } 90\% \text{C.L. for IH}$$



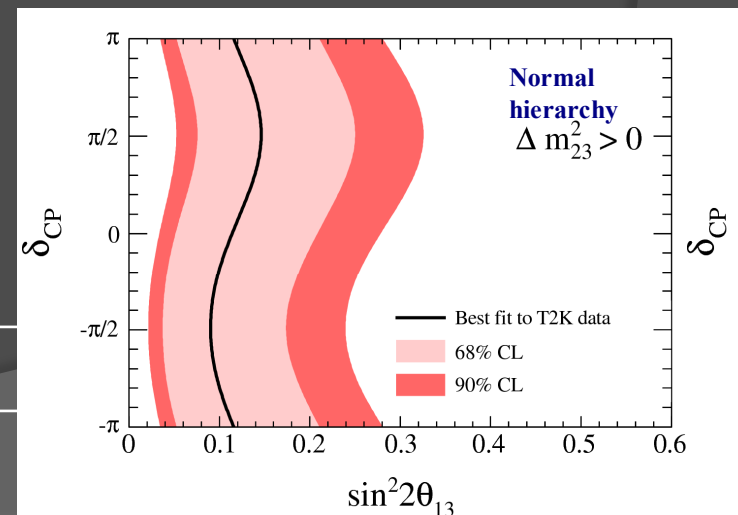
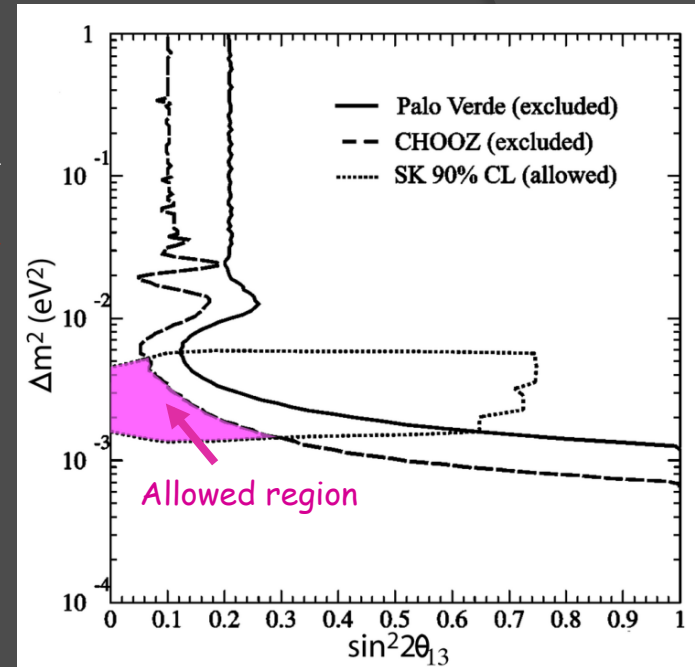
- Minos:  $1.7 \sigma$

$$0 < \sin^2 2\theta_{13} < 0.12 \text{ @ } 90\% \text{C.L. NH}$$

$$0 < \sin^2 2\theta_{13} < 0.19 \text{ @ } 90\% \text{C.L. IH}$$

- Double Chooz:  $1.7 \sigma$

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.086 \pm 0.041(\text{stat}) \pm 0.030(\text{sys})$$



# Daya Bay Nuclear Power Plant

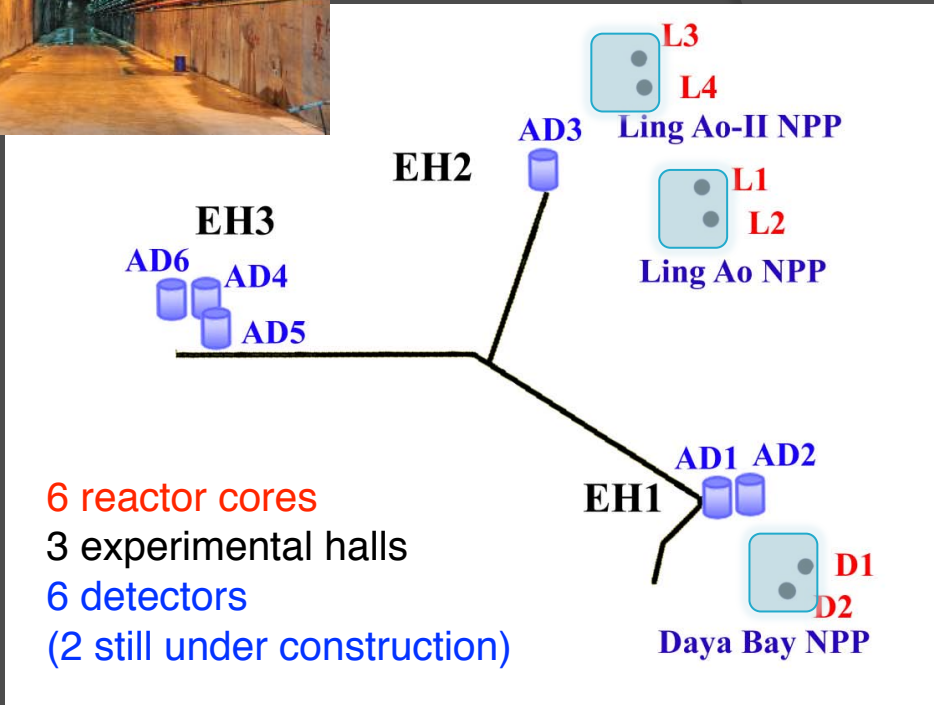
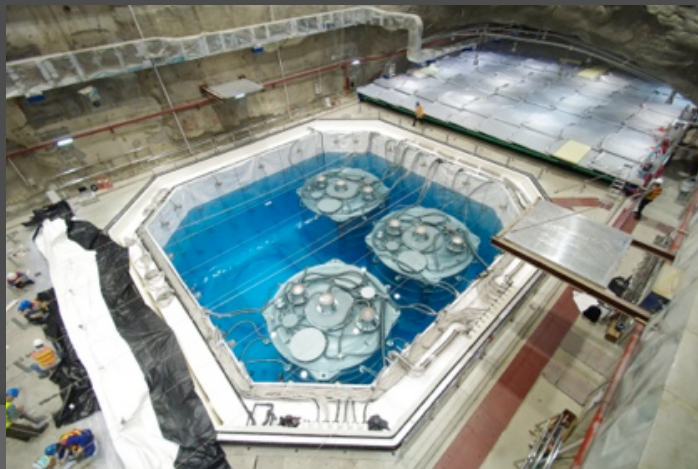
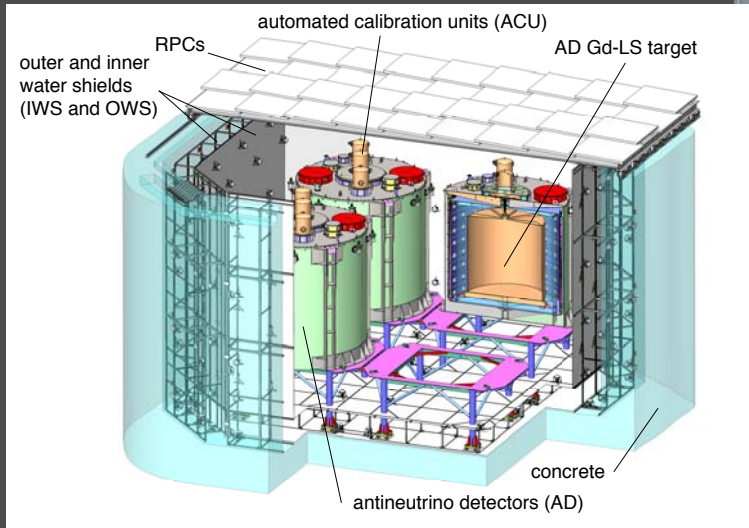


## Elektrownie atomowe Dàyà Bay (大亚湾) i Lǐng ào (岭澳)

- 3 elektrownie, w każdej 2 reaktory
- Razem do 17.4 GW mocy
- Usytuowane w sąsiedztwie gór – wygodne miejsce dla umiejscowienia detektorów pod ziemią, tak aby zminimalizować tło od mionów kosmicznych



# Eksperyment Daya Bay



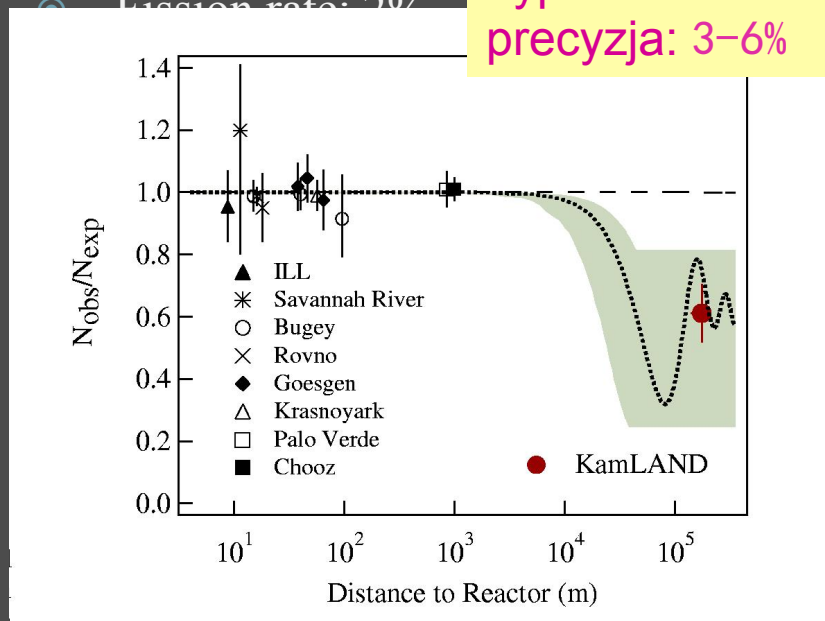
	Overburden (MWE)	$R_{\mu}$ (Hz/ $m^2$ )	$E_{\mu}$ (GeV)	D1,2 (m)	L1,2 (m)	L3,4 (m)
EH1	250	1.27	57	364	857	1307
EH2	265	0.95	58	1348	480	528
EH3	860	0.056	137	1912	1540	1548

# Daya Bay: Cele i środki

Precyzja poprzednich eksperymentów:

- Moc reaktora:  $\sim 1\%$
- Widmo:  $\sim 0.3\%$
- Fission rate:  $2\%$

Typowa precyzja: 3–6%



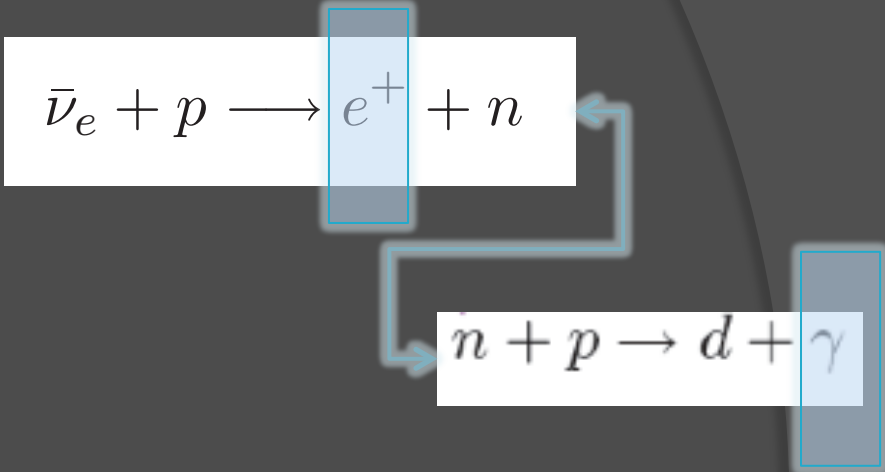
Cel eksperymentu Daya Bay: precyzja rzędu  $\sim 0.4\%$

• Jak obniżyć błędy systematyczne:

- Identyczne bliski i daleki detektor
- Wiele identycznych modułów detekcyjnych
- Trójstrefowe moduły detekcyjne
- Wystarczająco głębokie laboratorium i ekranowanie detektorów
- Dwa uzupełniające się systemy detekcji mionów
- Przenośne moduły detekcyjne

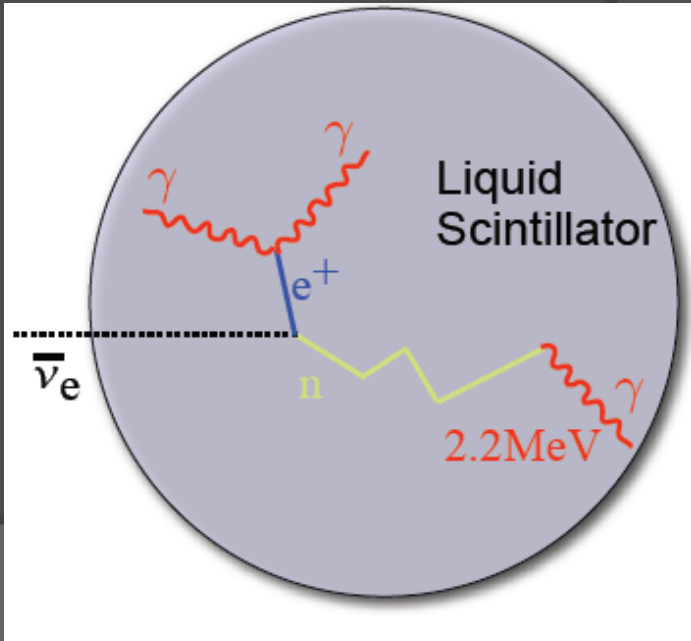
# Mechanizm detekcji

- Medium: scyntylator domieszkowany gadolinem
- Proces: odwrotny rozpad beta
- Sygnał natychmiastowy dawany przez pozyton
- Sygnał opóźniony – wychwyty neutronu
- dzięki domieszkowaniu Gd
  - wyższy przekrój czynny na wychwyty
  - krótszy czas wychwyty (ok. 30 μs)
  - wyższa energia emitowanych fotonów – 8 MeV (dzięki temu lepiej się to odróżnia od naturalnej radioaktywności)

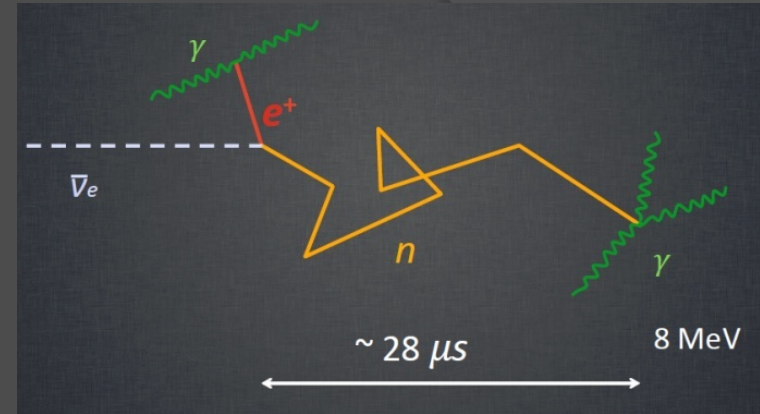


$$E_{\bar{\nu}} \cong T_{e^+} + T_n + (M_n - M_p) + m_{e^+}$$

$10-40 \text{ keV}$        $1.8 \text{ MeV: próg}$



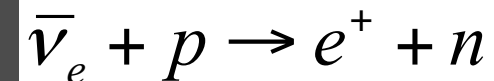
# Sygnal i tło



## ◎ Sygnal:

- Natychmiastowy (prompt):  $e^+$ , 1-10 MeV,
- Opóźniony (delayed):  $n$ , 2.2 MeV@H, 8 MeV @ Gd
- Wychwył po 28 ms w 0.1% Gd-LS

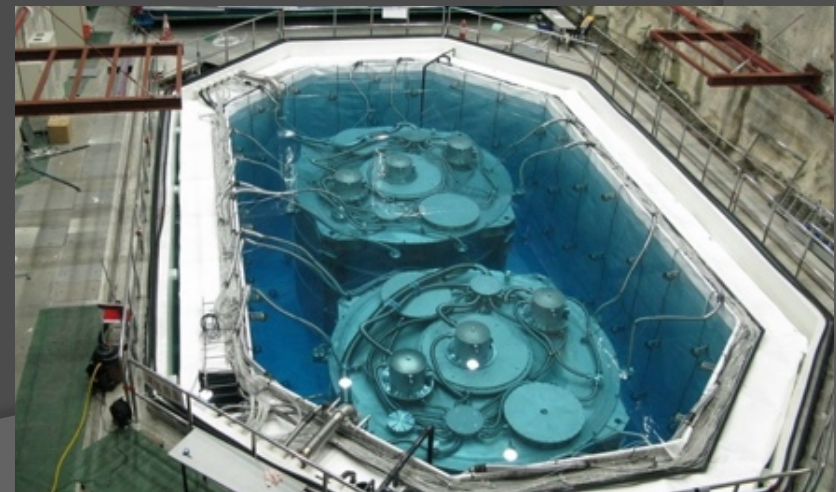
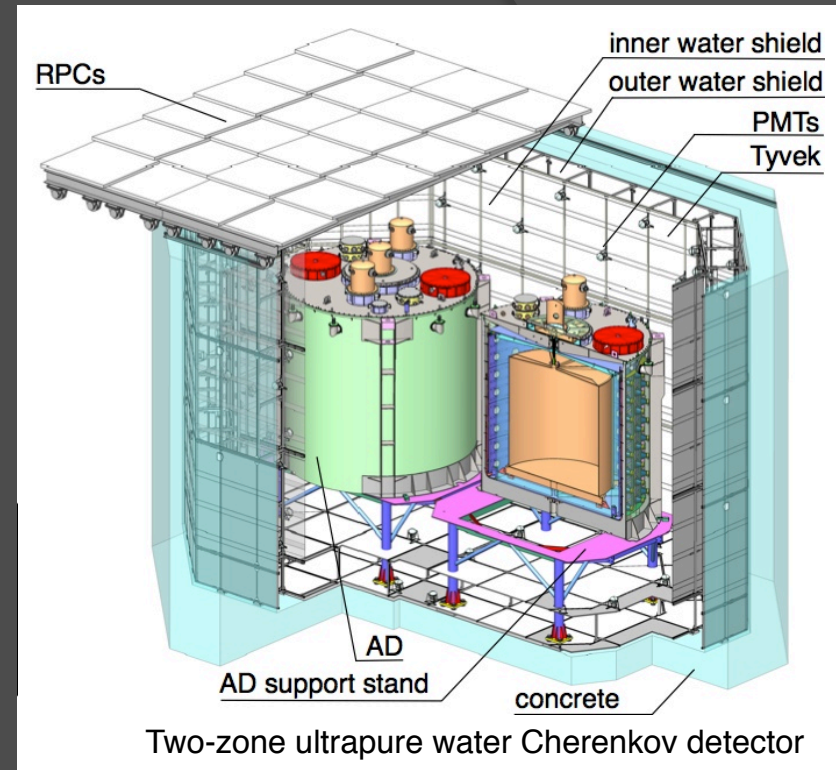
## ◎ Tło:



- **Nieskorelowane:** przypadkowe koincydencje  $\gamma\gamma$ ,  $\gamma n$ ,  $nn$ 
  - $\gamma$  from U/Th/K/Rn/Co... in LS, SS, PMT, Rock, ...
  - $n$  from  $\alpha$ - $n$ ,  $\mu$ -capture,  $\mu$ -spallation in LS, water & rock
- **Skorelowane:**
  - Fast neutrons: prompt— $n$  scattering, delayed— $n$  capture
  - $^8\text{He}/^9\text{Li}$ : prompt— $\beta$  decay, delayed— $n$  capture
  - Am-C source: prompt— $\gamma$  rays, delayed— $n$  capture
  - $\alpha$ - $n$ :  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$

# Hale eksperymentalne

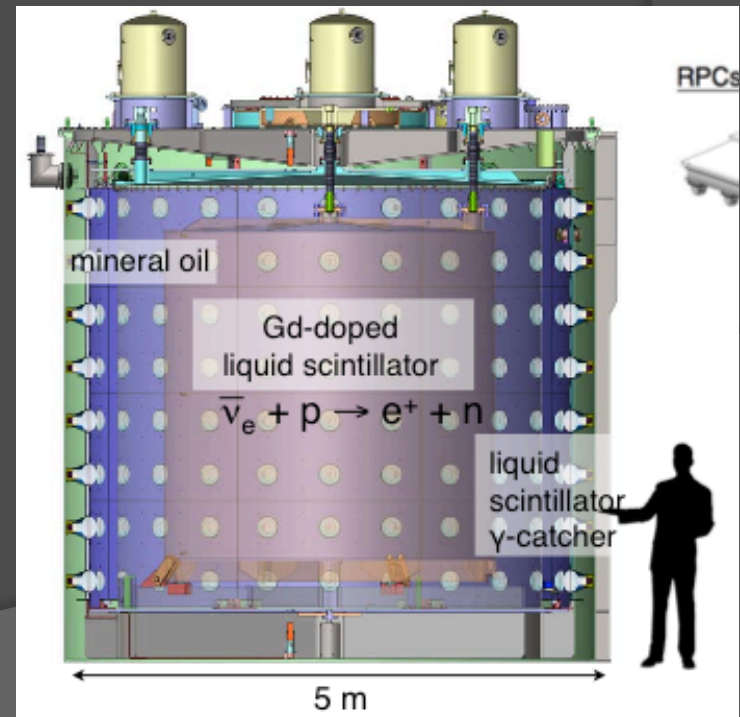
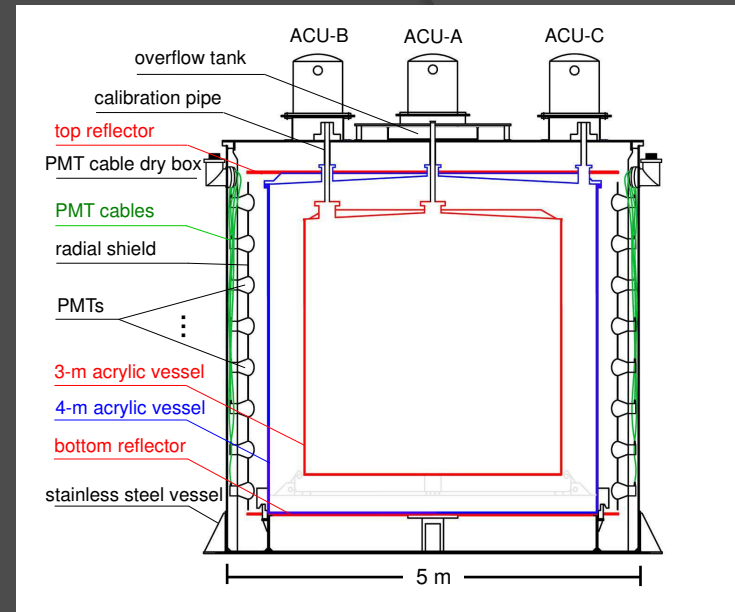
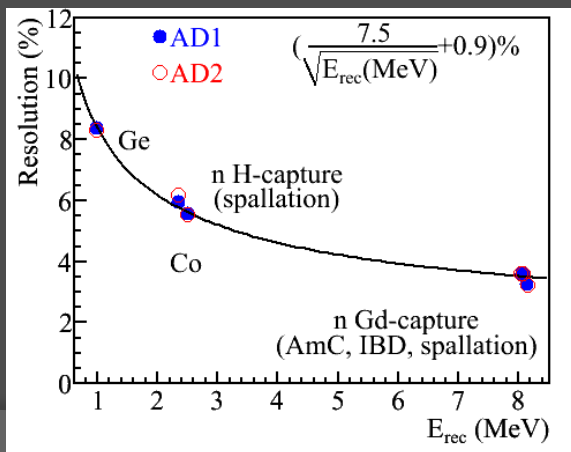
- W każdej hali
  - 2 lub 4 moduły detekcji antyneutrin (AD)
  - wodny detektor Czerenkowa – tzw. osłona wodna (przynajmniej 2.5 m wody w każdym kierunku)
    - 1200/1950 ton wody w dwóch wyseparowanych świetlnie przestrzeniach
    - wykrywa miony które mogą produkować neutrony spalacyjne w AD
    - spowalnia neutrony i pochłania gammy pochodzące ze skał
  - płaszczyzna RPC
    - komory RPC ułożone na zakładkę, nasuwane na basen z wodą i detektorami



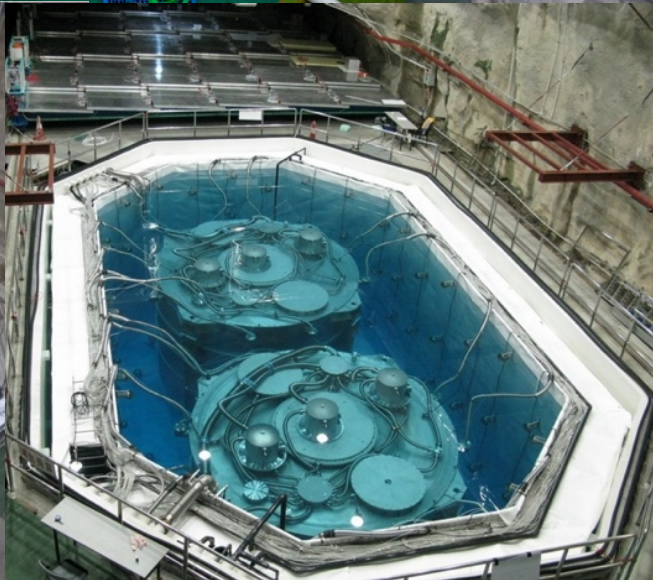
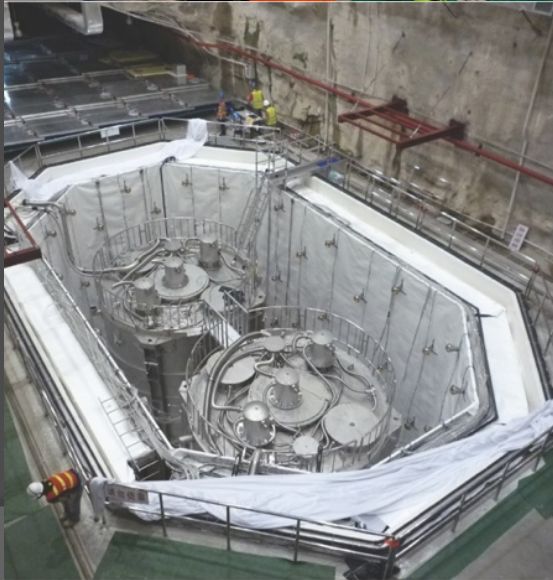
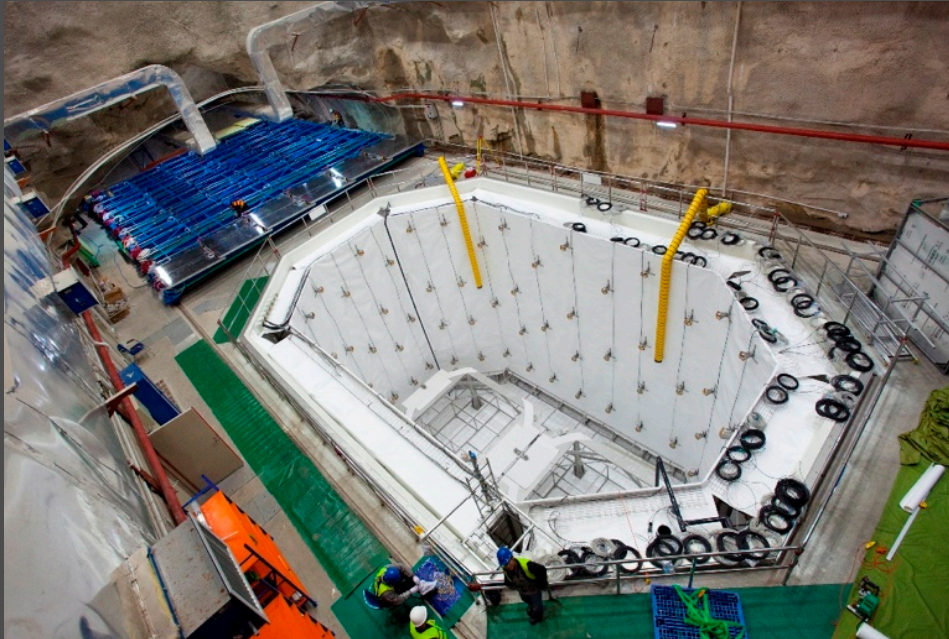


# Detektory i ich właściwości

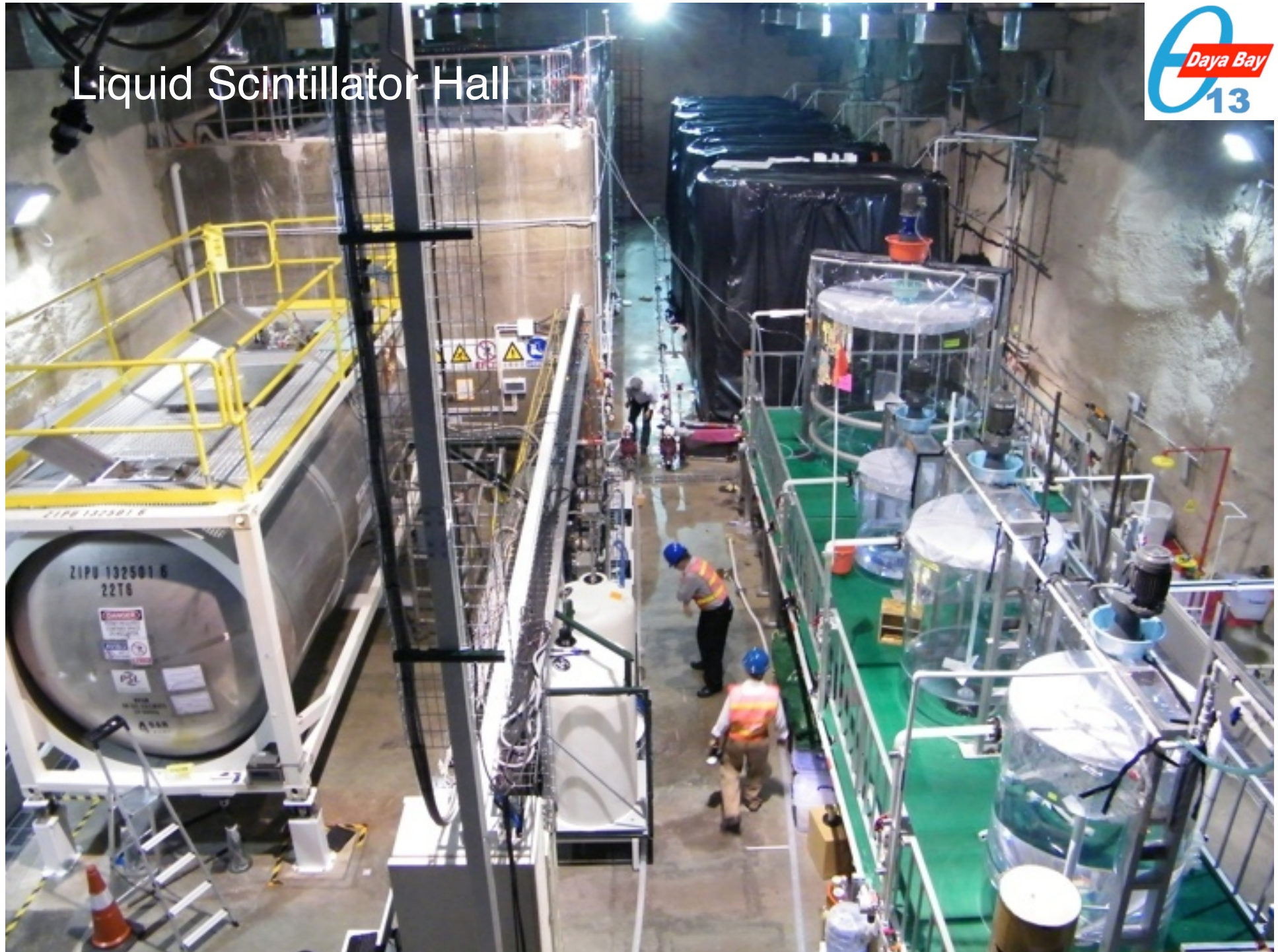
- 3 zagnieżdżone w sobie akrylowe pojemniki
  - Tarcza: Scyntylator+0.1% Gd(20t)
  - Łapacz gamm: Scyntylator (21t)
  - Olej mineralny (37t)
- 3 moduły kalibracyjne
  - LED + źródła promieniotwórcze
- 192 8-calowych fotopowielaczy



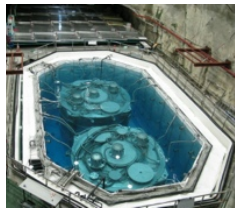
# Instalacja bliskich detektorów



# Liquid Scintillator Hall



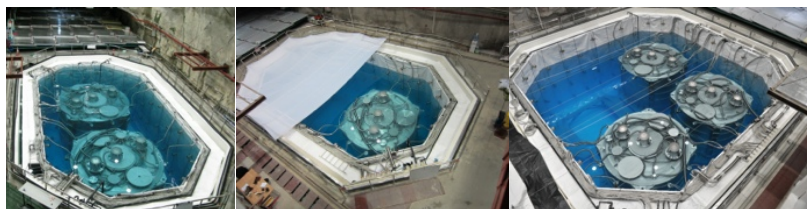
# Dane i wyniki



Daya Bay Collab.  
arXiv:1202:6181 (2012)  
accepted in NIMA

## Two Detector Side-by-Side Comparison

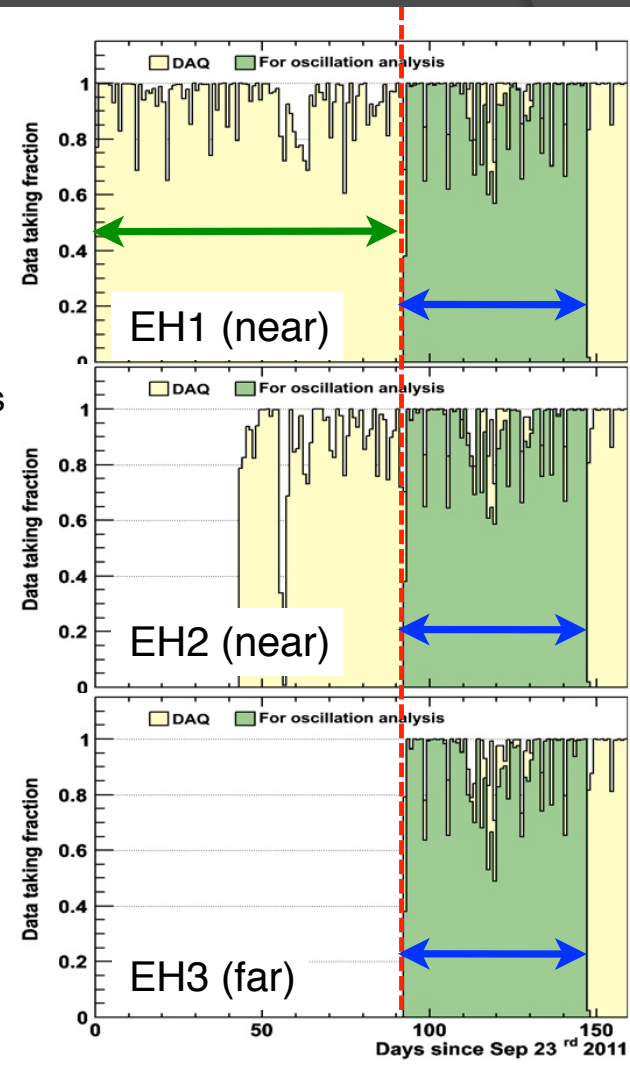
- Sep. 23, 2011 – Dec. 23, 2011
- Side-by-side comparison of 2 detectors
- Demonstrated detector systematics 2x better than requirements
- **Detector-related relative uncertainty: 0.2%**



## Current Oscillation Analysis

- Dec. 24, 2011 – Feb. 17, 2012
- All 3 halls (6 ADs) operating
- DAQ uptime: >97%
- Antineutrino data: ~89%
- **observed 6% deficit in detected  $\bar{\nu}_e$  at far site**

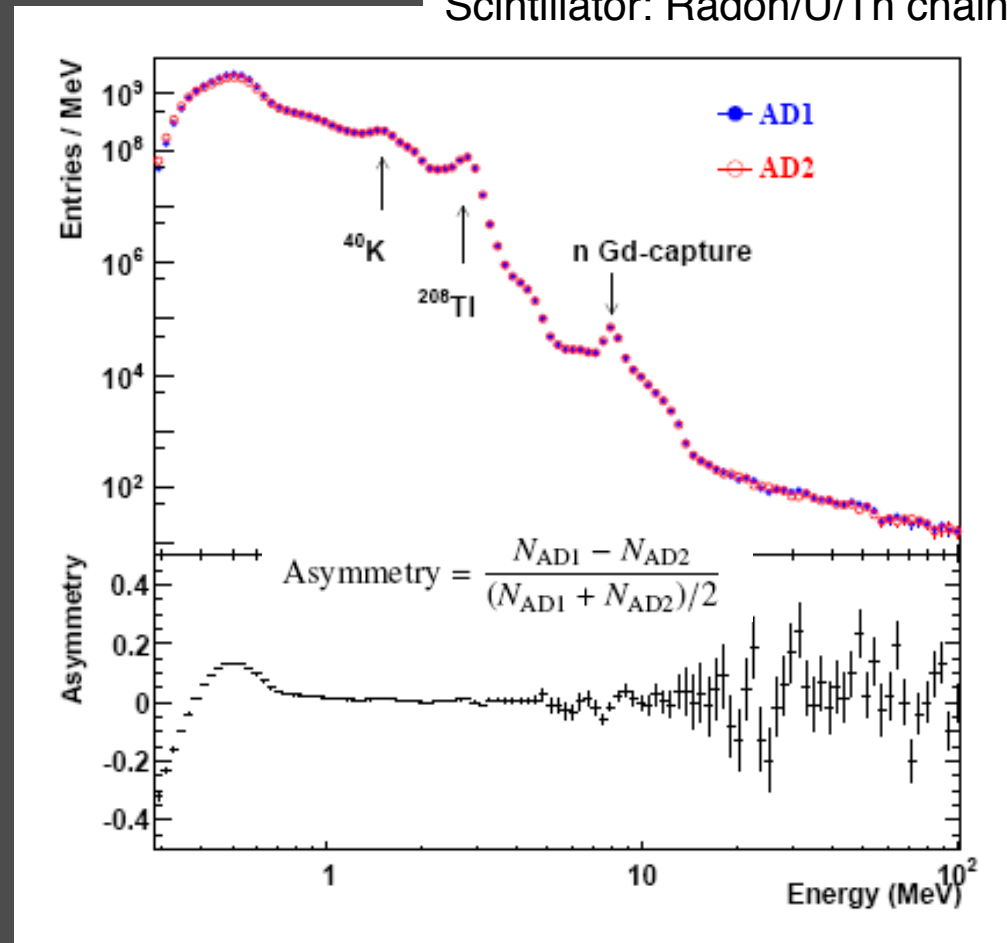
Daya Bay Collab.  
Phys.Rev.Lett. 108 (2012) 171803



# Czy dobrze rozumiemy co się dzieje w detektorach?

Stainless Steel: U/Th chains  
PMTs:  $^{40}\text{K}$ , U/Th chains  
Scintillator: Radon/U/Th chains

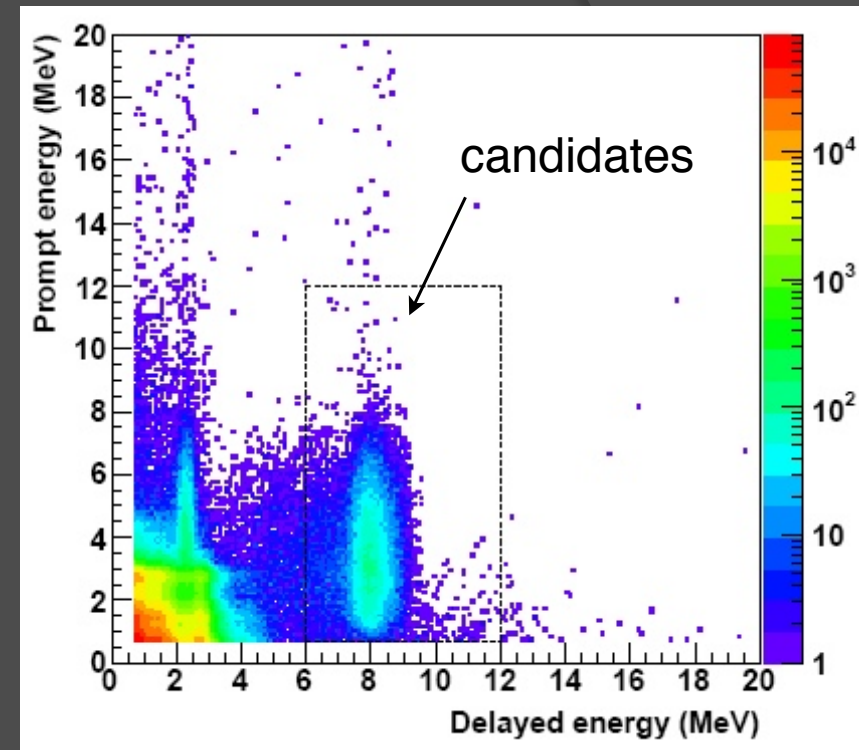
- ◉ Wedle projektu:  $\sim 50\text{Hz}$  powyżej 1 MeV
- ◉ Dane:  $\sim 60\text{Hz}$  powyżej 0.7 MeV,  $\sim 40\text{Hz}$  powyżej 1 MeV
- ◉ Wkłady od poszczególnych źródeł:
  - $\sim 5\text{ Hz}$  z SSV
  - $\sim 10\text{ Hz}$  z LS
  - $\sim 25\text{ Hz}$  z PMT
  - $\sim 5\text{ Hz}$  ze skał
- ◉ Zgodność pomiędzy modułami detekcyjnymi



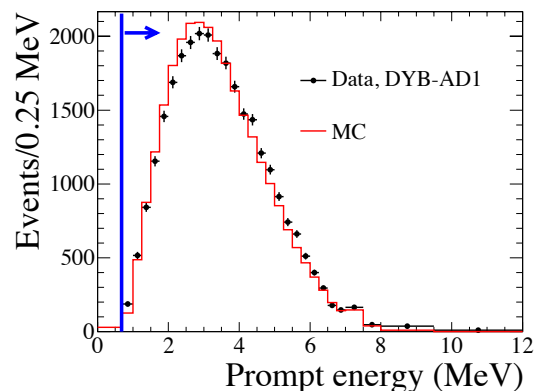
Spektrum pojedynczych sygnałów w detektorach

# Wybieramy sygnał

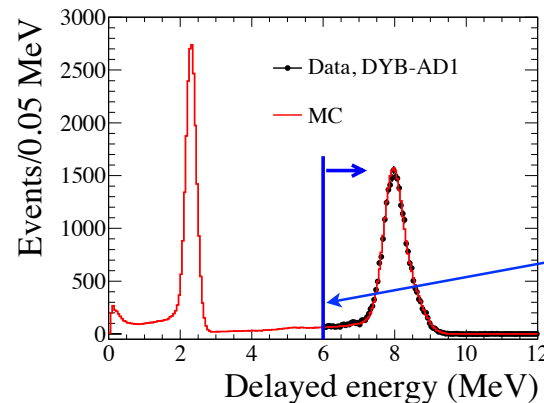
- Preselekcja
  - Reject Flashers
  - Reject Triggers within  $(-2 \mu\text{s}, 200 \mu\text{s})$  to a tagged water pool muon
- Wybór przypadków neutrinowych
  - Cięcie na krotność
    - Prompt-delayed pairs within a time interval of  $200 \mu\text{s}$
    - No triggers ( $E > 0.7 \text{ MeV}$ ) before the prompt signal and after the delayed signal by  $200 \mu\text{s}$
  - Weto mionowe
    - $1\text{s}$  after an AD shower muon
    - $1\text{ms}$  after an AD muon
    - $0.6\text{ms}$  after an WP muon
  - $0.7 \text{ MeV} < E_{\text{prompt}} < 12.0 \text{ MeV}$
  - $6.0 \text{ MeV} < E_{\text{delayed}} < 12.0 \text{ MeV}$
  - $1 \mu\text{s} < \Delta t_{e^+-n} < 200 \mu\text{s}$



Prompt Energy Signal



Delayed Energy Signal



Uncertainty in relative  $E_d$  efficiency (0.12%) between detectors is largest systematic.

# Dane - podsumowanie

	AD1	AD2	AD3	AD4	AD5	AD6
<b>Antineutrino candidates</b>	<b>28935</b>	<b>28975</b>	<b>22466</b>	<b>3528</b>	<b>3436</b>	<b>3452</b>
DAQ live time (day)	49.5530		49.4971	48.9473		
Veto time (day)	8.7418	8.9109	7.0389	0.8785	0.8800	0.8952
Efficiency	0.8019	0.7989	0.8363	0.9547	0.9543	0.9538
Accidentals (/day)	9.82±0.06	9.88±0.06	7.67±0.05	3.29±0.03	3.33±0.03	3.12±0.03
Fast neutron (/day)	0.84±0.28	0.84±0.28	0.74±0.44	0.04±0.04	0.04±0.04	0.04±0.04
<sup>8</sup> He/ <sup>9</sup> Li (/day)	3.1±1.6		1.8±1.1	0.16±0.11		
Am-C corr. (/day)			0.2±0.2			
<sup>13</sup> C(α, n) <sup>16</sup> O (/day)	0.04±0.02	0.04±0.02	0.035±0.02	0.03±0.02	0.03±0.02	0.03±0.02
<b>Antineutrino rate (/day)</b>	<b>714.17 ±4.58</b>	<b>717.86 ±4.60</b>	<b>532.29 ±3.82</b>	<b>71.78 ±1.29</b>	<b>69.80 ±1.28</b>	<b>70.39 ±1.28</b>

Tł

# Błędy systematyczne

Detector			
	Efficiency	Correlated	Uncorrelated
Target Protons		0.47%	0.03%
Flasher cut	99.98%	0.01%	0.01%
Delayed energy cut	90.9%	0.6%	0.12%
Prompt energy cut	99.88%	0.10%	0.01%
Multiplicity cut		0.02%	<0.01%
Capture time cut	98.6%	0.12%	0.01%
Gd capture ratio	83.8%	0.8%	<0.1%
Spill-in	105.0%	1.5%	0.02%
Lifetime	100.0%	0.002%	<0.01%
Combined	78.8%	1.9%	0.2%

Reactor			
	Correlated		Uncorrelated
Energy/fission	0.2%	Power	0.5%
$\bar{\nu}_e$ /fission	3%	Fission fraction	0.6%
		Spent fuel	0.3%
Combined	3%	Combined	0.8%

Przy pomiarze stosunku near/far używane są tylko niepewności nieskorelowane

Największe niepewności detektorowe

Nieskorelowane niepewności detektorowe

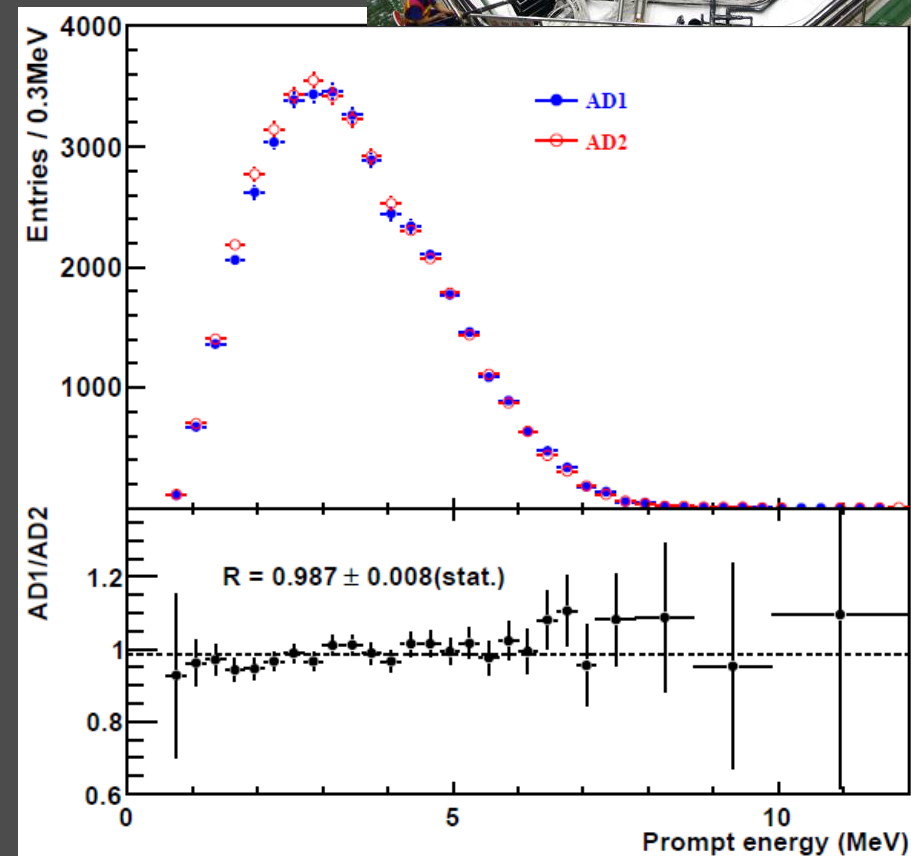
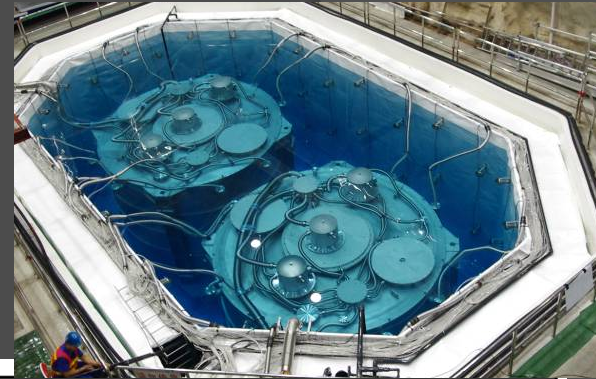
Influence of uncorrelated reactor systematics (0.8%) is reduced to **0.04%** detector systematics uncertainty by far vs near measurement.

Nieskorelowane niepewności reaktorowe



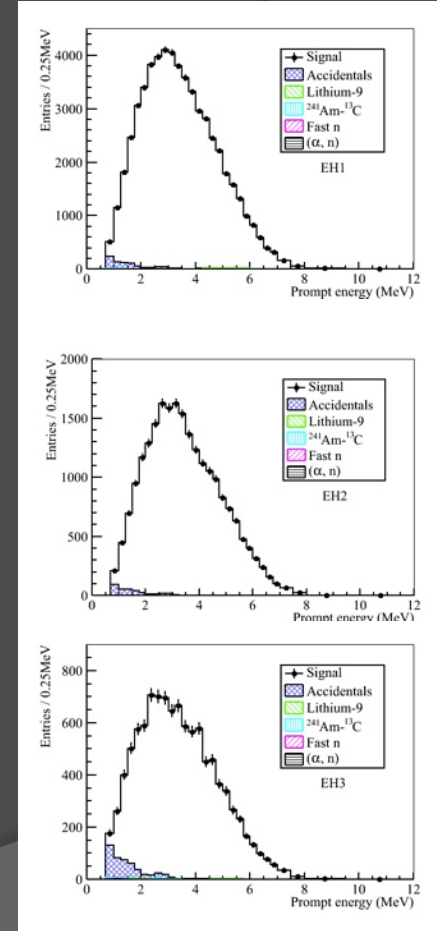
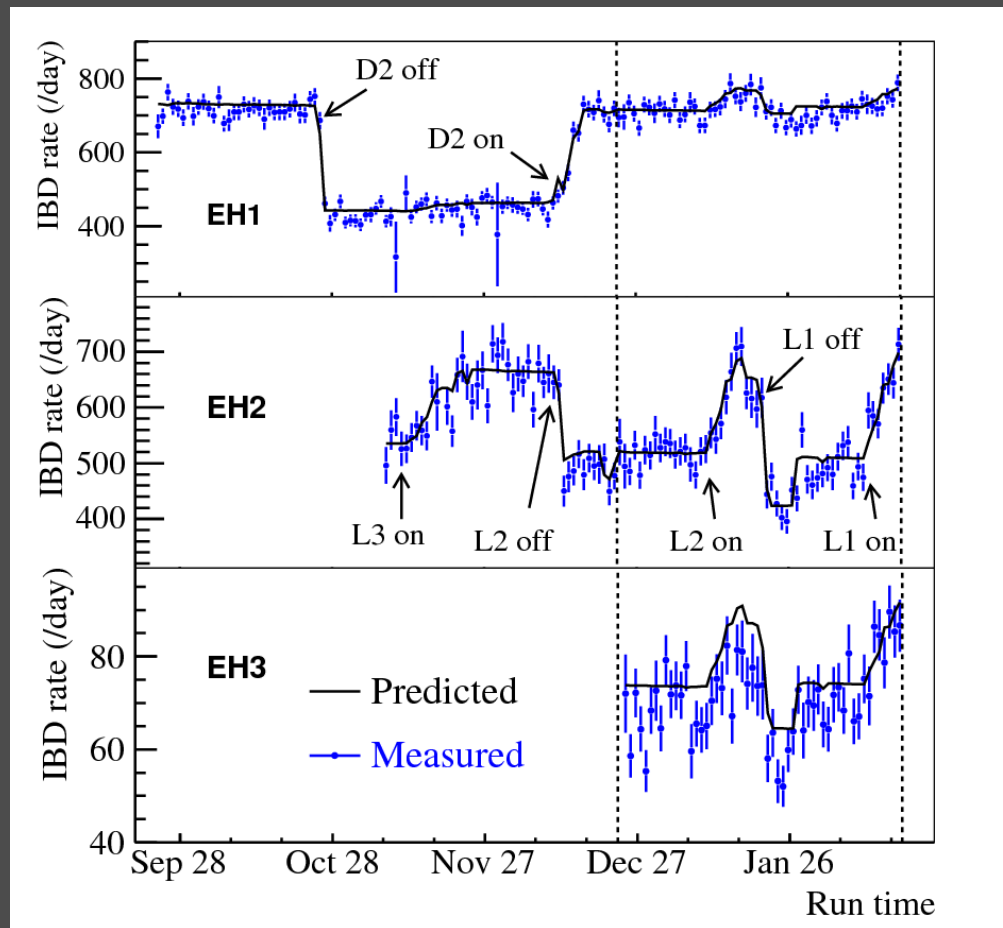
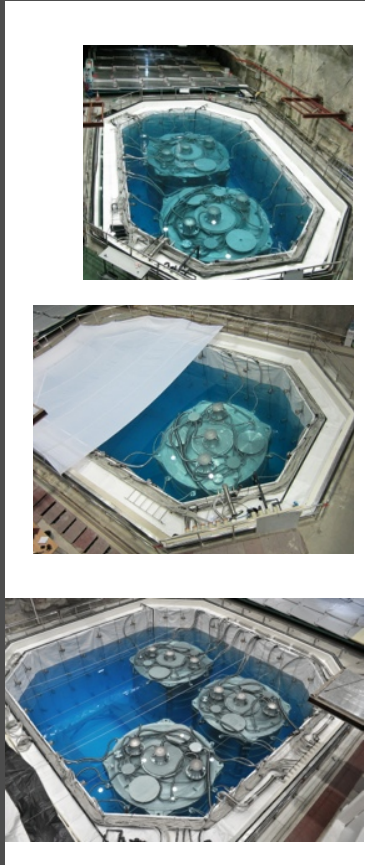
# Porównanie ostatecznego widma

- Porównanie dwóch modułów detekcyjnych w hali numer 1
- Oczekiwana wartość stosunku liczby obserwowanych neutronów:  $R$  ( $AD1/AD2$ ) = 0.981
  - mniej niż 1 bo: minimalne różnice w odległościach od reaktorów, masie, etc.
- Wartość zmierzona:  $0.987 \pm 0.008(\text{stat}) \pm 0.003(\text{syst})$
- Bardzo dobra zgodność pokazuje że dobrze kontrolujemy błędy systematyczne



# Przewidywany strumień neutrin vs. dane

Całkowita normalizacja przewidywań dopasowana do danych ze stacji bliskich



Widzimy dobrą zgodność dla bliskich detektorów i efekt oscylacyjny dla dalekich

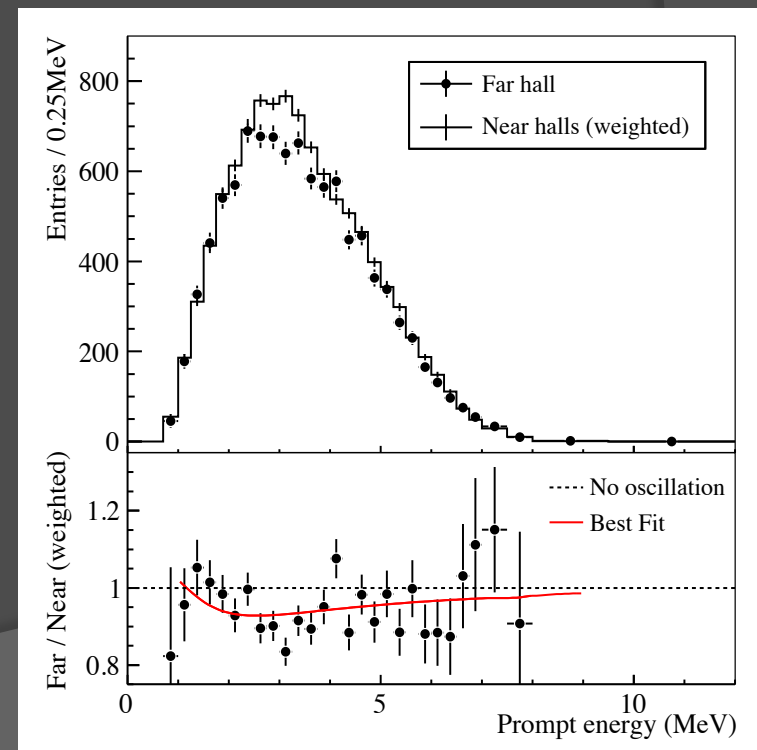
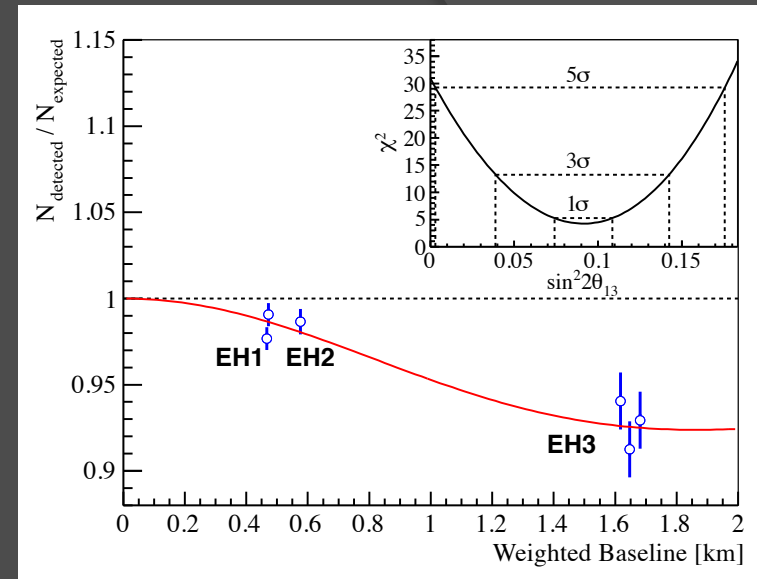
# Wyniki oscylacyjne

Zaobserwowano: 9901 neutron w stacji dalekiej,  
Oczekiwano: 10530 neutron przy założeniu że nie ma oscylacji.

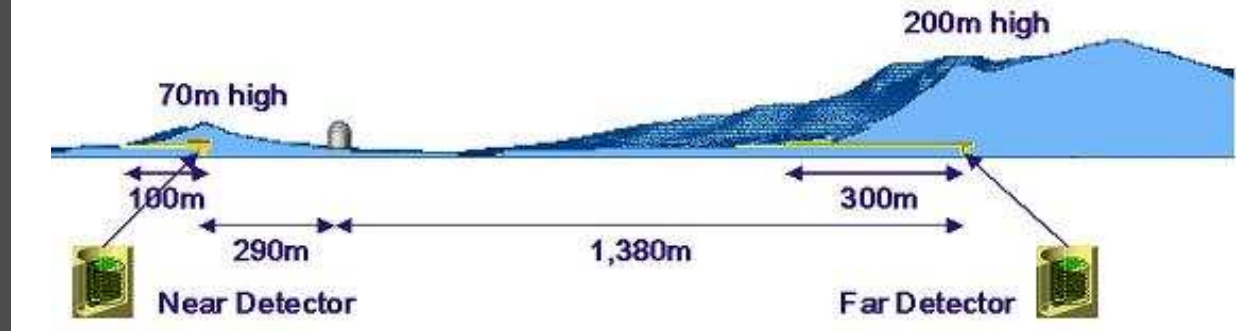
$$R = 0.940 \pm 0.011 \text{ (stat)} \pm 0.004 \text{ (syst)}$$

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.092 \pm 0.016 \text{ (stat)} \pm 0.005 \text{ (syst)}$$

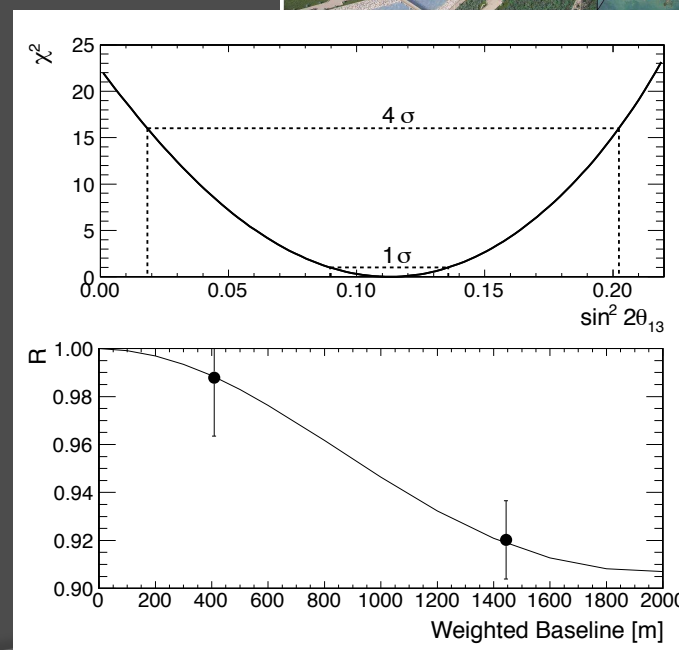
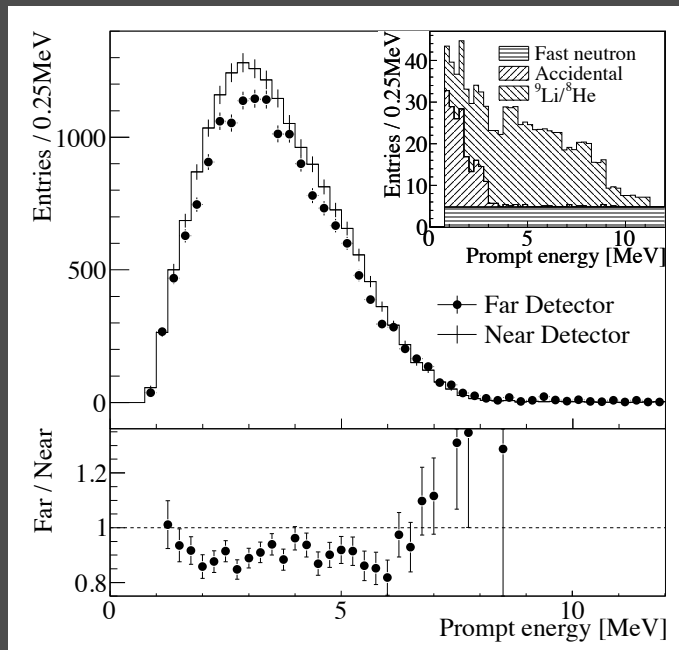
$$\sin^2 2\theta_{13} = 0 \text{ excluded at } 5.2\sigma$$



# RENO



- Eksperyment reaktorowy w Korei Płd
- Elektrownia jądrowa Yeonggwang (영광), 6 reaktorów, 5. pod względem mocy na świecie



$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.113 \pm 0.013(\text{stat.}) \pm 0.019(\text{syst.})$$

# $\theta_{13}$ - terazniejszość i przyszłość

Daya Bay

$\sin^2 2\theta_{13}$   
 $0.092 \pm 0.004$

Reno

$\sin^2 2\theta_{13} = 0.09$

Przy

• U

•

•

•

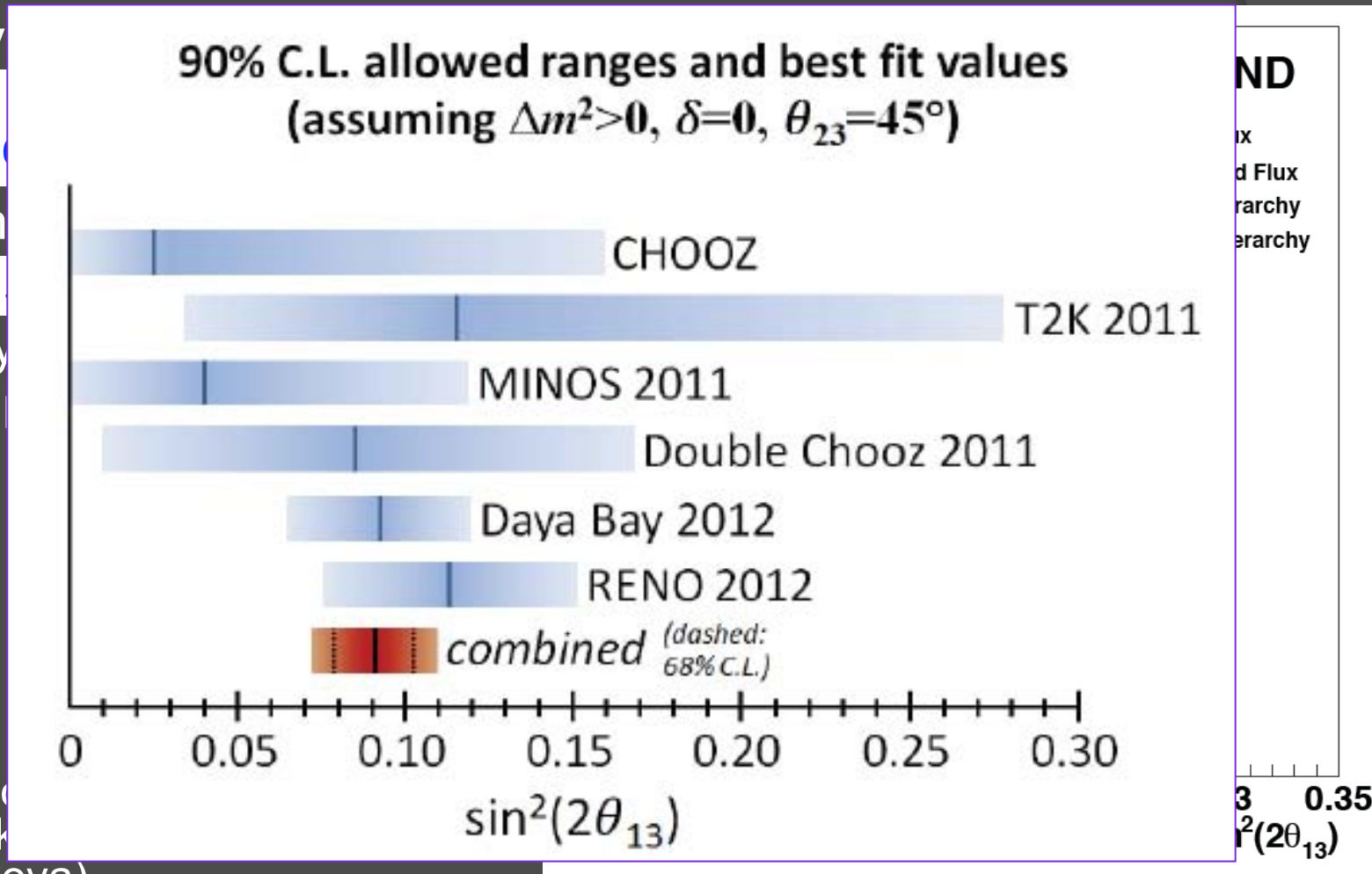
•

•

•

•

ak  
 Nova)



ND

ix  
 d Flux  
 rarchy  
 erarchy

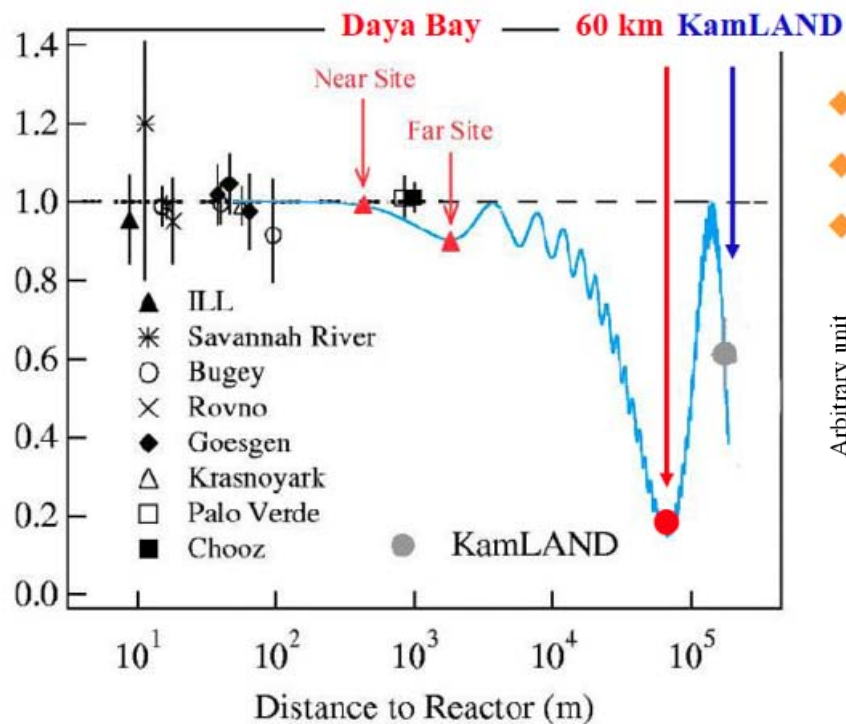
3 0.35  
 $\sin^2(2\theta_{13})$

# Daya Bay II?

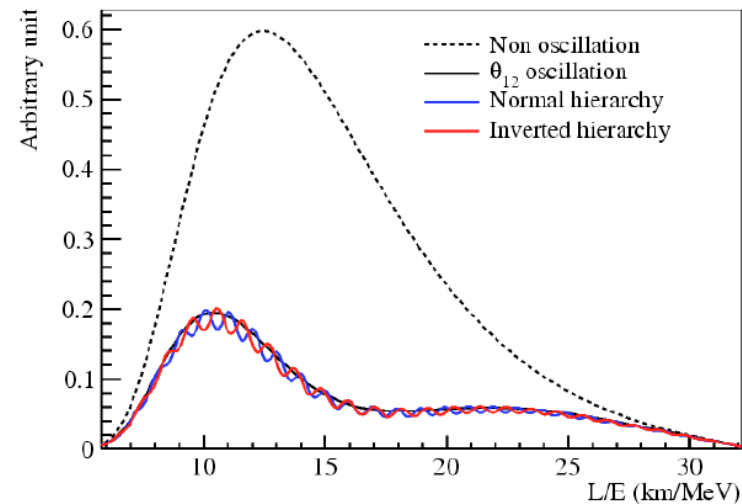
## Towards Measurement of the Mass Hierarchy

see J. Cao, vTURN

Giant Detector located at 60 km from Daya Bay reactors, the 1<sup>st</sup> maximum of  $\theta_{12}$  oscillation.



- ◆ 20 kton detector
- ◆ 3% energy resolution
- ◆ Rich physics possibilities

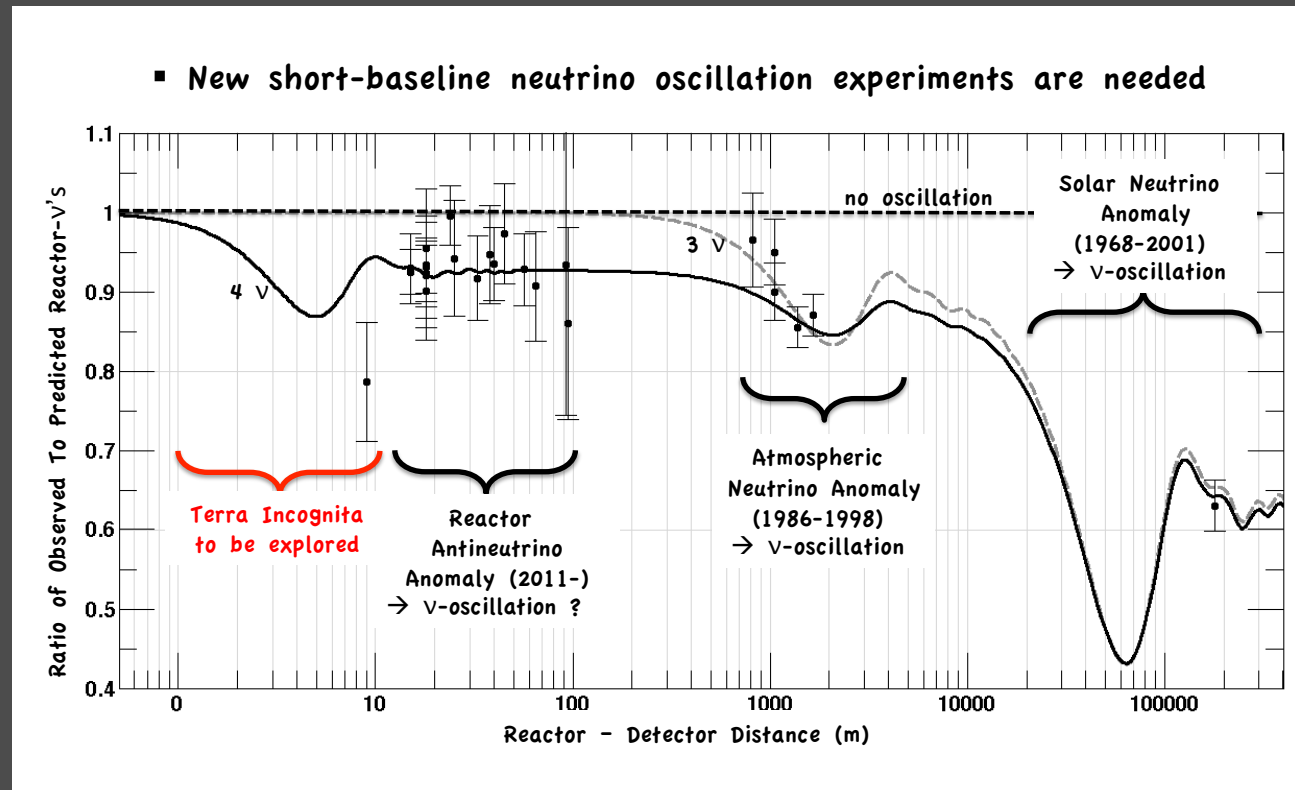


# Co nam pozostało do zmierzenia?

- ⊙  $\Theta_{13} > 0!$
- ⊙ Łamanie symetrii CP?
- ⊙ Efekty materii?
- ⊙  $\Theta_{23} = \pi/4?$
- ⊙ Coś innego (neutrino sterylne?)
- ⊙ Warsztaty CERNowskie *European Strategy for Neutrino Oscillation Physics. 14-16. maja 2012*
- ⊙ Dyskusja nad przyszłością fizyki neutrin w Europie
- ⊙ Następne spotkanie w Krakowie we wrześniu - *Otwarte Sympozjum dot. Europejskiej Strategii dla Fizyki Cząstek (dotyczące całej fizyki cząstek elementarnych)*

# Neutrina sterylne

Być może coś dzieje się przy  $\Delta m^2 \sim 1 \text{eV}^2$  (LSND, MiniBoone, eksp. reaktorowe o b. krótkiej bazie)



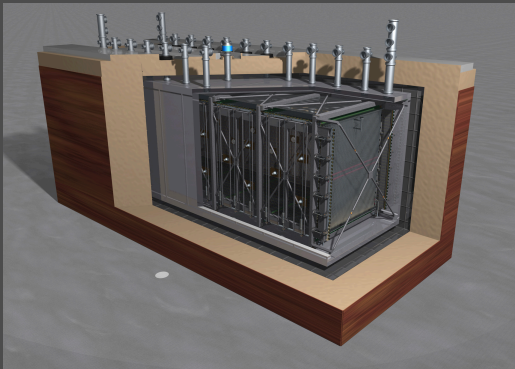
Pomysły:

- eksperyment z krótką bazą na wiązce w CERNie
- źródło radioaktywne w Borexino



# Krótką baza w CERNie

- „Icarus + Nessie”
- Odległości: 330/1100/1600m
- Wiązka –  $\nu_\mu$ , szukamy  $\nu_\mu$  i  $\nu_e$
- Ciekłoargonowy TPC + spektrometr magnetyczny do pomiaru mionów
- Neutrino sterylne,  $\Delta m^2$  rzędu 1



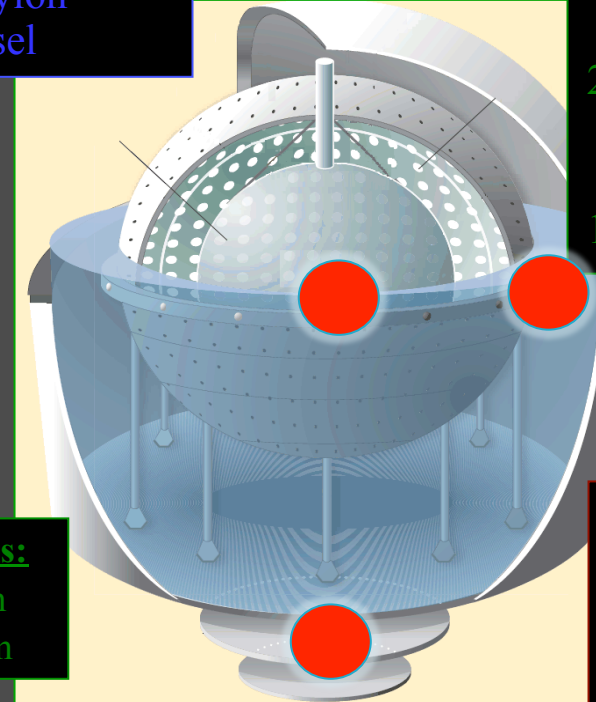
# Borexino

## Scintillator:

270 t PC+PPO in  
a 150  $\mu\text{m}$   
thick nylon  
vessel

## Stainless Steel Sphere:

2212  
photomulti  
pliers  
1350 m<sup>3</sup>

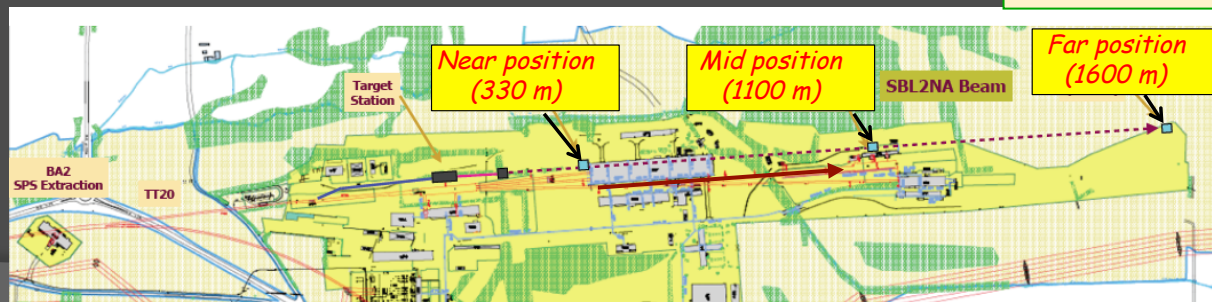


## Nylon vessels:

Inner: 4.25 m  
Outer: 5.50 m

## Water Tank:

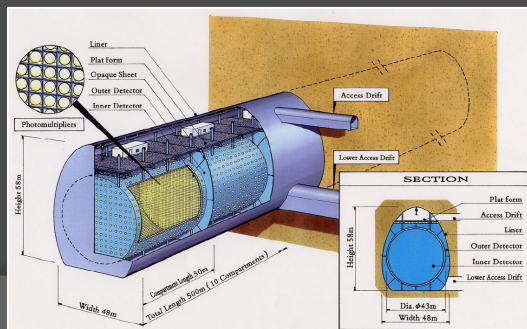
$\gamma$  and n shield  
 $\mu$  water  $\checkmark$   
detector  
208 PMTs in  
water  
2100 m<sup>3</sup>



# Eksperymenty z długą bazą

## ○ T2K/HyperK (295 km)

- Improvement of significance of our electron appearance signal
  - $>3\sigma$  this summer
  - Collecting  $10^{21}$  POT till the summer of 2013 which will give us more than  $5\sigma$  significance
- Analysis improvements
- Various cross-section measurements in the near detector
- Dokładne zmierzenie kanału zanikania neutrin mionowych
- Projekt HyperK w fazie (niepewnych) planów



## ○ NOvA (810 km)

### Physics Goals:

- Measure the oscillation probabilities of

$$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e} \text{ and } \bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_{e}$$

- Measure the mixing angle  $\theta_{13}$
- Determine neutrino mass hierarchy
- Study the phase parameter for CP Violation  $\delta_{CP}$

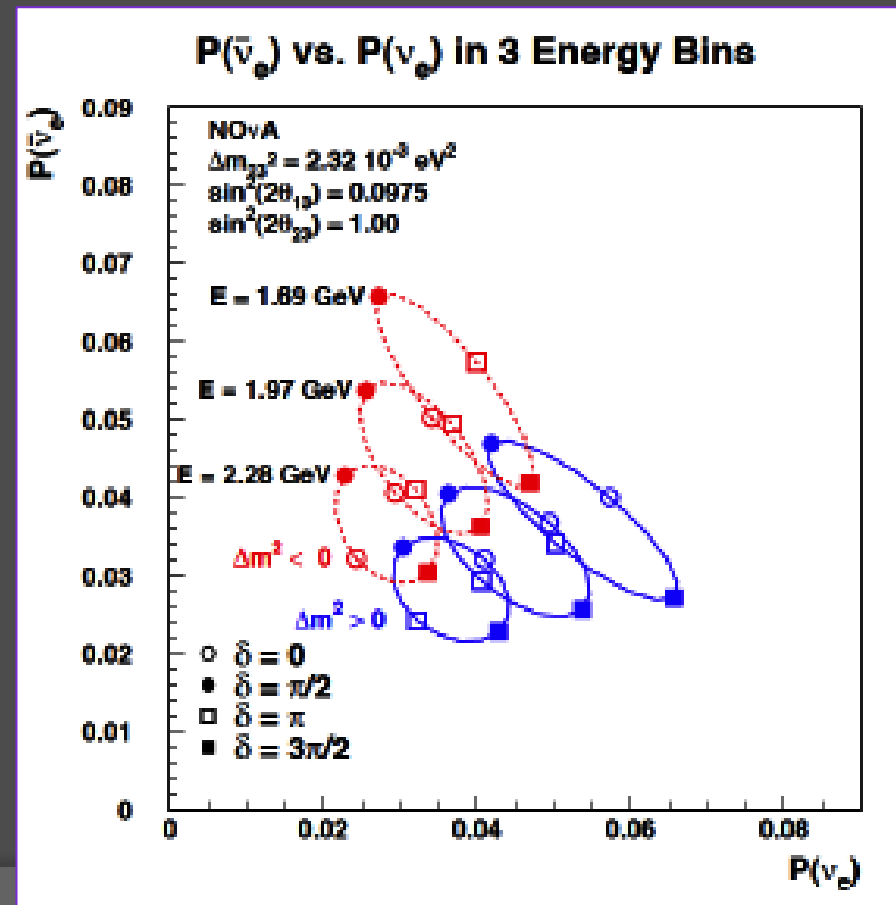
- Precision measurements of  $\Delta m_{32}^2$ ,  $\theta_{23}$

- As well as:

- $\nu$  cross sections
- Sterile neutrinos
- Supernova signals

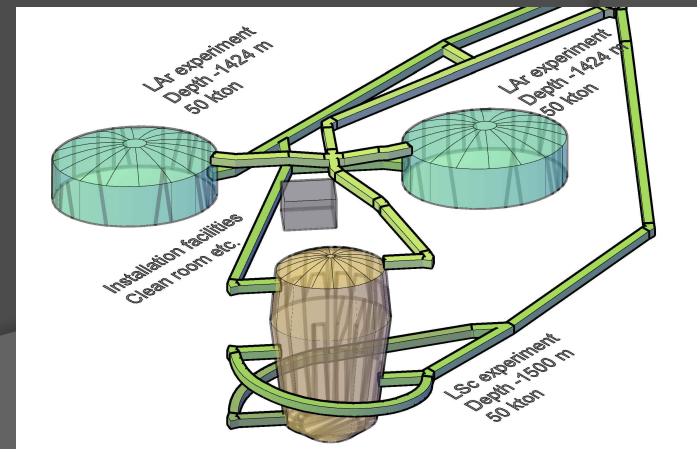
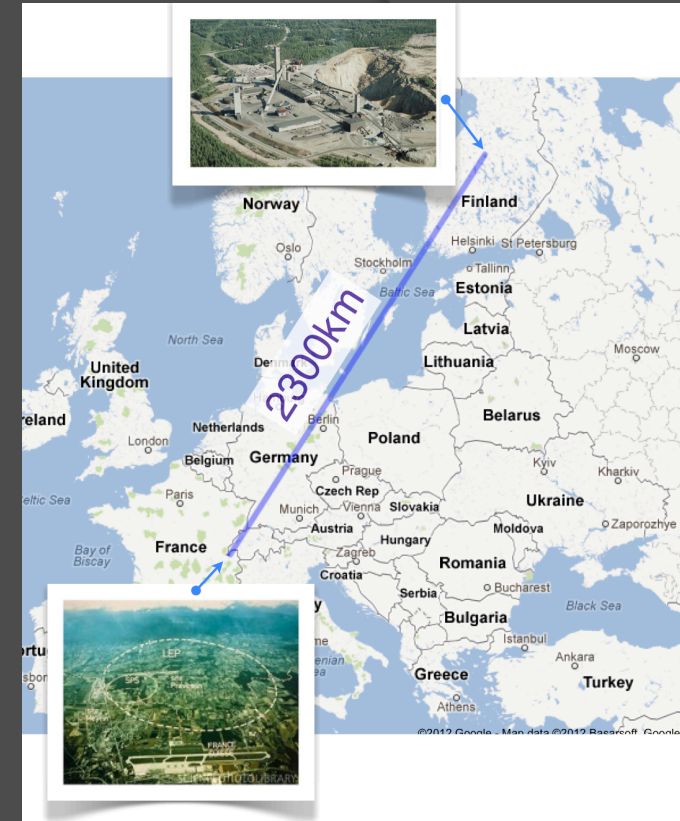
# Hierarchia mas i CPV w Nova

- Potrzebny pomiar neutrin i antyneutrin



# Laguna-LBNO

- Europejski eksperyment z długą bazą CERN->Pyhasalmi
- Wielki detektor ciekłoargonowy (bardzo dobra identyfikacja cząstek) 1.5km pod ziemią w kopalni
- Pomiar dwóch maksimów oscylacji pozwoli na rozszeptanie efektów materii i łamania CP
- Perspektywa czasowa: wczesne lata 20. XXI w.

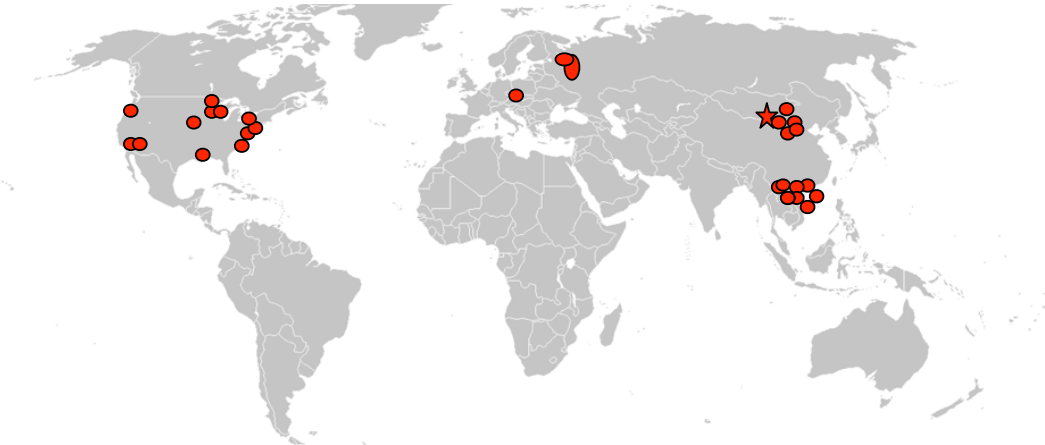


# Podsumowanie

- Daya Bay i RENO po raz pierwszy zmierzyły kąt  $\theta_{13}$  za pomocą obserwacji antyneutrin elektronowych z reaktorów jądrowych
- Wynik ten jest zgodny z rezultatami uzyskanymi przez eksperymenty z długą bazą (T2K, Minos)
- W najbliższym czasie oczekujemy polepszenia precyzji pomiarów w obu typach eksperymentów (najbliższe nowości na konferencji Neutrino 2012 w Kioto, jp)
- Interesujące perspektywy rozwoju fizyki oscylacji neutrin w najbliższych latach

Zapasowe

## An International Effort



### Asia (20)

IHEP, Beijing Normal Univ., Chengdu Univ. of Sci and Tech, CGNPG, CIAE, Dongguan Polytech, Nanjing Univ., Nankai Univ., NCEPU, Shandong Univ., Shanghai Jiao Tong Univ., Shenzhen Univ., Tsinghua Univ., USTC, Zhongshan Univ., Univ. of Hong Kong, Chinese Univ. of Hong Kong, National Taiwan Univ., National Chiao Tung Univ., National United Univ.

### North America (16)

Brookhaven Natl' Lab, Cal Tech, Cincinnati, Houston, Illinois Institute of Technology, Iowa State, Lawrence Berkeley Natl' Lab, Princeton, Rensselaer Polytech, UC Berkeley, UCLA, Wisconsin, William & Mary, Virginia Tech, Illinois, Siena College

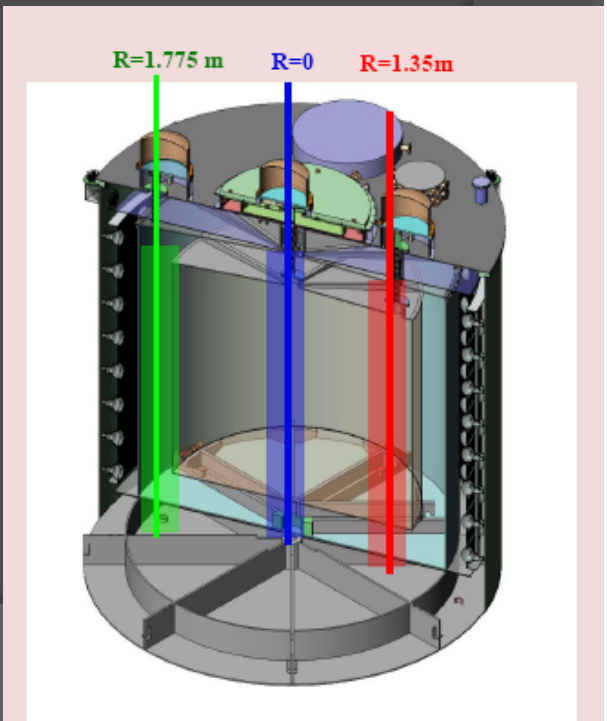
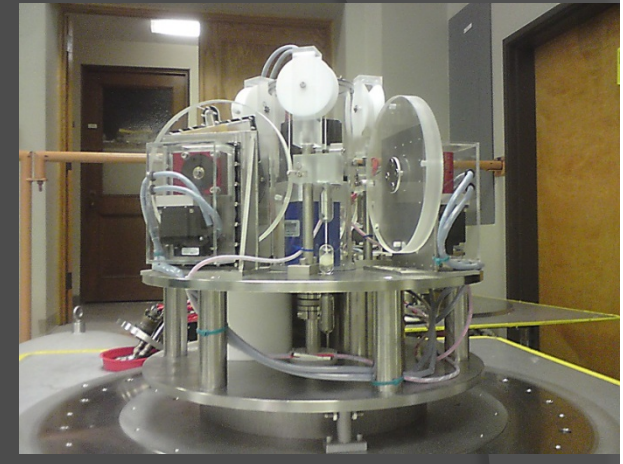
### Europe (2)

Charles Univ., Dubna

~230 collaborators

# Automatic Calibration System

- ◎ **Three Z axis:**
  - **One at the center**
    - For time evolution, energy scale, non-linearity...
  - **One at the edge**
    - For efficiency, space response
  - **One in the  $\gamma$ -catcher**
    - For efficiency, space response
- ◎ **3 sources for each z axis:**
  - **LED**
    - for  $T_0$ , gain and relative QE
  - **$^{68}\text{Ge}$  ( $2 \times 0.511$  MeV  $\gamma$ 's)**
    - for positron threshold & non-linearity...
  - **$^{241}\text{Am}$ - $^{13}\text{C}$  +  $^{60}\text{Co}$  (1.17+1.33 MeV  $\gamma$ 's)**
    - For neutron capture time, ...
    - For energy scale, response function, ...
- ◎ **Once every week:**
  - **3 axis, 5 points in Z, 3 sources**

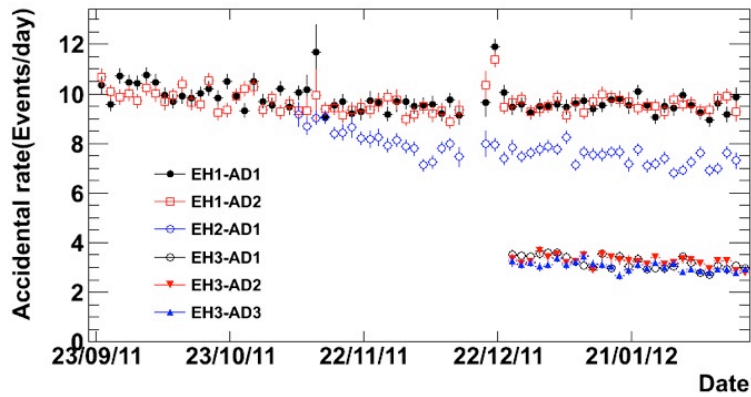


Automated Calibration



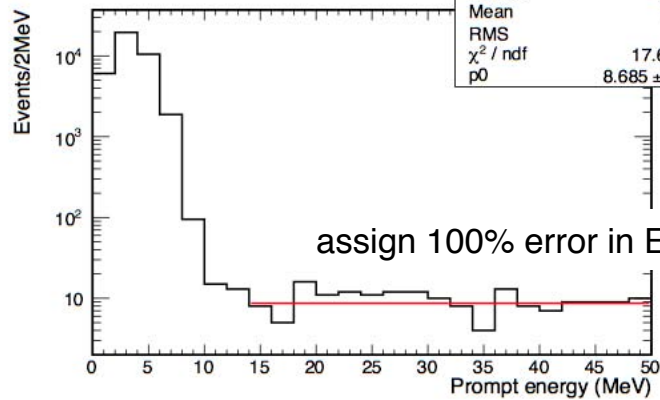
# T10

## Accidentals



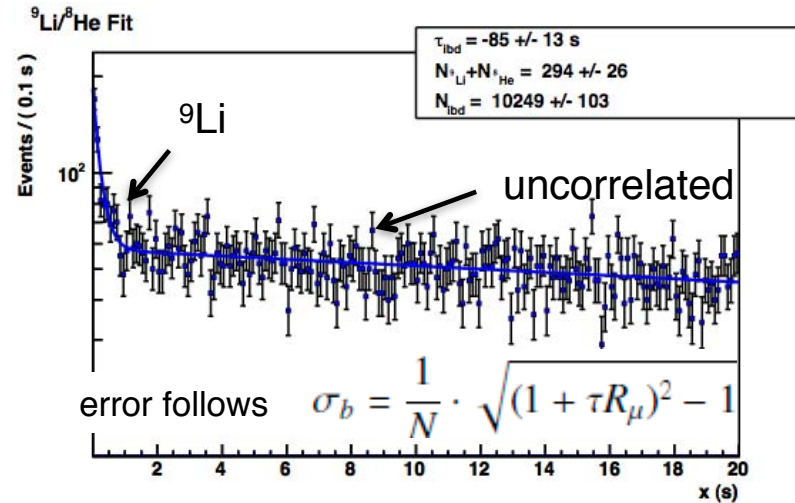
## Fast neutrons

EH1 Prompt energy, AD#1



eh1_ad1_hist	
Entries	38256
Mean	3.587
RMS	2.47
$\chi^2 / \text{ndf}$	17.66 / 17
p0	$8.685 \pm 0.695$

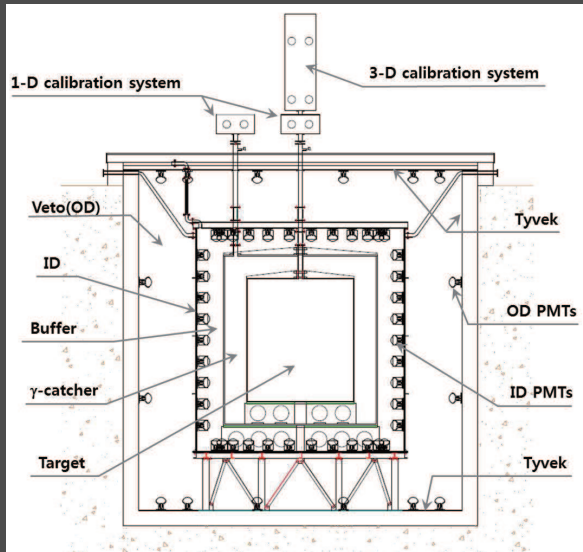
## Correlated $\beta$ -n decay



	B/S at EH1	B/S at EH3
Accidentals	~1.4%	~4.5%
fast neutrons	~0.1%	~0.06%
$^8\text{He}/^9\text{Li}$	~0.4%	~0.2%
Am-C	~0.03%	~0.3%
$\alpha$ -n	~0.01%	~0.04%
<b>Sum</b>	<b>2.0%</b>	<b>5.2%</b>

# RENO

Detector	Near	Far
Selected events	154088	17102
Total background rate (per day)	21.75±5.93	4.24±0.75
IBD rate after background subtraction (per day)	779.05±6.26	72.78±0.95
DAQ Live time (days)	192.42	222.06
Detection efficiency ( $\epsilon$ )	0.647±0.014	0.745±0.014
Accidental rate (per day)	4.30±0.06	0.68±0.03
$^9\text{Li}/^8\text{He}$ rate (per day)	12.45±5.93	2.59±0.75
Fast neutron rate (per day)	5.00±0.13	0.97±0.06



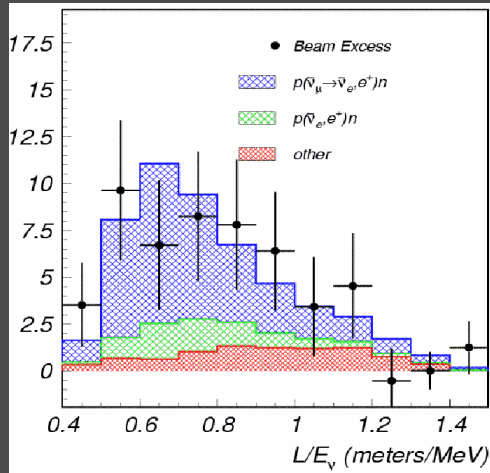
Reactor		
	Uncorrelated	Correlated
Thermal power	0.5%	–
Fission fraction	0.7%	–
Fission reaction cross section	–	1.9%
Reference energy spectra	–	0.5%
Energy per fission	–	0.2%
Combined	0.9%	2.0%
Detection		
	Uncorrelated	Correlated
IBD cross section	–	0.2%
Target protons	0.1%	0.5%
Prompt energy cut	0.01%	0.1%
Flasher cut	0.01%	0.1%
Gd capture ratio	0.1%	0.7%
Delayed energy cut	0.1%	0.5%
Time coincidence cut	0.01%	0.5%
Spill-in	0.03%	1.0%
Muon veto cut	0.02%	0.02%
Multiplicity cut	0.04%	0.06%
Combined (total)	0.2%	1.5%

Parameter	Value	Description
Thermal Power (GW)	16.4(average)/17.3(peak)	6 reactor
Target Size (ton)	16 (near/far)	Gd loaded Liquid Scintillator
PMT Coverage	14% (near/far)	surface area
Baseline Distance(m)	292 (near)/1380 (far)	
Overburden (mwe)	110 (near)/450 (far)	Vertical
Number of Events per Year	$2.6 \times 10^5$ (near)/ $3.0 \times 10^4$ (far)	$\epsilon_{total} = 56\%$ (near)/ $72\%$ (far)
90% CL Sensitivity (3 years)	$\sin^2(2\theta_{13}) \sim 0.02 - 0.03$	$\Delta m_{13}^2 = (2 - 3) \times 10^{-5} \text{ eV}^2$

# LSND

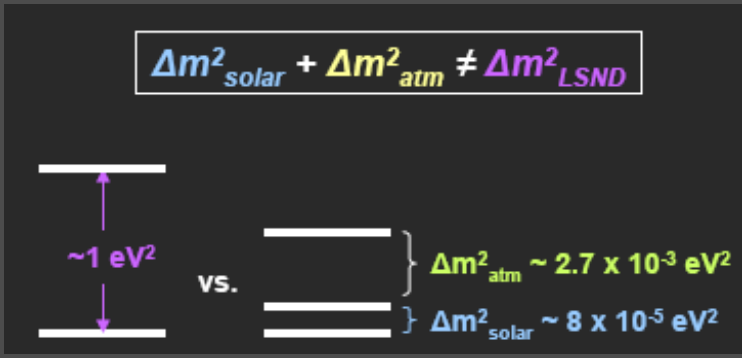
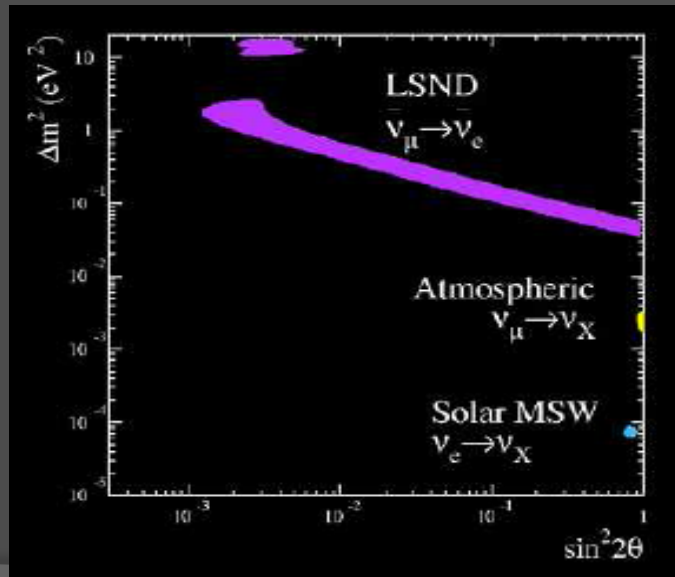
$$\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$$

Observed at small L/E



LSND found an excess of  $\bar{\nu}_e$  in  $\bar{\nu}_\mu$  beam  
 Excess:  $87.9 \pm 22.4 \pm 6.0$  ( $3.8\sigma$ )

Podobny wynik dla wiązki neutrin mionowych (choć nadwyżka mniej znacząca).



- Mamy problem – trzy  $\Delta m^2$  więcej niż 3 zapachy neutrin?
- Pomysł – zrobmy eksperyment o podobnym L/E, żeby zweryfikować wynik LSND

# Anomalie MiniBoone/LSND

⊙ a

## The MiniBooNE Strategy

Test the LSND indication of anti-electron neutrino oscillations  
Keep L/E same, change beam, energy, and systematic errors

$$P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e) = \sin^2 2\theta \sin^2(1.27 \Delta m^2 L/E)$$

neutrino energy (E):

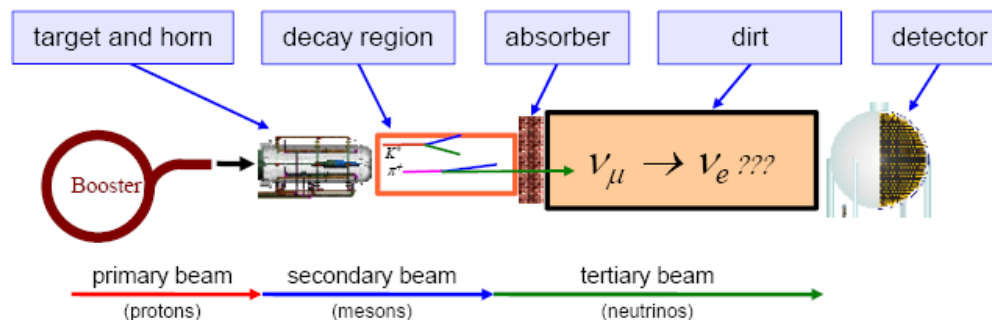
MiniBooNE: ~500 MeV

LSND: ~30 MeV

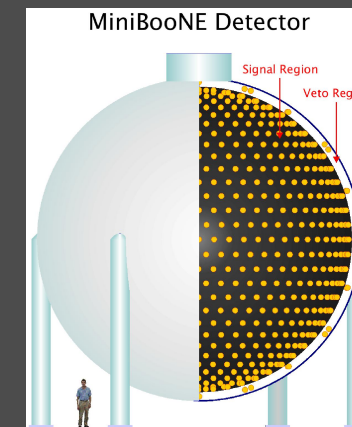
baseline (L):

MiniBooNE: ~500 m

LSND: ~30 m



**Event rates:**  $\nu_{\mu} = 98.1\%$ ,  $\nu_e = 0.6\%$ ,  $\bar{\nu}_{\mu} = 1.2\%$ ,  $\bar{\nu}_e = 0.03\%$

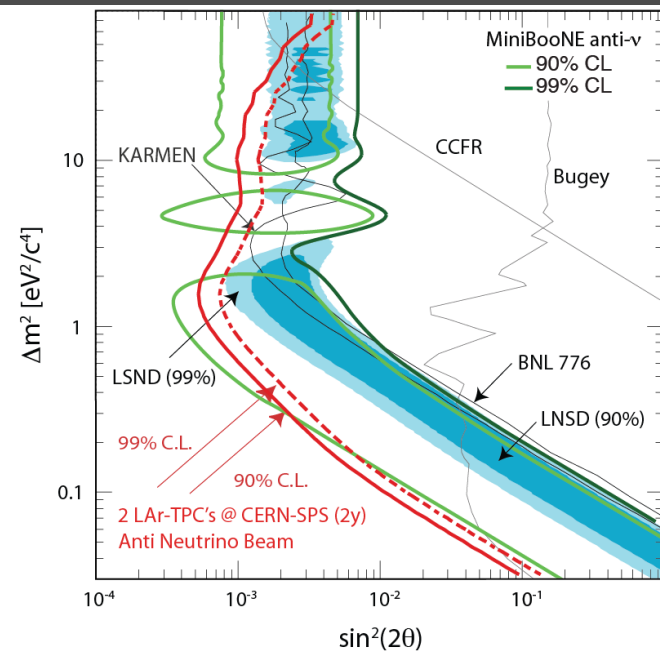
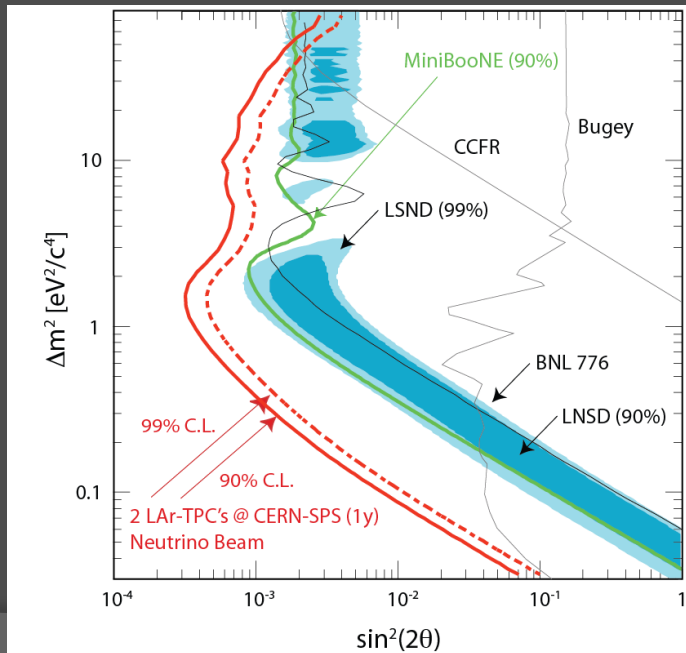
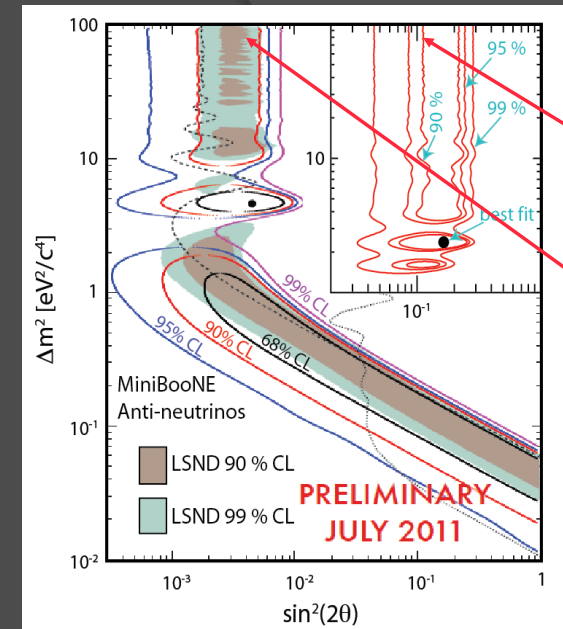
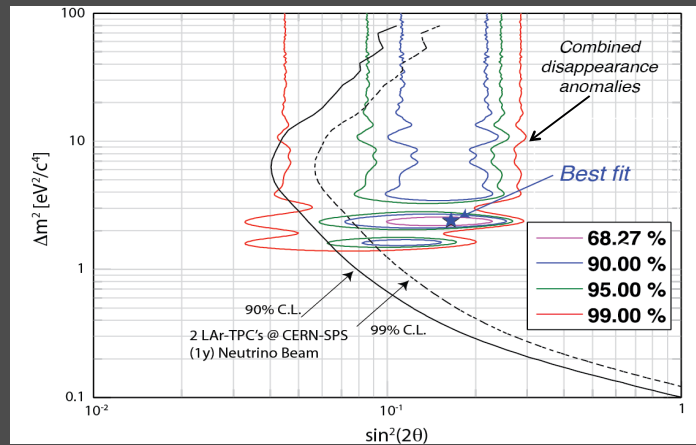


- 541m drogi oscylacji
- Średnia energia wiązki 800MeV
- 800t oleju mineralnego wewnątrz sfery o średnicy 12m
- 1280 wewnętrznych fotopowielaczy

# Neutrina sterylne?

Kombinacja:

- Pomiaru reaktorowe



Pomiary wiązkowe (LSND/MiniBoone)

# USA

## NOvA

### Physics Goals:

➤ Measure the oscillation probabilities of

$$\nu_\mu \rightarrow \nu_e \text{ and } \bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$$

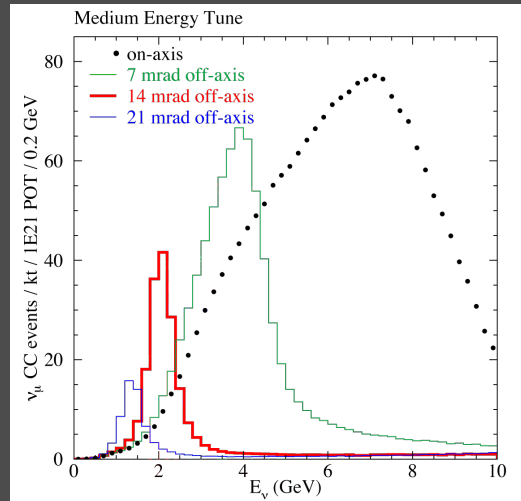
- ❑ Measure the mixing angle  $\theta_{13}$
- ❑ Determine neutrino mass hierarchy
- ❑ Study the phase parameter for CP Violation  $\delta_{CP}$

➤ Precision measurements of  $\Delta m^2_{32}$ ,  $\theta_{23}$

➤ As well as:

- ❑  $\nu$  cross sections
- ❑ Sterile neutrinos
- ❑ Supernova signals

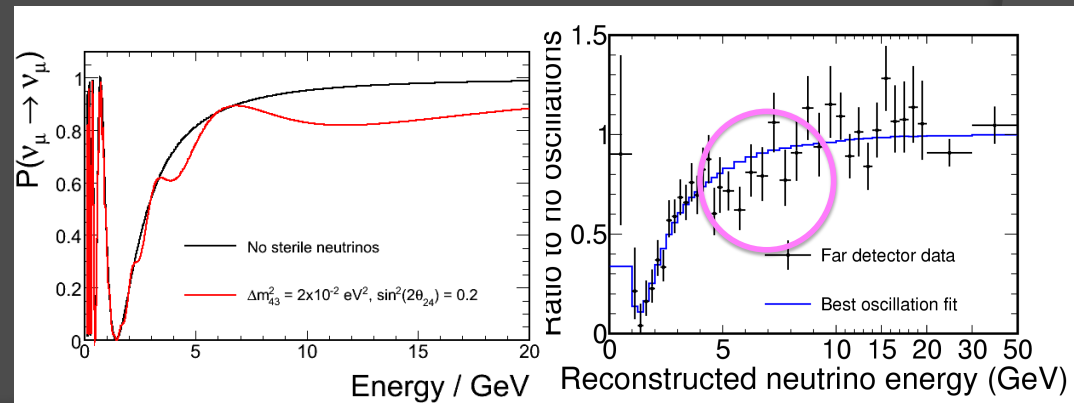
Propozycja dodatkowego  
ciekłoargonowego detektra  
- GLADE



Ta sama wiązka dla  
obu eksperymentów,  
inny kąt off-axis

## Minos+

- The overarching reason to run MINOS in the NuMI-NOVA beam is to look for new physics in a previously unexplored region
- Unique high statistics experiment with charge sign measurement
  - different energy region
  - different systematics (beam, x-sec comp)
- 3000 events/year between 4-10 GeV near oscillation maximum
- Verification of  $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) + P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$
- Quantitative evidence for tau production hoped for



Neutrina sterylne?

# Efekty materii

- Oddziaływanie neutrin elektronowych z elektronami materii powoduje pojawienie się potencjału, zależnego od lokalnej gęstości elektronów

$$A = \pm 2\sqrt{2}G_F \cdot E \cdot n_e$$

- Ma to wpływ na prawdopodobieństwo oscylacji, tzn. niezależnie od fazy łamania CP

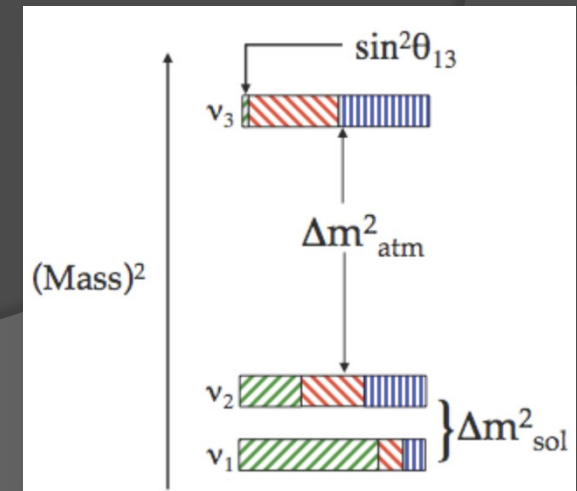
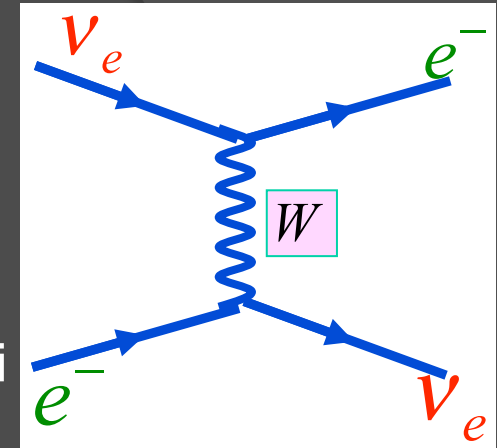
$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) - P(\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta) \neq 0$$

- Dodatkowo może pojawić się efekt rezonansowy, gdy

$$\Delta m^2 \simeq A \quad \Leftrightarrow \quad E_{\text{res}}^{\text{Earth}} = 6 - 8 \text{ GeV}$$

- Mamy wtedy czułość na absolutną skalę mas – hierarchia!

	$\nu$	$\bar{\nu}$
$\Delta m^2 > 0$	MSW	-
$\Delta m^2 < 0$	-	MSW



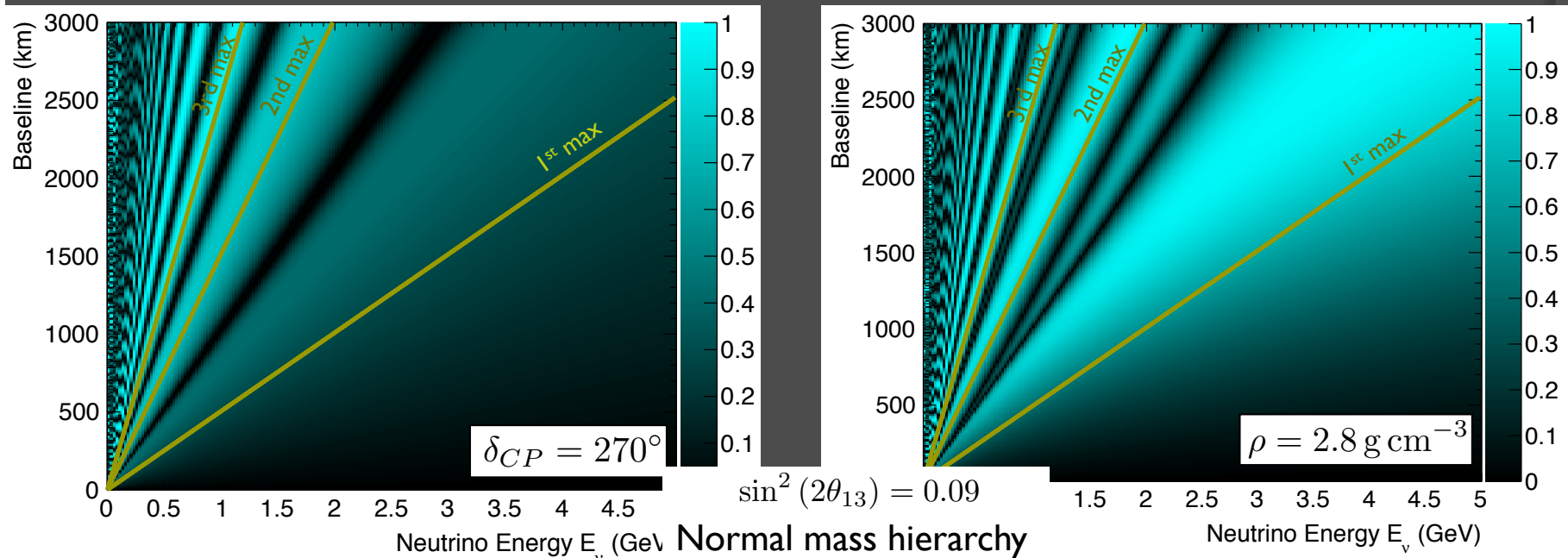
# CPV vs. efekty materii

- Efekty materii dominują w 1. maksimum, łamanie CP w dalszych
- Aby rozsupłać te efekty potrzeba pomiaru w wielu maksimach
- Potrzebne długie bazy, wiązki o szerokim spektrum

$$E_{\nu}^{2nd\ max} \gtrsim 0.5\ \text{GeV} \implies L \gtrsim 1000\ \text{km}$$

$$\mathcal{A}_{CP}^{vac}(\delta_{CP}) \equiv abs \left( \frac{P^{vac}(\nu) - P^{vac}(\bar{\nu})}{P^{vac}(\nu) + P^{vac}(\bar{\nu})} \right)$$

$$\mathcal{A}_{CP}(\rho) \equiv abs \left( \frac{P^{mat}(\nu) - P^{mat}(\bar{\nu})}{P^{mat}(\nu) + P^{mat}(\bar{\nu})} \right)$$



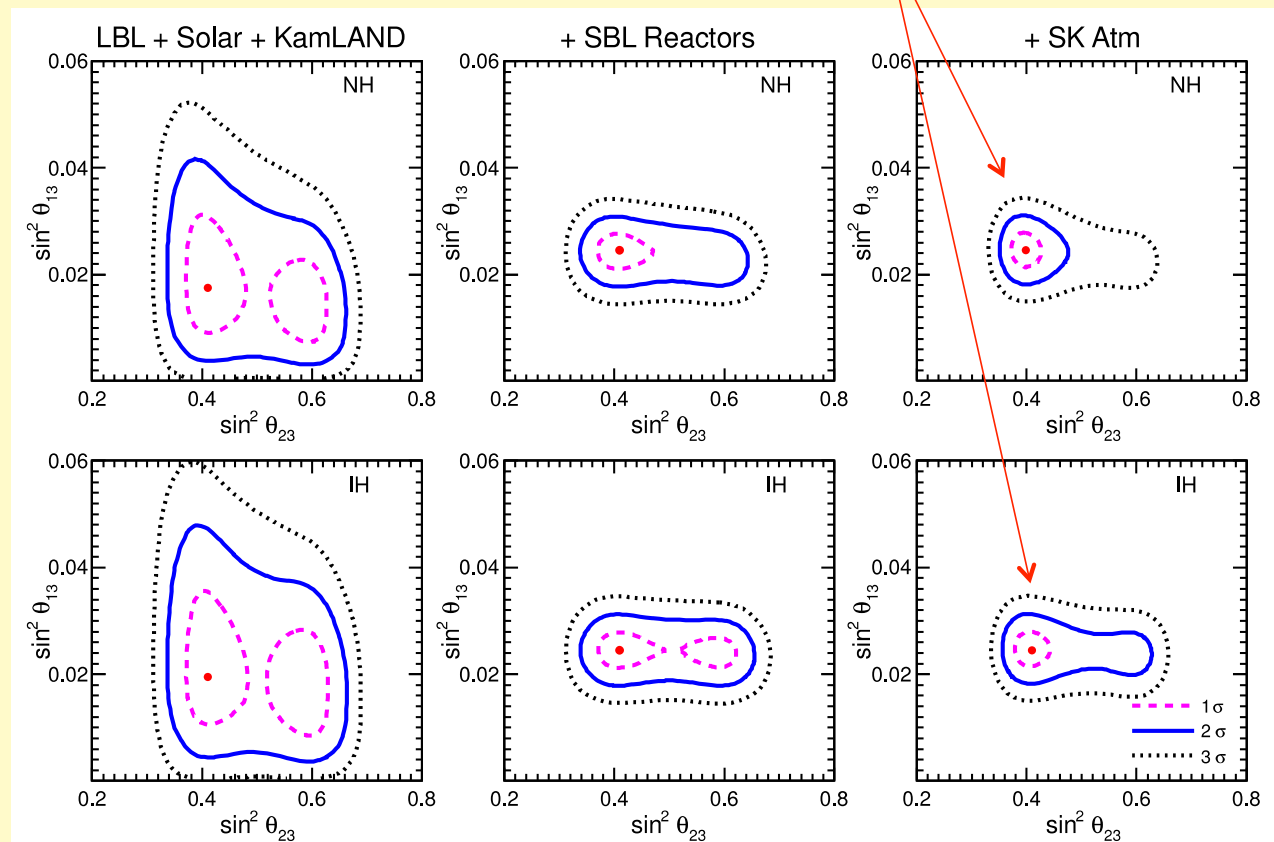


# Nasza bieżąca wiedza o fizyce oscylacji neutrin

Adding SK atm data, the preference for  $\theta_{23}$  in the 1<sup>st</sup> octant is clearly corroborated

normal hierarchy

inverted hierarchy

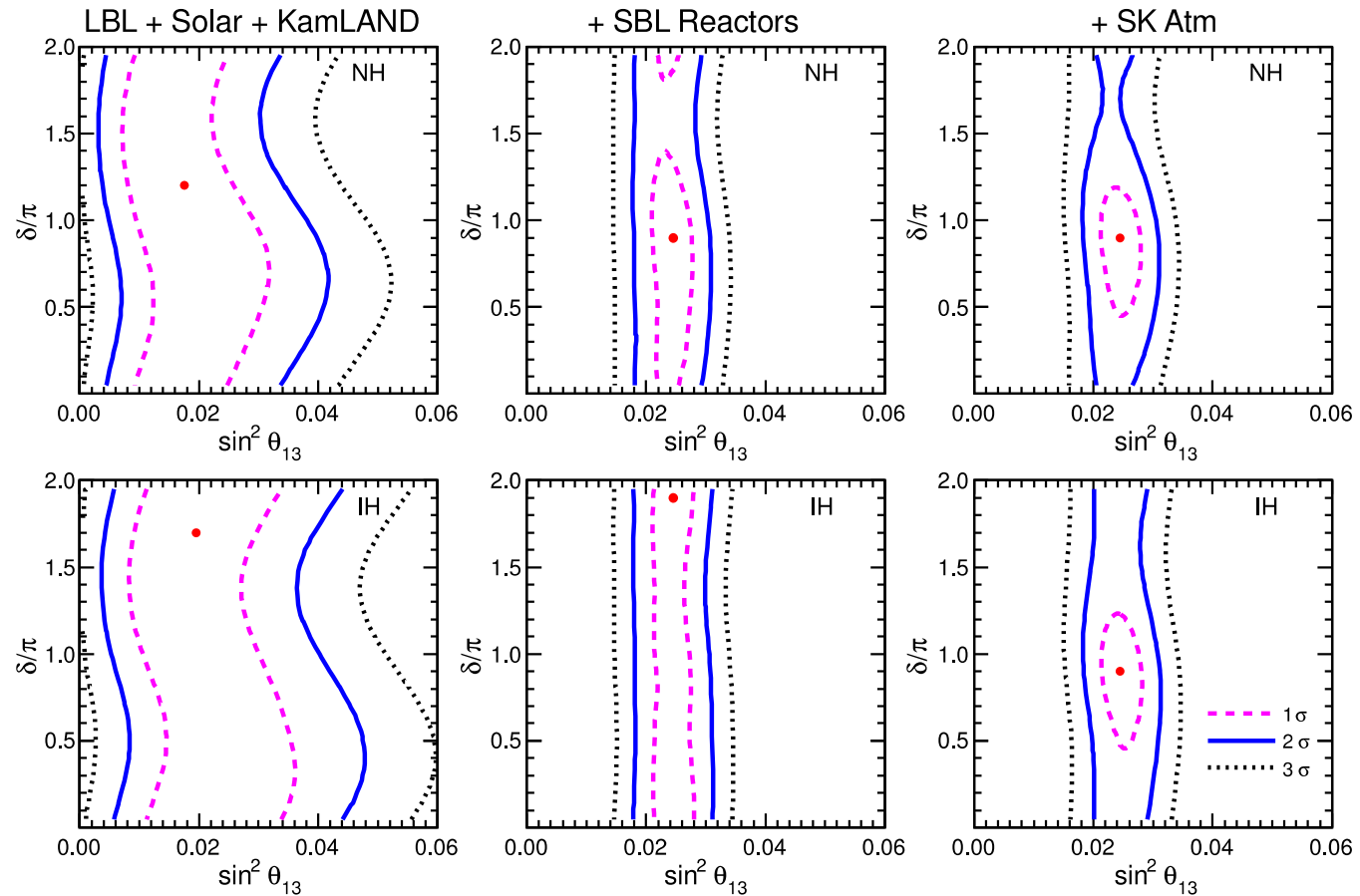


Note: overall goodness of fit very similar in NH and IH. No hint about hierarchy yet...

# Nasza bieżąca wiedza o fizyce oscylacji neutrin

normal hierarchy

inverted hierarchy



We find a  $\sim 1\sigma$  preference for  $\theta \sim \pi$  as in the early analysis of [hep-ph/0506083](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0506083).

## Sensitivity to oscillations

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left( \frac{1.27 \Delta m^2 L}{E_\nu} \right)$$

	$E_\nu$ (MeV)	$L$ (m)	$\Delta m^2$ (eV <sup>2</sup> )
Supernovae	<100	>10 <sup>19</sup>	10 <sup>-19</sup> - 10 <sup>-20</sup>
Solar	<14	10 <sup>11</sup>	10 <sup>-10</sup>
Atmospheric	>100	10 <sup>4</sup> - 10 <sup>7</sup>	10 <sup>-4</sup>
Reactor	<10	<10 <sup>6</sup>	10 <sup>-5</sup>
Accelerator with short baseline	>100	10 <sup>3</sup>	10 <sup>-1</sup>
Accelerator with long baseline	>100	<10 <sup>6</sup>	10 <sup>-3</sup>

The  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  appearance probability can be written using MNS matrix element as [18]

$$\begin{aligned}
P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = & 4C_{13}^2 S_{13}^2 S_{23}^2 \sin^2 \Phi_{31} \\
& + 8C_{13}^2 S_{12} S_{13} S_{23} (C_{12} C_{23} \cos \delta - S_{12} S_{13} S_{23}) \cos \Phi_{32} \cdot \sin \Phi_{31} \cdot \sin \Phi_{21} \\
& - 8C_{13}^2 C_{12} C_{23} S_{12} S_{13} S_{23} \sin \delta \sin \Phi_{32} \cdot \sin \Phi_{31} \cdot \sin \Phi_{21} \\
& + 4S_{12}^2 C_{13}^2 (C_{12}^2 C_{23}^2 + S_{12}^2 S_{23}^2 S_{13}^2 - 2C_{12} C_{23} S_{12} S_{23} S_{13} \cos \delta) \sin^2 \Phi_{21} \\
& - 8C_{13}^2 S_{13}^2 S_{23}^2 (1 - 2S_{13}^2) \frac{aL}{4E_\nu} \cos \Phi_{32} \sin \Phi_{31}. \tag{14}
\end{aligned}$$

The first term has the largest contribution. The second  $\cos \delta$  term is generated by the CP phase  $\delta$  but is CP conserving. The third  $\sin \delta$  term violates CP. The fourth term, which is the solar neutrino term, is suppressed by  $\sin^2 \frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E_\nu}$ . The matter effect is characterized by

$$a = 2\sqrt{2}G_F n_e E_\nu = 7.6 \times 10^{-5} \rho [g/cm^3] E_\nu [GeV] \quad [eV^2], \tag{15}$$

where  $G_F$  is the Fermi constant,  $n_e$  is the electron density and  $\rho$  is the earth density. The probability  $P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)$  is obtained by the replacing  $a \rightarrow -a$  and  $\delta \rightarrow -\delta$  in eq. (14). As seen in eq. (15) the matter effect is proportional to neutrino energy, so the lower the energy, the smaller the effect is. The CP asymmetry in the absence of the matter effect is calculated as

$$A_{CP} = \frac{P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) - P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)}{P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) + P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)} \simeq \frac{\Delta m_{12}^2 L}{4E_\nu} \cdot \frac{\sin 2\theta_{12}}{\sin \theta_{13}} \cdot \sin \delta \tag{16}$$

Because  $\theta_{13}$  is small, the CP asymmetry can be large, especially for small  $E_\nu$ .