

# Konferencja NEUTRINO 2012



Justyna Łagoda

NCBJ

# 25. International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics

- najważniejsza z konferencji dotyczących neutrin
- program:
  - Neutrina reaktorowe
  - Neutrina słoneczne i geoneutrina
  - Neutrina atmosferyczne i akceleratorowe
  - Prędkość neutrin
  - Kosmologia i astrofizyka
  - Anomalie – neutrino sterylne?
  - Podwójny bezneutrinowy rozpad beta i pomiary mas neutrin
  - Wiązki i detektory dla przyszłych eksperymentów
  - Ciemna materia
  - Pomiary przekrojów czynnych
  - Pomiary produkcji hadronów
  - Prezentacje teoretyczne



# Jeszcze o konferencji

- 623 uczestników
- 64 prezentacje (24: Europa, 23: USA+Kanada, 17: Azja)
- 261 plakatów
- bogaty program „poboczny”
  - Przyjęcie powitalne i krótki koncert – 4.06
  - Bankiet w miasteczku filmowym – 6.06
  - Wycieczki (dzień wolny) – 7.06
  - Występ gejsz i wykład publiczny – 7.06



Justyna Łagoda, NCBJ





# Neutrino reaktorowe

2011/2012 - The year of  $\theta_{13}$

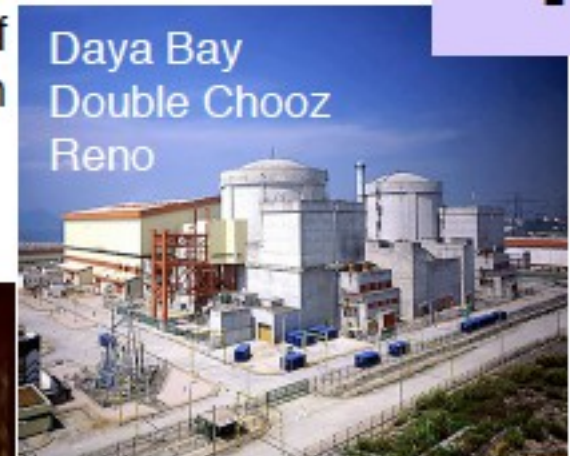
2008 - Precision measurement of  $\Delta m_{12}^2$ . Evidence for oscillation

2003 - First observation of reactor antineutrino disappearance

1995 - Nobel Prize to Fred Reines

1980s & 1990s - Reactor neutrino flux measurements in U.S. and Europe

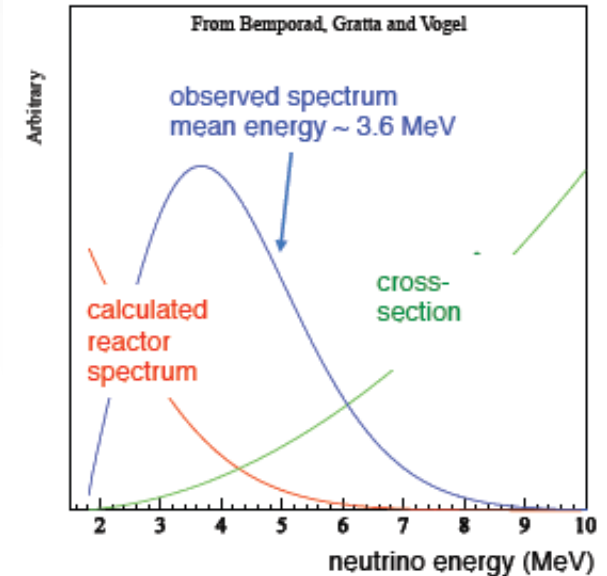
1956 - First observation of (anti)neutrinos



Karsten M. Heeger  
University of Wisconsin

# ○ neutrinach reaktorowych

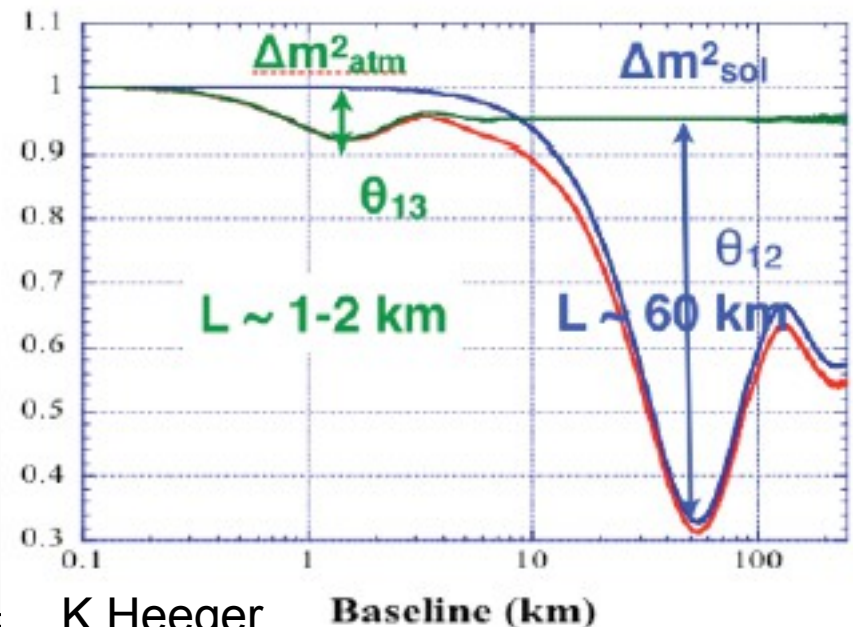
- antyneutrino elektronowe
- powstają w rozpadach produktów rozszczepienia uranu i plutonu (średnio 6 rozpadów beta na rozszczepienie), ok.  $2 \cdot 10^{20}$  neutrin/GW s
- ewolucja strumienia w czasie (wskutek zmiany składu izotopowego rdzenia reaktora) → możliwość monitorowania pracy reaktorów
- energie rzędu MeV
- oscylacje – tylko pomiary zanikania (*disappearance*)



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

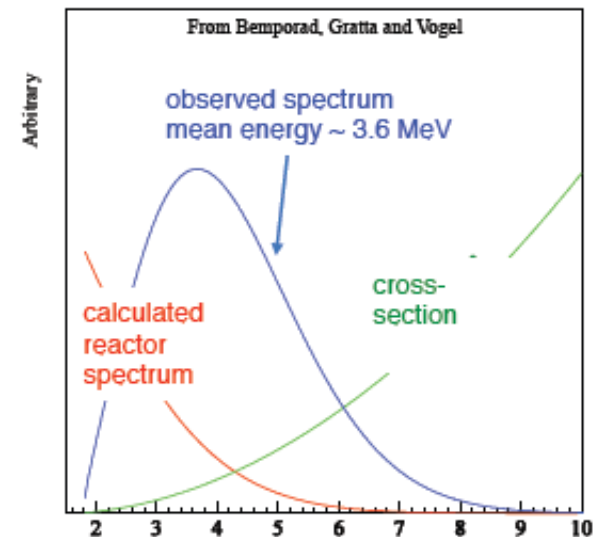
$$P_{ee} = 1 - \sin^2 \theta_{12} \sin^2 2\theta_{13} \sin^2\left(\frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E_\nu}\right) - \cos^2 \theta_{12} \sin^2 2\theta_{13} \sin^2\left(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E_\nu}\right) - \cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{12} \sin^2\left(\frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E_\nu}\right)$$

–  $\sin^2 2\theta_{12}$  (1-2%), hierarchia mas



# ○ neutrinach reaktorowych

- antyneutrino elektronowe
- powstają w rozpadach produktów rozszczepienia uranu i plutonu (średnio 6 rozpadów beta na rozszczepienie), ok.  $2 \cdot 10^{20}$  neutrin/GW s
- ewolucja strumienia w czasie (wskutek zmiany składu izotopowego rdzenia reaktora) → możliwość monitorowania pracy reaktorów
- energie rzędu MeV
- oscylacje – tylko pomiary zanikania (*disappearance*)

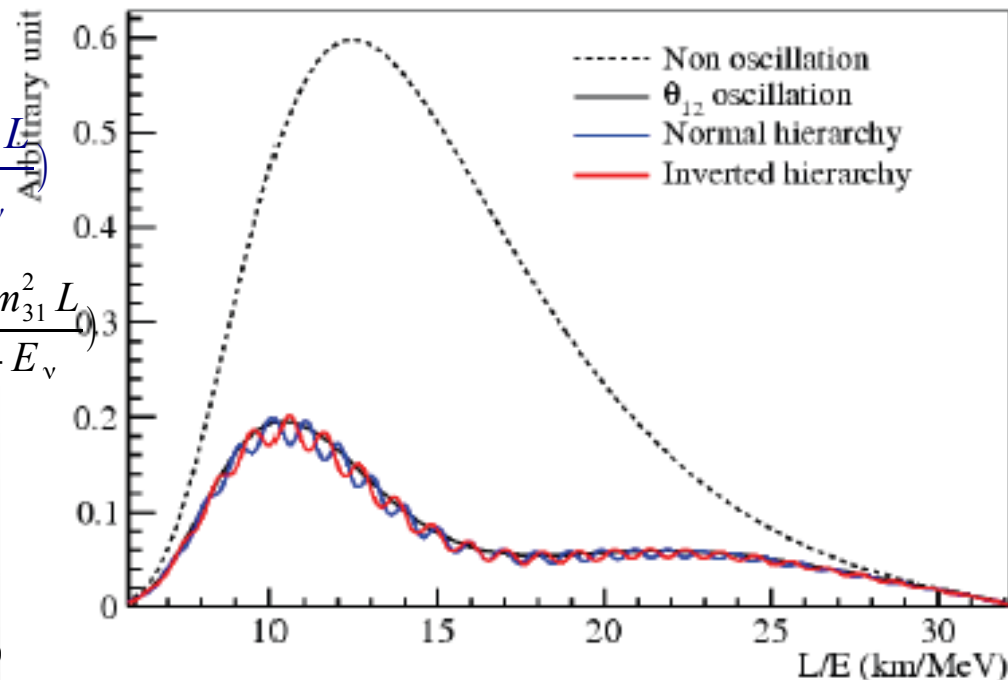


$$P_{ee} = 1 - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2\left(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E_\nu}\right) - \cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{12} \sin^2\left(\frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E_\nu}\right)$$

$$P_{ee} = 1 - \sin^2 \theta_{12} \sin^2 2\theta_{13} \sin^2\left(\frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E_\nu}\right) - \cos^2 \theta_{12} \sin^2 2\theta_{13} \sin^2\left(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E_\nu}\right)$$

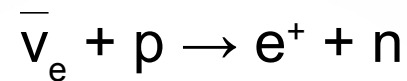
$$- \cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{12} \sin^2\left(\frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E_\nu}\right)$$

–  $\sin^2 2\theta_{12}$  (1-2%), hierarchia mas



# Eksperymenty mierzące $\theta_{13}$

- metoda detekcji – odwrotny rozpad beta



- ciekły scyntylator z dodatkiem gadolinu (do wychwytu neutronów)
  - sygnał: koincydencja 12MeV+8MeV w czasie 28-30 $\mu$ s
  - tło: koincydencje przypadkowe, szybkie neutrony (rozproszenie i wychwyty), rozpad beta-n litu 9 i helu 8 (produkowanych przez miony kosmiczne w procesie spallacji)

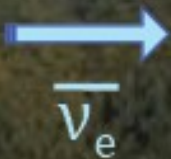
	Double Chooz	RENO	Daya Bay
reaktory	2 (po 4.27GW)	6 (w linii prostej)	2+4 (razem 17.4 GW)
detektory	1(+1 w 2013)	1+1	3+3
masa (target)	8.2t (+8.2t)	2*16.5t	120t (razem)
Okres zbierania danych	227.9 dni (pierwszy wynik po 96.8 dniach)	228 dni (11.08.2011-25.03.2012)	24.12.2011-11.05.2012 (pierwszy wynik – do 17.02)
Liczba przypadków	8249	154088 w bliskim, 17102 w dalekim	po ok. 70000 w bliskich, 10000 w dalekich
Odległości	(400m)	290m	363-481-526m
	1050m	1380m	1615-1985m



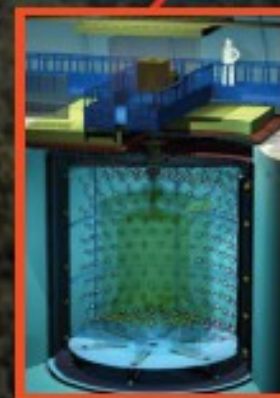
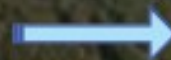
# Double Chooz

Pierwszy wynik: listopad 2011  
wskazanie na niezerowy  $\theta_{13}$  (94% CL)  
w połączeniu z T2K i MINOSem:  $3\sigma$

Francja,  
Ardeny



Near Detector  
L = 400m  
10m<sup>3</sup> target  
120m.w.e.  
2013 ~



Far Detector  
L = 1050m  
10m<sup>3</sup> target  
300m.w.e.  
April 2011 ~

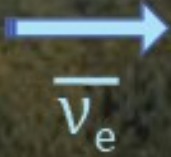
Chooz Reactors  
4.27GW<sub>th</sub> x 2 cores



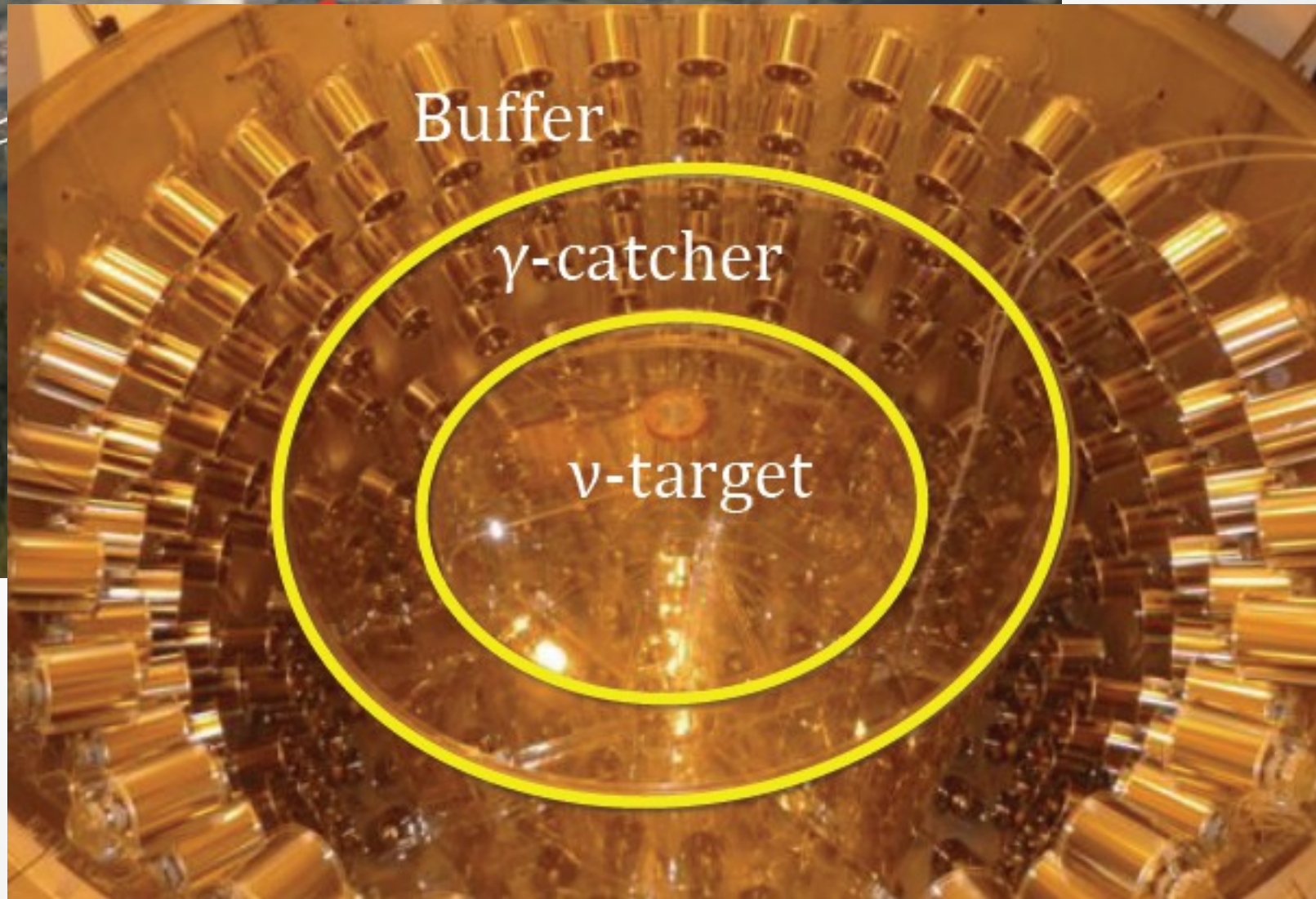
# Double Chooz

Pierwszy wynik: listopad 2011  
wskazanie na niezerowy  $\theta_{13}$  (94% CL)  
w połączeniu z T2K i MINOSem:  $3\sigma$

Francja,  
Ardeny



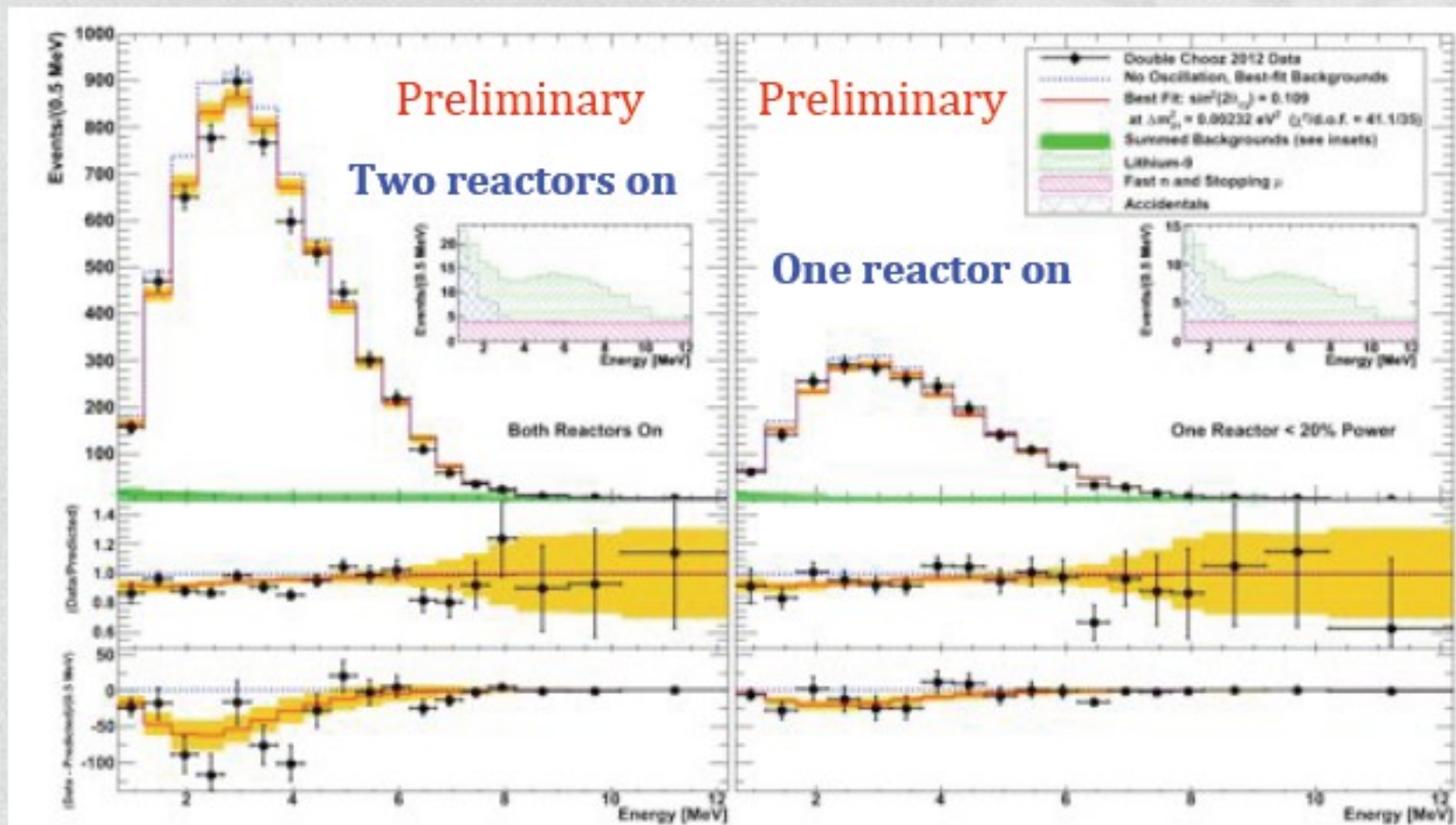
Chooz Reactors  
 $4.27\text{GW}_{\text{th}} \times 2$  cores



M.Ishitsuka



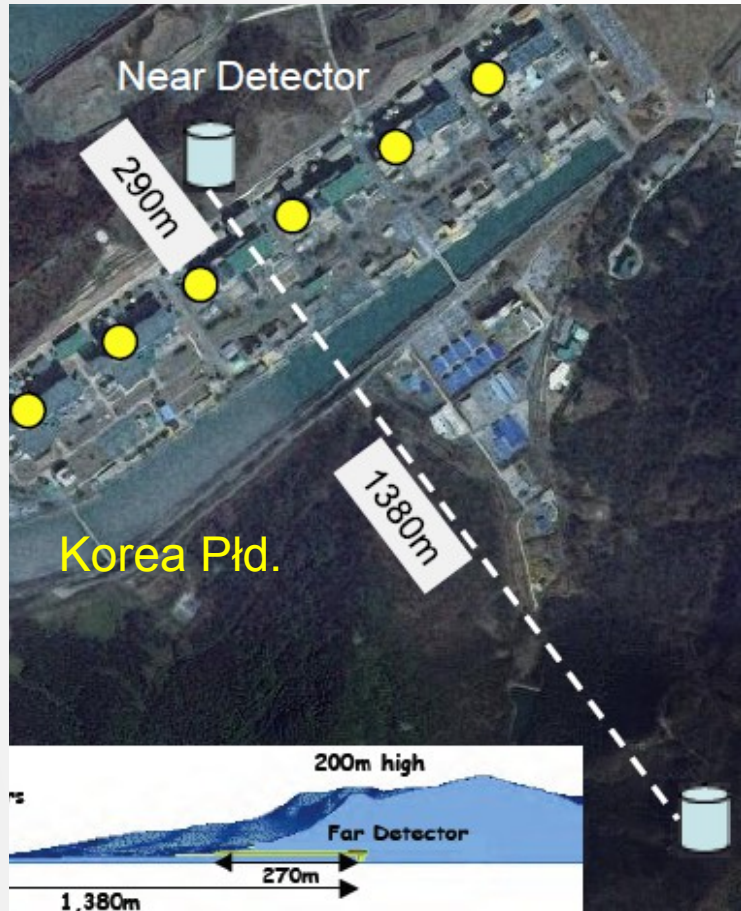
# Double Chooz new results



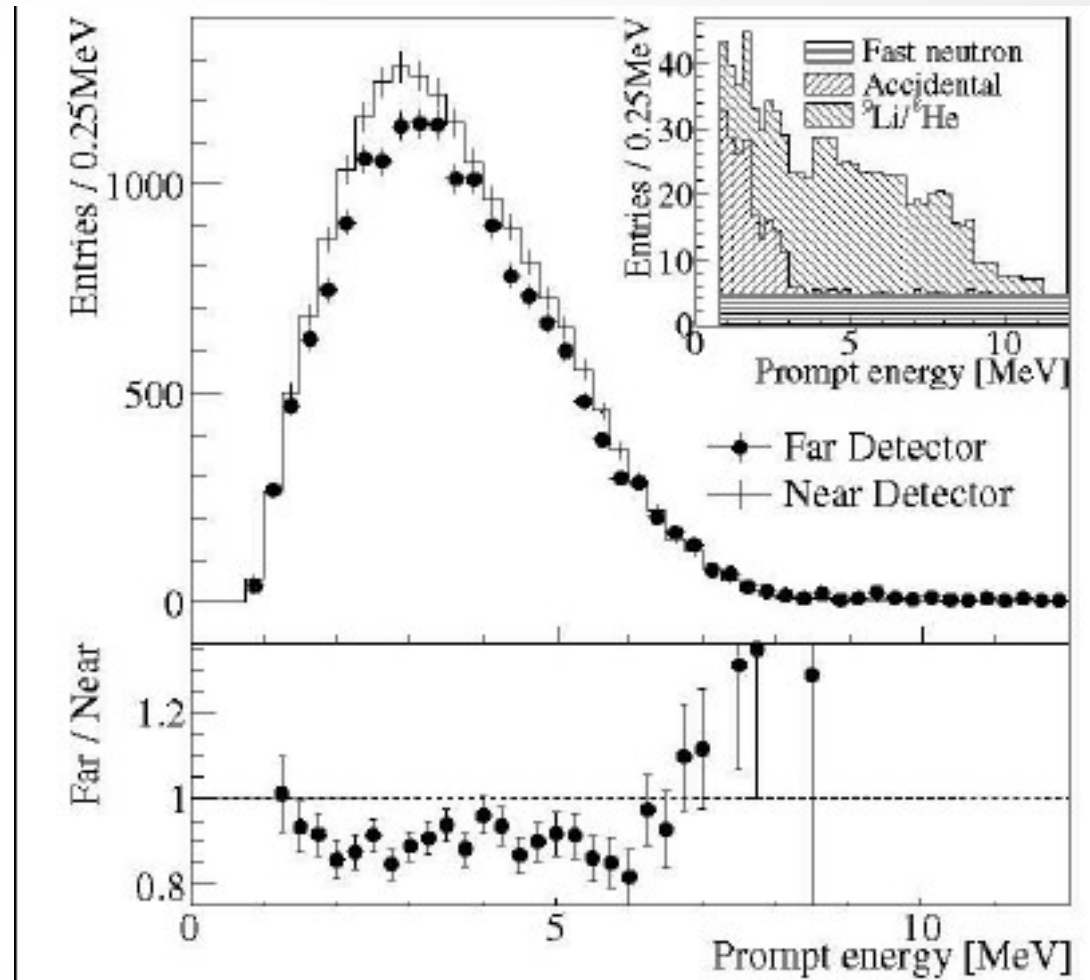
**Rate only:**  $\sin^2 2\theta_{13} = 0.170 \pm 0.035(\text{stat}) \pm 0.040(\text{syst})$   
**Rate+Shape:**  $\sin^2 2\theta_{13} = 0.109 \pm 0.030(\text{stat}) \pm 0.025(\text{syst})$   
 $\chi^2/\text{dof} = 41.13/35$

$\sin^2 2\theta_{13} = 0$  is excluded at 99.9% ( $3.1\sigma$ ) (frequentist study)

# RENO



wynik opublikowany 2 kwietnia



$$R = \frac{\Phi_{\text{observed}}^{\text{Far}}}{\Phi_{\text{expected}}^{\text{Far}}} = 0.920 \pm 0.009(\text{stat}) \pm 0.014(\text{syst})$$

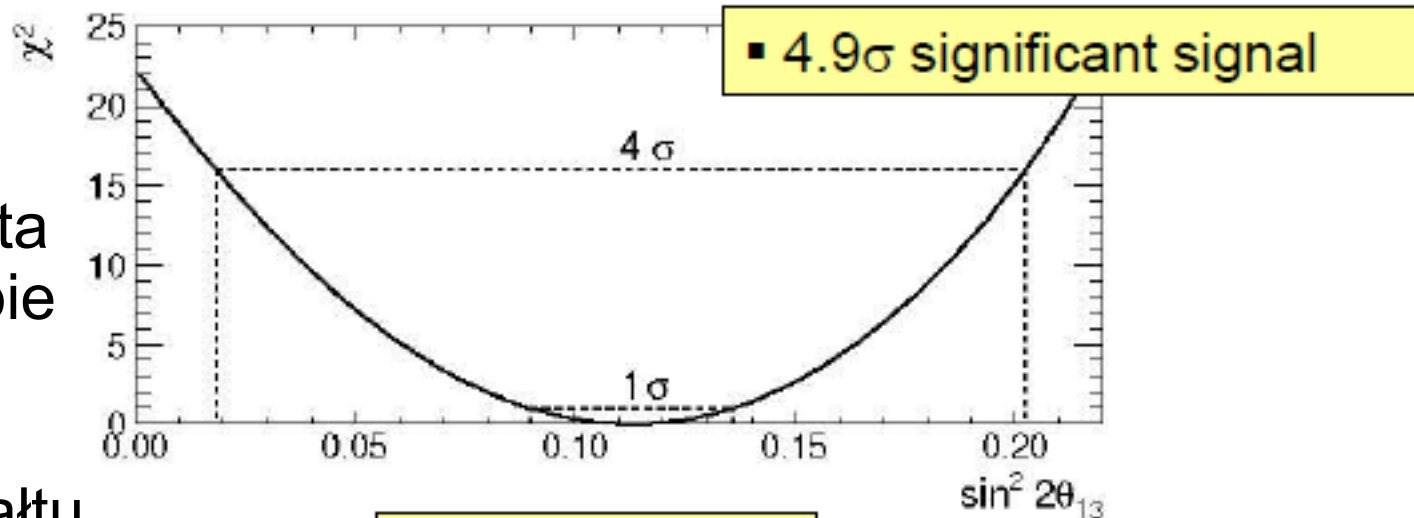
S-B.Kim



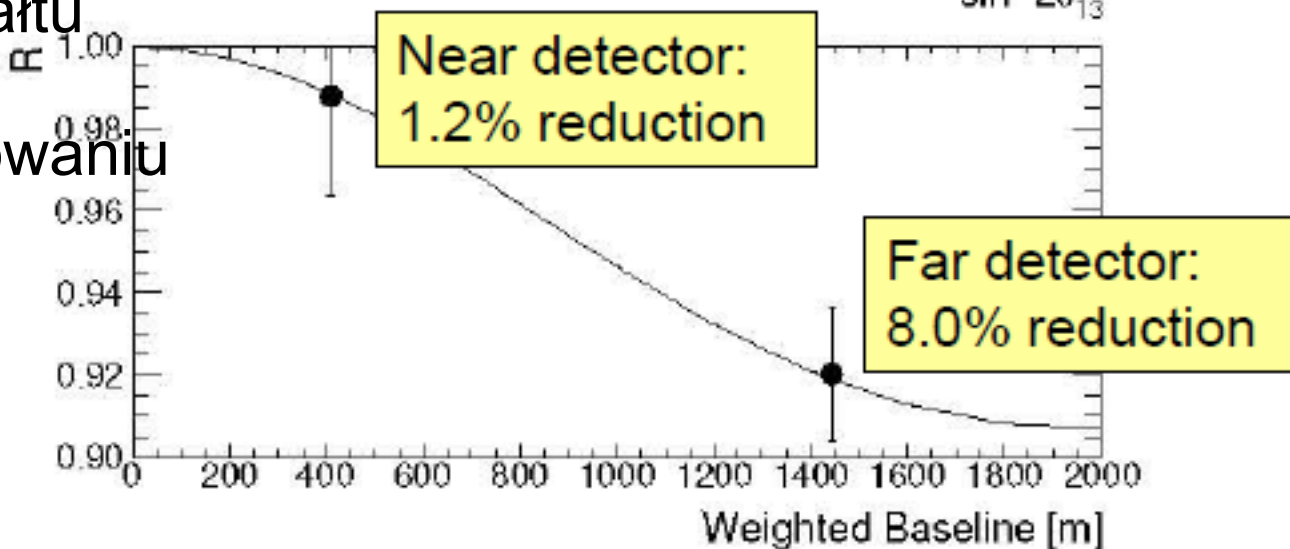
# Definitive Measurement of $\theta_{13}$

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

Analiza oparta  
tylko na liczbie  
przypadków

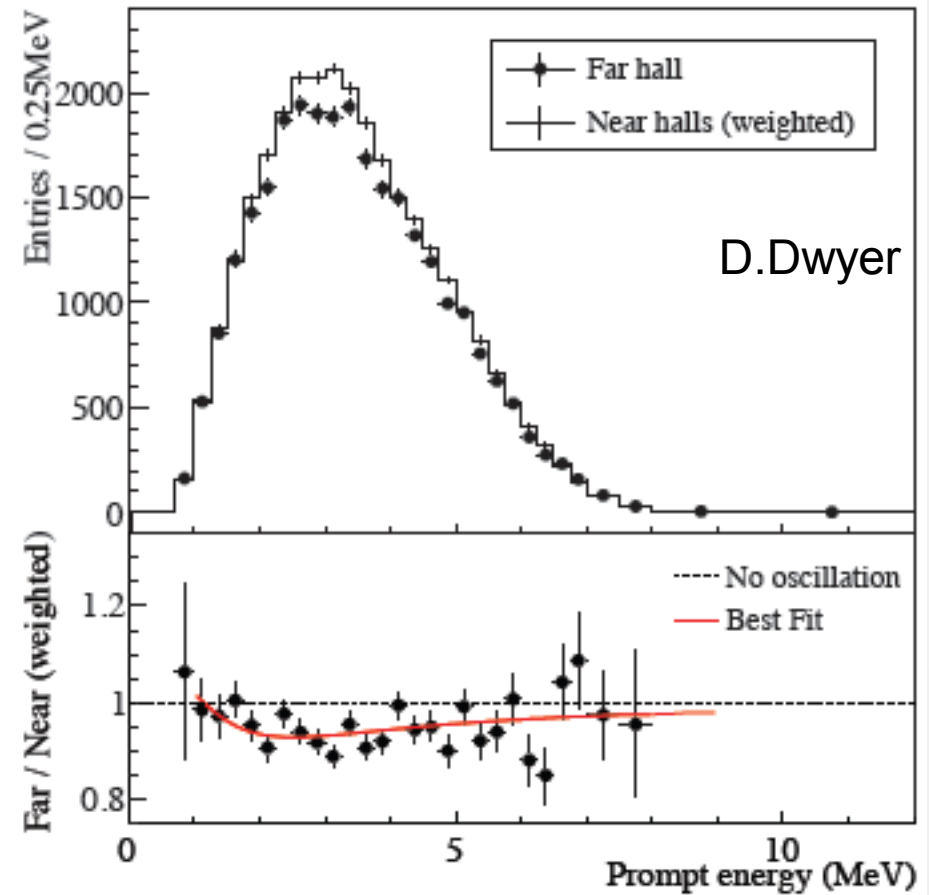
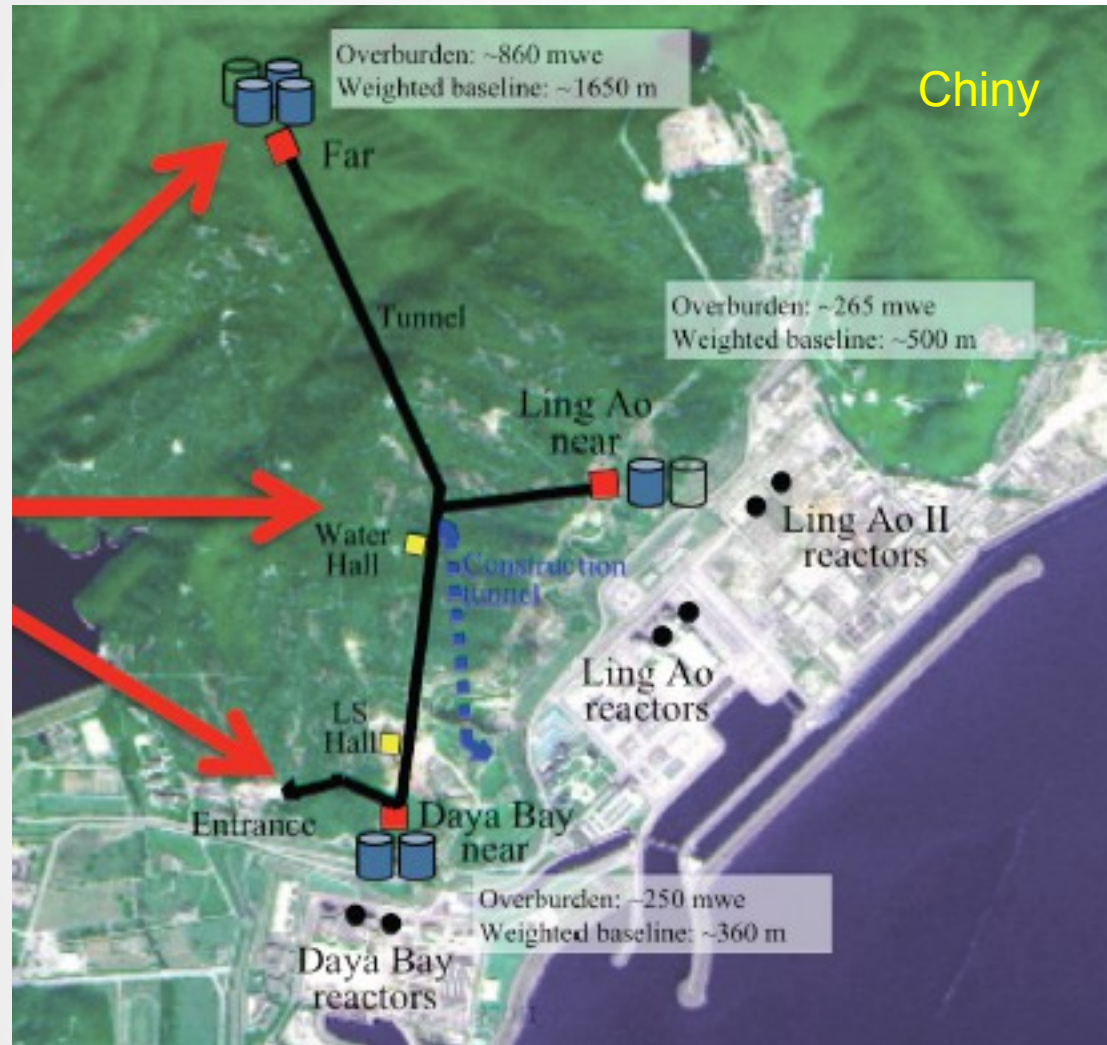


Analiza kształtu  
widma  
– w przygotowaniu



S-B.Kim

# Daya Bay



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

Spectral distortion consistent with oscillation.\*

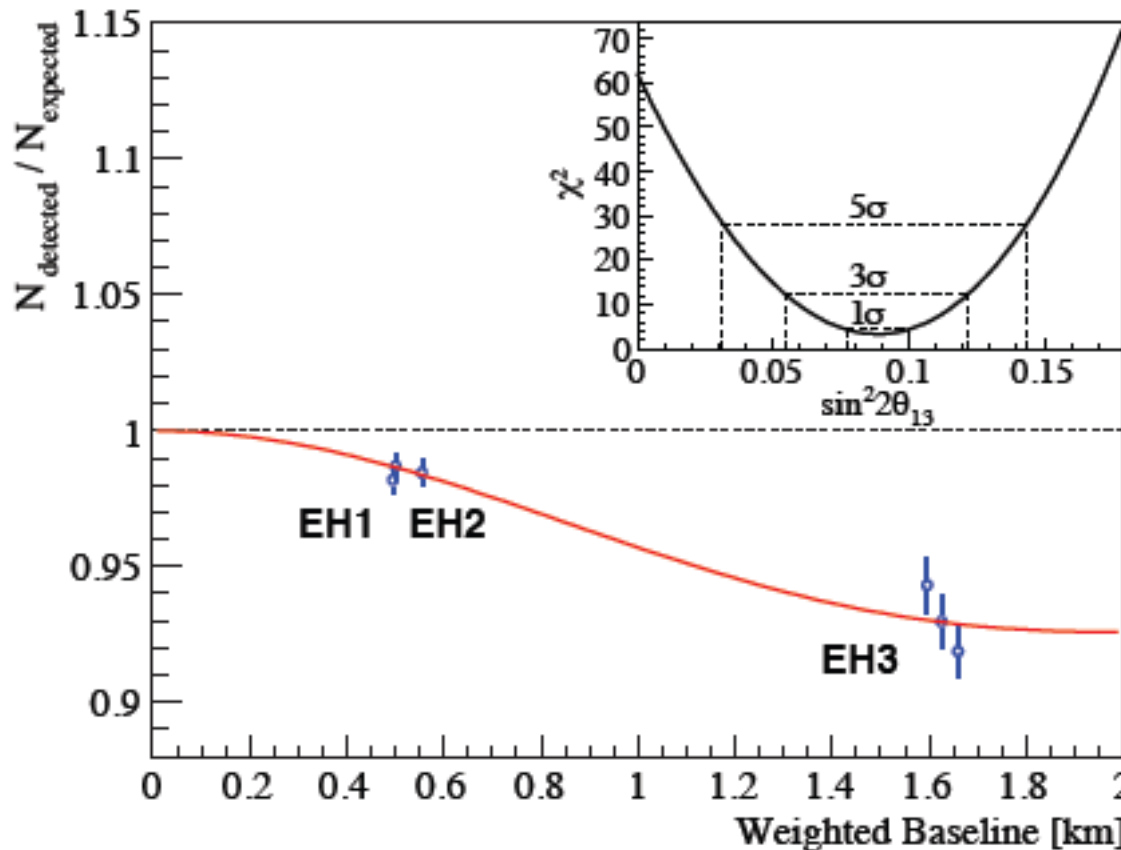
\* Caveat: Spectral systematics not fully studied;  
 $\theta_{13}$  value from shape analysis is not recommended.

seminarium 25.05.2012 – P.Przewłocki  
 na konferencji – ponad 2.5 raza więcej danych

Justyna Łagoda,

# Rate Analysis

Estimate  $\theta_{13}$  using measured rates in each detector.



Uses standard  $\chi^2$  approach.

Far vs. near relative measurement.  
[Absolute rate is not constrained.]

Consistent results obtained by independent analyses, different reactor flux models.

**Most precise measurement of  $\sin^2 2\theta_{13}$  to date.**

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



# Zastosowania praktyczne



Applied Antineutrino Physics

	Option	Description
(1)	<b>Detecting reactor ON/OFF</b>	- Watch hidden operation of reactor. - Watch stopping operation to remove Pu.
(2)	<b>Real time measurement of operation power.</b>	- Independent and non-intruding monitor. - Cross check the operation record.
(3)	<b>Pu measurement in reactor fuel.</b>	- Watch the removal of Pu.
(3)'	<b>Real time burn-up measurement.</b>	- Measure Pu amount in running fuel. - Initial component of new fuel.
(4)	<b>Detect hidden reactor and measure the distance.</b>	- Application of neutrino oscillation ↓
(5)	<b>Detect nuclear explosion</b>	Locate nuclear test and measure power.
(6)	<b>Deterrence</b>	Existence of neutrino detector near by will restrain undeclared operation.

$$n_{\nu}[\text{dzień}] \approx 5000 \frac{P[\text{GW}] M[\text{tona}]}{(L[10\text{m}])^2}$$

F.Suekane



# Zastosowania praktyczne

	Option	Description
(1)	<b>Detecting reactor ON/OFF</b>	<p>Sprawdzone dla detektora 0.64t (scyntylator+gadolin) odległość <b>25m</b> od rdzenia (SONGS1, San Onofre, USA)</p>
(2)	<b>Real time measurement of operation power.</b>	
(3)	<b>Pu measurement in reactor fuel.</b>	
(3)'	<b>Real time burn-up measurement.</b>	
(4)	<b>Detect hidden reactor and measure the distance.</b>	<b>- Application of neutrino oscillation</b>
(5)	<b>Detect nuclear explosion</b>	<b>Locate nuclear test and measure power.</b>
(6)	<b>Deterrence</b>	<b>Existence of neutrino detector near by will restrain undeclared operation.</b>

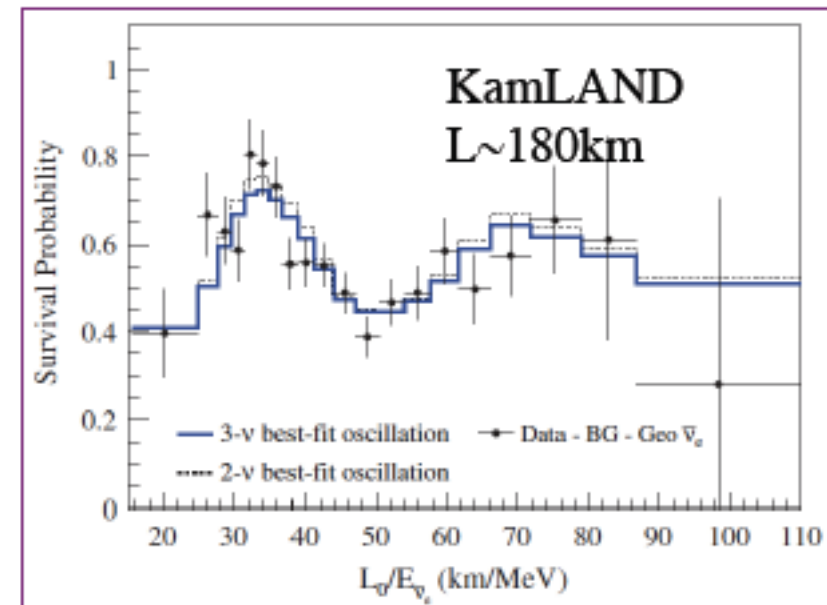
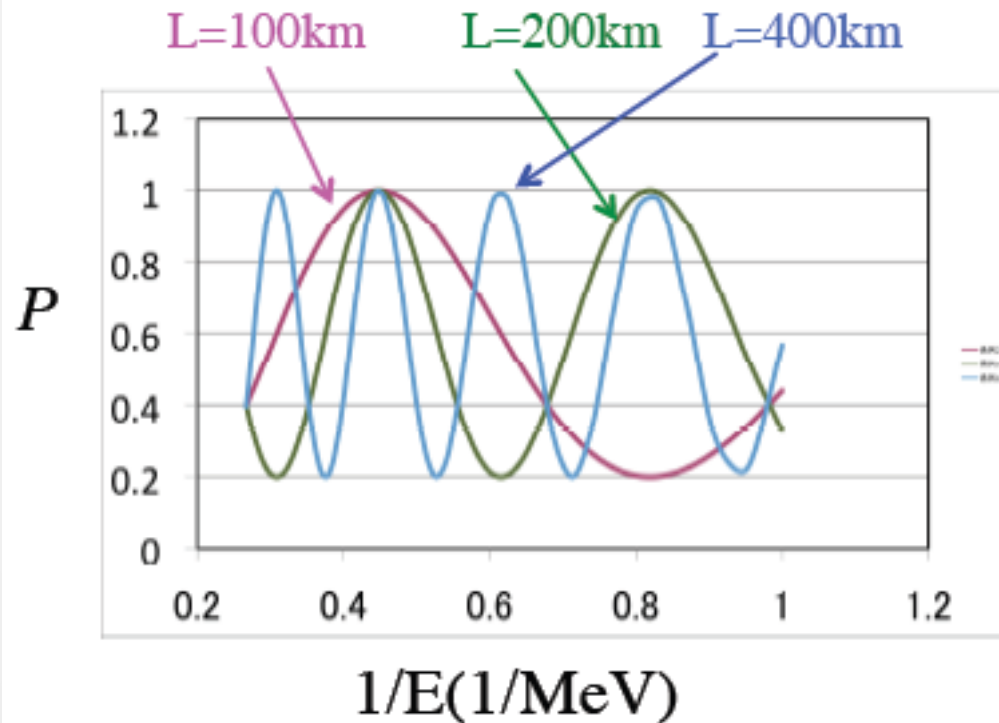
$$n_{\nu}[\text{dzień}] \approx 5000 \frac{P[\text{GW}] M[\text{tona}]}{(L[10\text{m}])^2}$$

F.Suekane

# Wykrywanie reaktorów

In principle distance to reactor or explosion center can be measured from energy spectrum distortion due to neutrino oscillation.

$$P(E) = 1 - \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 \left( \Delta m_{12}^2 \frac{L}{4E} \right)$$



And  $N_\nu \times L^2$  indicates power at the origin



# Wykrywanie próbnych wybuchów?

$$n_v \approx 10^{-3} \frac{P[kt] M[tona]}{(L[100km])^2}$$

W detektorze KamLAND  
próbny wybuch  
jądrowy w Korei  
Północnej (4 kilotony)  
dałby sygnał...

$10^{-5}$  przypadków



To detect 10kt nuclear test in NK,  
hundreds kt of detector will be n  
ecessary even if it is located  
at a boarder of Russia and NK.

# World's R&D efforts

(from 2011 IAEA workshop report)

Country	Name	Reactor	
Brasil	Angra	Angra-II	H <sub>2</sub> O+Gd
China		DayaBay	
Canada		Pt.Lepreu	CANDU /with US
France	Nucifer	Osiris	LS, Simulation
Italy			Plastic
Netherland/ SouthAfrica			Novel detection materials
Japan	KASKA PANDA	Joyo Ohi	LS ( R&D for $\nu$ oscillation exp.) Plastic
Russia	DANSS	KNPP	Plastic
Taiwan			Coherent scattering
UK	Mars		Plastic, <sup>6</sup> Li
USA	SONGS	SanOnofre Pt.Lepreu	LS Simulation, Compact

**Keywords: Above grounds, Plastic or LS, or Water, Mobile, . . . . .**

# Neutrina słoneczne

6 czerwca  
przejście  
Wenus  
na tle tarczy  
Słońca

(ostatnie  
w tym stuleciu,  
następne  
dopiero  
11 grudnia  
2117 roku)

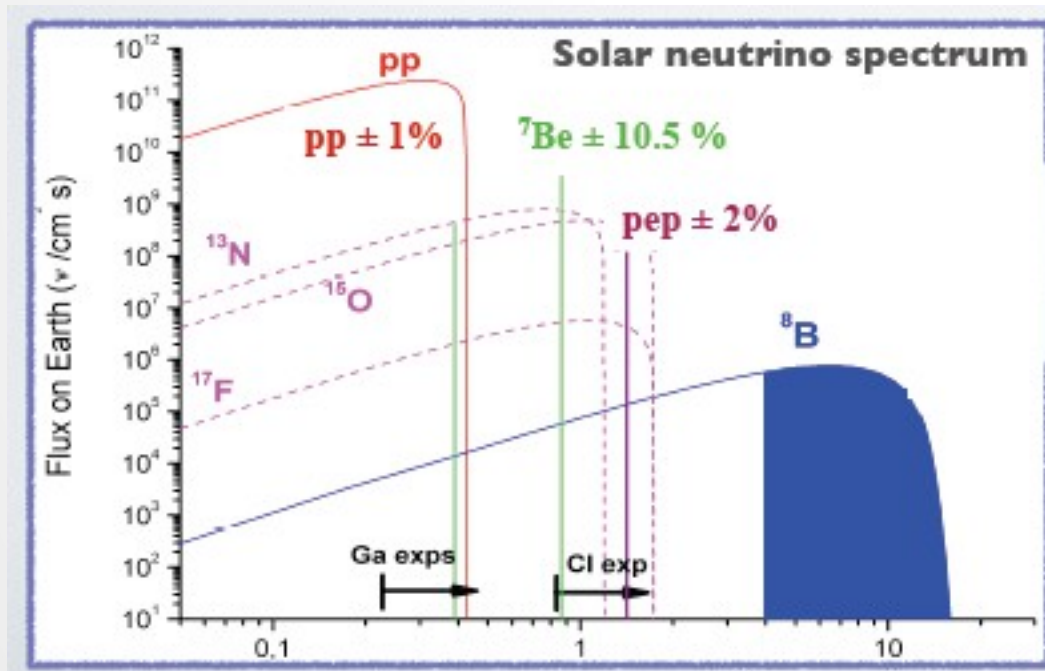
(autor nieznany, zdjęcie przysłane  
przez organizatorów konferencji)



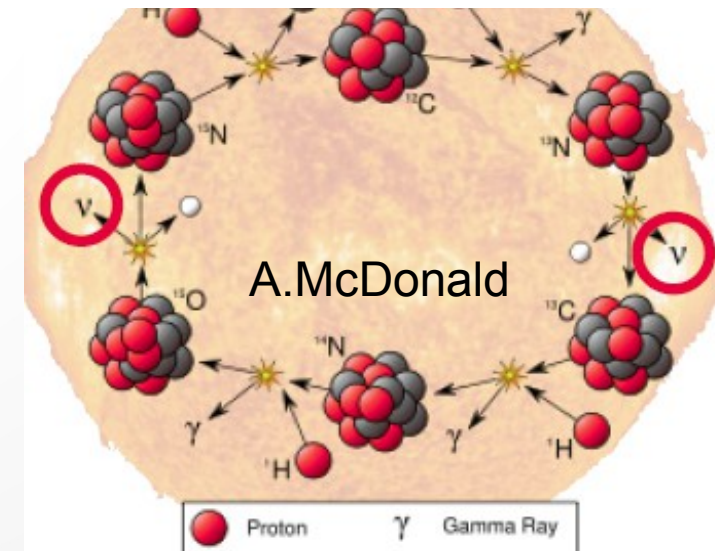
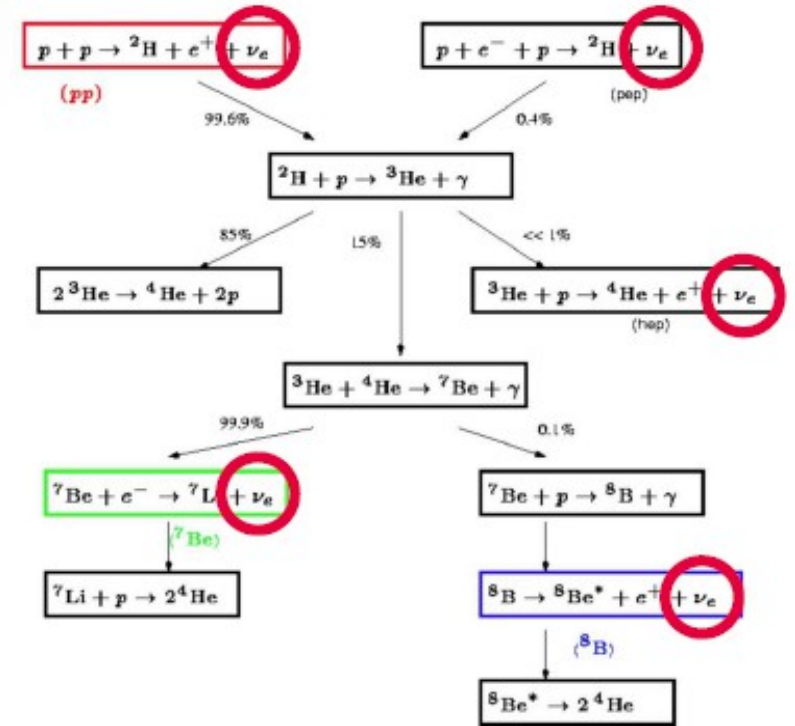


# Neutrina słoneczne

- powstają jako produkt uboczny nukleosyntezy na Słońcu
- deficyt neutrin słonecznych był pierwszym sygnałem, że coś dzieje się z neutrinami podczas propagacji



M.Pallavinci



Justyna Łagoda, NCBJ

# Borexino

- detekcja: rozpraszanie elastyczne na elektronach

$$\nu + e^- \rightarrow \nu + e^-$$

- światło scyntylacyjne wykrywane przez fotopowielacze
  - liczba fotonów  $\rightarrow$  energia przypadku
  - czas przelotu  $\rightarrow$  pozycja przypadku w detektorze
  - kształt impulsu  $\rightarrow$  separacja  $\alpha/\beta$ ,  $\beta^+/\beta^-$  (eliminacja tła od zanieczyszczeń promieniotwórczych)

## ENERGY RESOLUTION

10% @ 200 keV

8% @ 400 keV

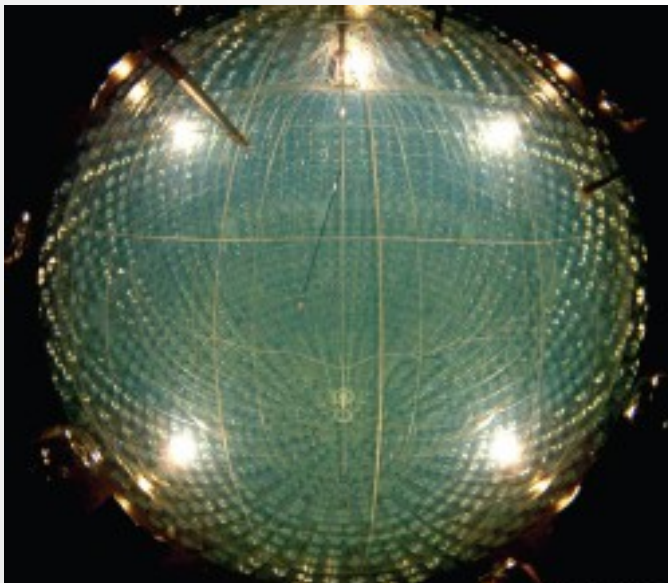
6% @ 1 MeV

## SPATIAL RESOLUTION

35 cm @ 200 keV

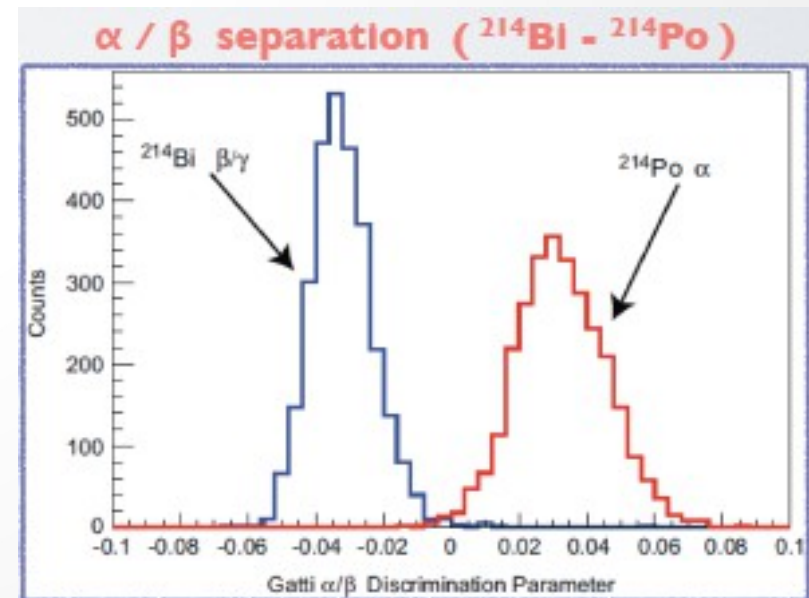
16 cm @ 500 keV

M.Pallavinci



278 ton  
bardzo czystego  
scyntyлятора  
promień 4.35 m

Justyna Łagoda, NCBJ

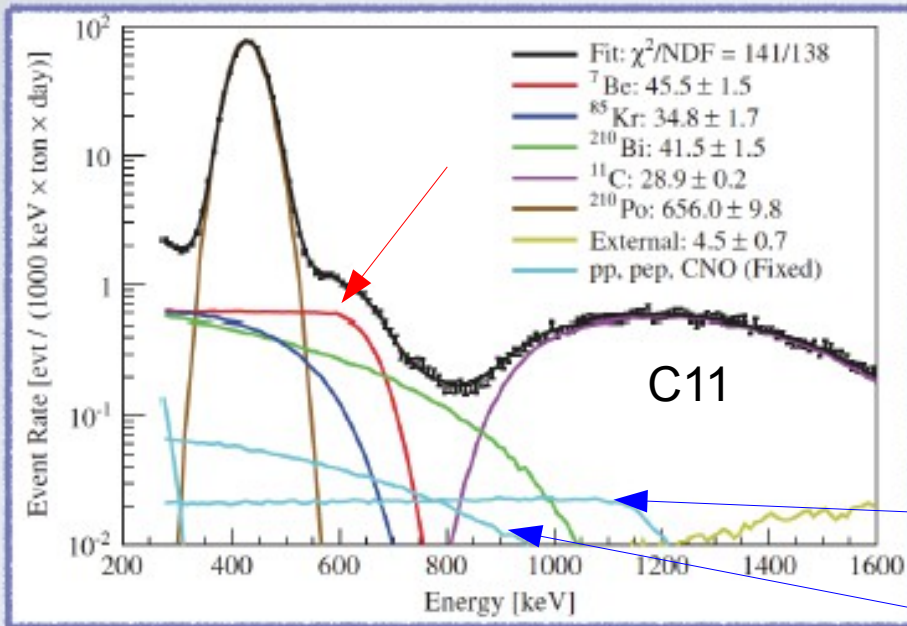




# <sup>7</sup>Be RATE (II)

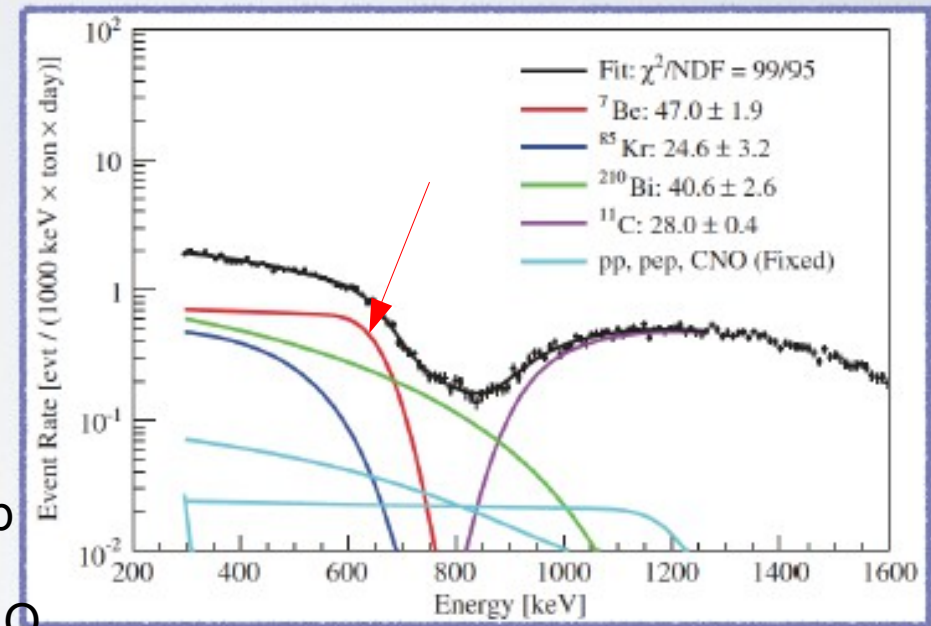
- Two approaches to control systematic errors due to analysis procedure:

Monte Carlo fit to the spectrum,  
no  $\alpha/\beta$  <sup>210</sup>Po peak subtraction



Phys. Rev. Lett. 107, 141302, 2011

Analytical fit to the spectrum,  
after  $\alpha/\beta$  <sup>210</sup>Po peak subtraction



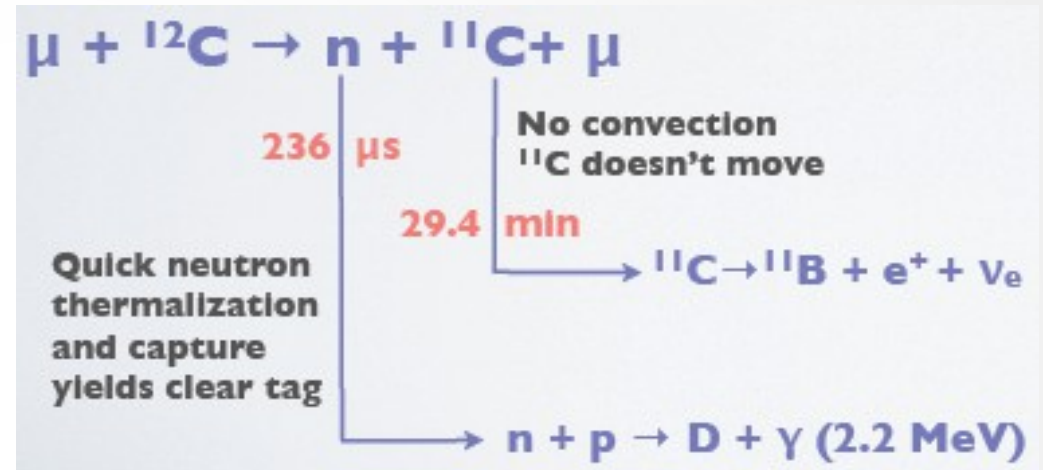
- Very Consistent results, small difference included in sys. uncertainty
- Rate for 100 t target:
  - $46.0 \pm 1.5$  (stat)  $\pm 1.5$  (sys) c d<sup>-1</sup>**

Source	%
Trigger efficiency and stability	< 0.1
Live time	0.04
Scintillator density	0.05
Fiducial volume	+0.5 -1.3
Fit methods	2
Energy response	2.7
Sacrifice of cuts	0.1
<b>Total</b>	<b>+3.4 -3.6</b>

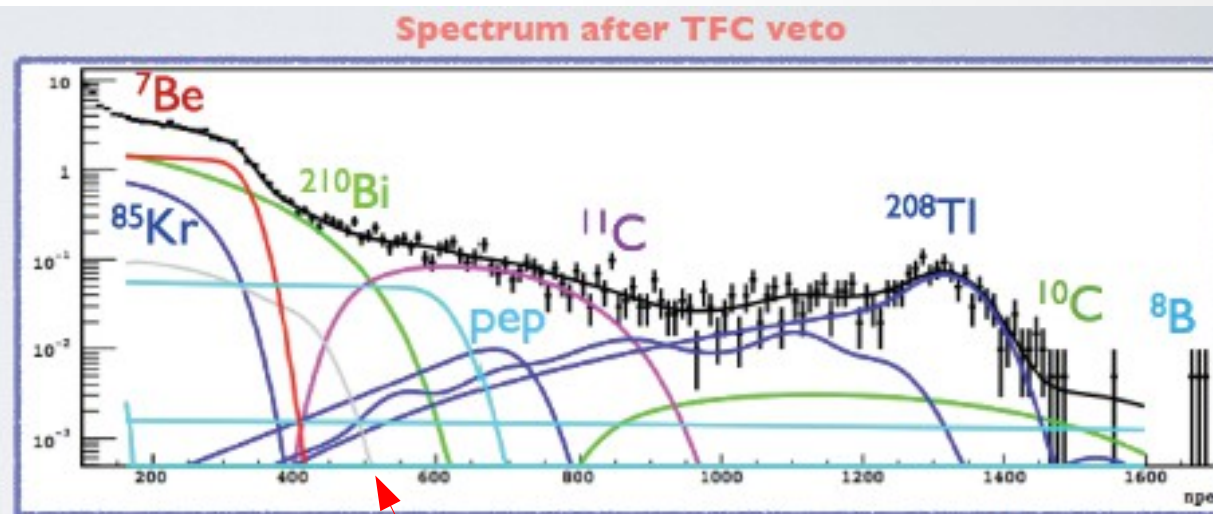
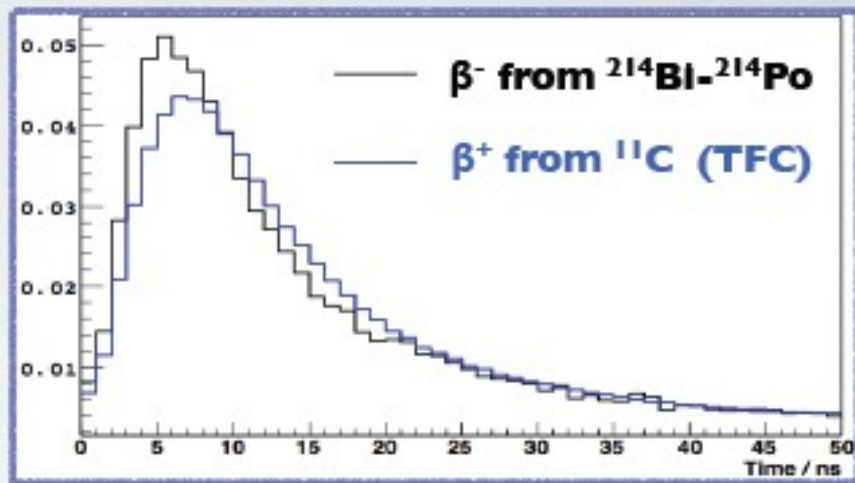


# Wykrycie neutrin pep

- słaby sygnał
- tło od węgla-11
  - koincydencje czasowe (TFC)
  - separacja  $\beta^+/\beta^-$  na podstawie kształtu sygnału



M.Pallavinci

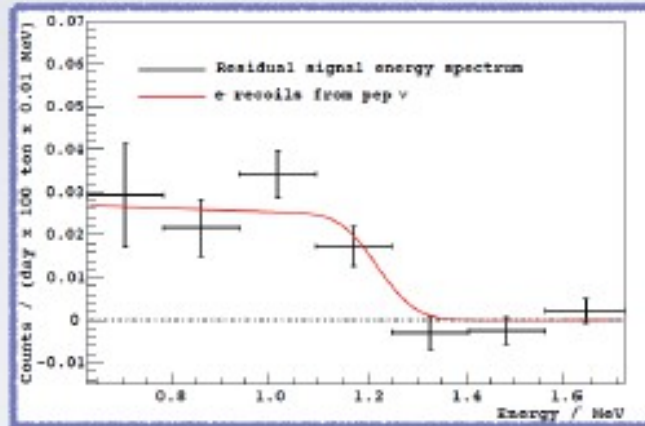


Boosted Decision Tree używane do selekcji

CNO

# FIRST DETECTION OF PEP NEUTRINOS ( $\nu$ )

- Rate:  $3.1 \pm 0.6_{(\text{stat})} \pm 0.3_{(\text{sys})}$  cpd/100 t  
PRL 108, 051302 (2012)



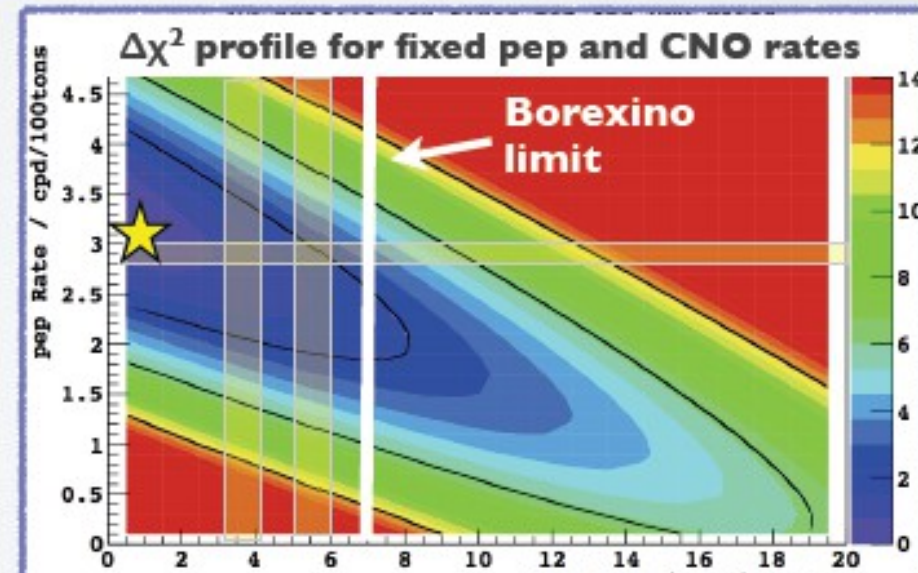
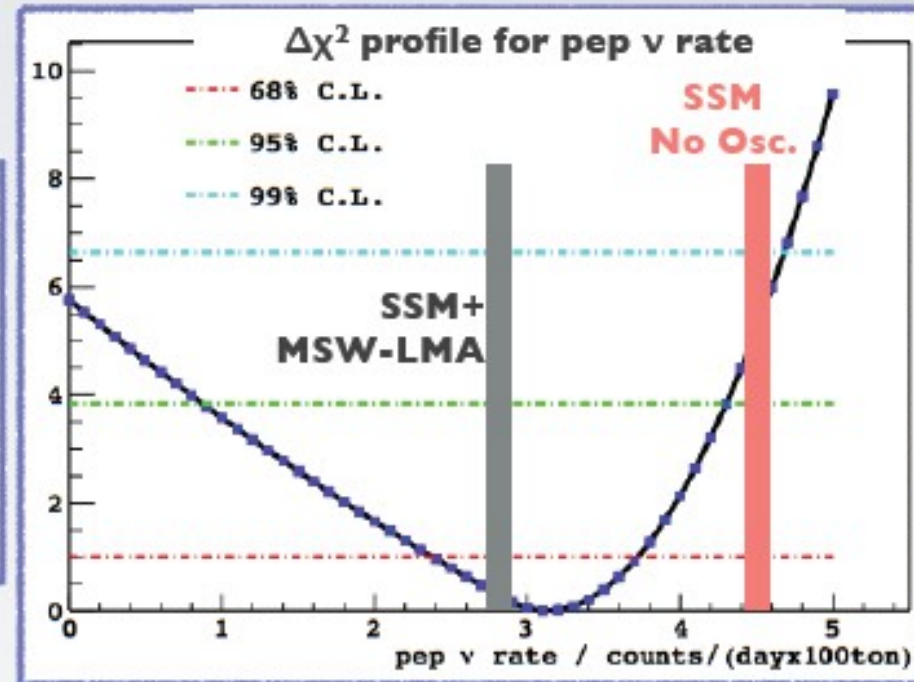
- No oscillations excluded at **97% c.l.**
- Absence of pep solar  $\nu$  excluded at 98%

- Assuming MSW-LMA:

- $\Phi_{\text{pep}} = 1.6 \pm 0.3 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

- CNO limit obtained assuming pep @ SSM

- CNO rate < 7.1 cpd/100 t (95% c.l.)**

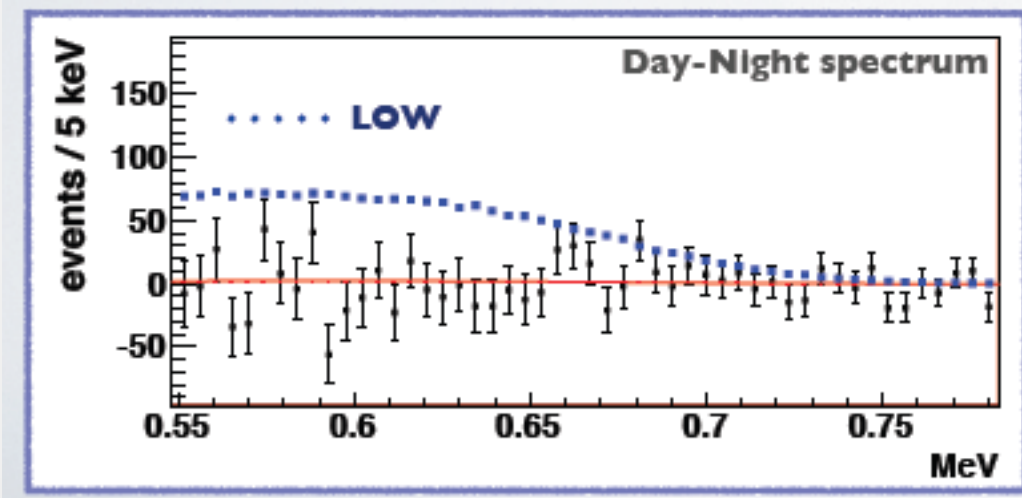


Strumień neutrin CNO jest powiązany z metalicznością Słońca (zawartością pierwiastków cięższych)



# Wyniki Borexino

- pomiar neutrin berylowych (5%)
- wykrycie neutrin pep i limit na neutrina CNO
- brak asymetrii dzień/noc dla neutrin berylowych wyklucza rozwiązanie LOW

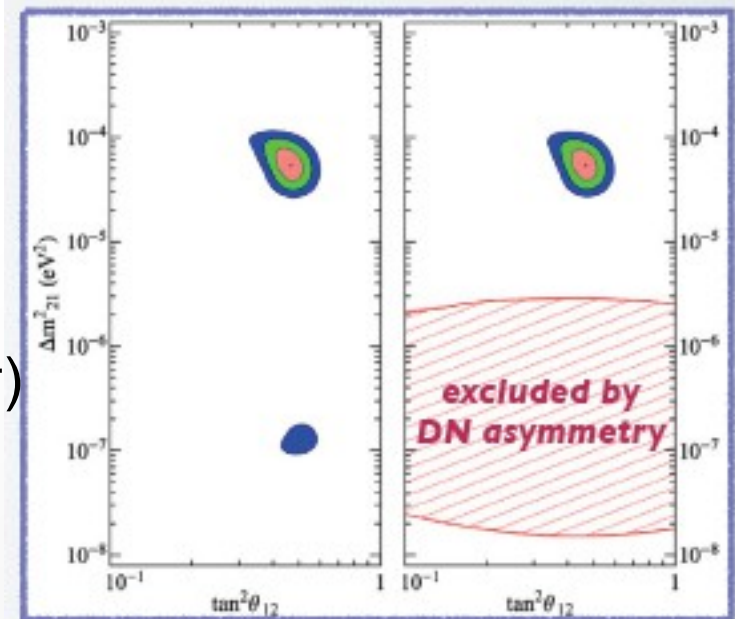
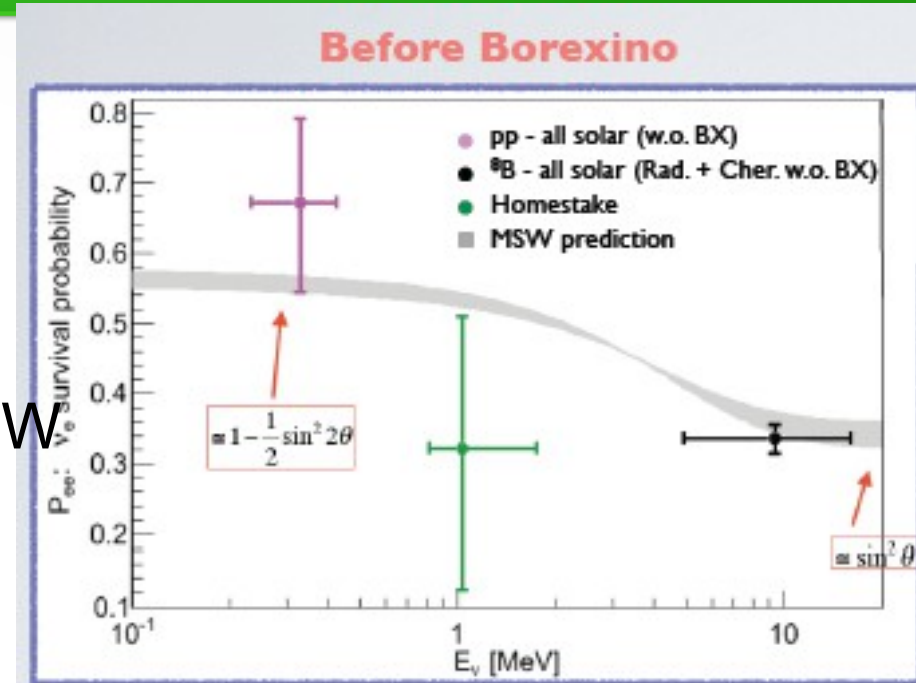


Super-K również zmierzyło asymetrię zgodną z zerem ( $2.3\sigma$ )  
 $-4.0 \pm 1.3$  (stat)  $\pm 0.8$  (syst)

W planach:

- próba detekcji neutrin pp

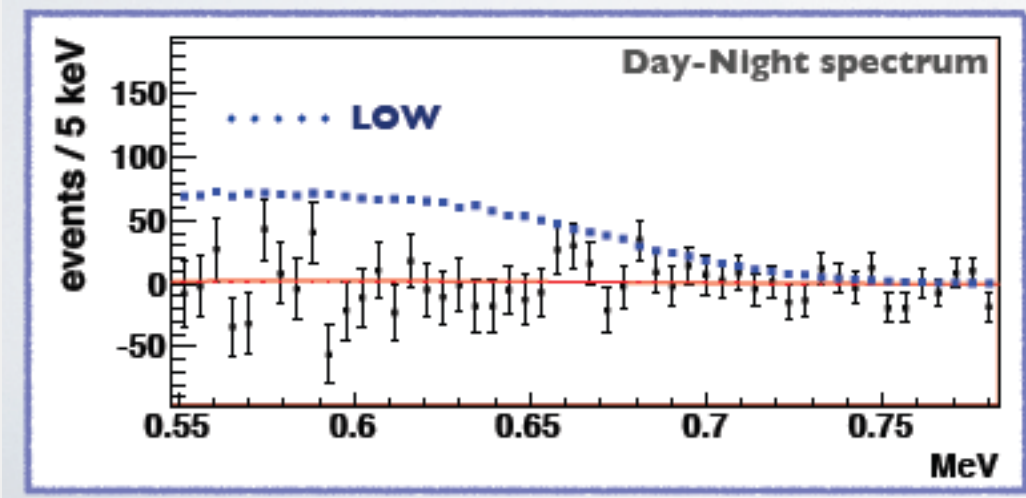
Justyna Łagoda, NCBJ





# Wyniki Borexino

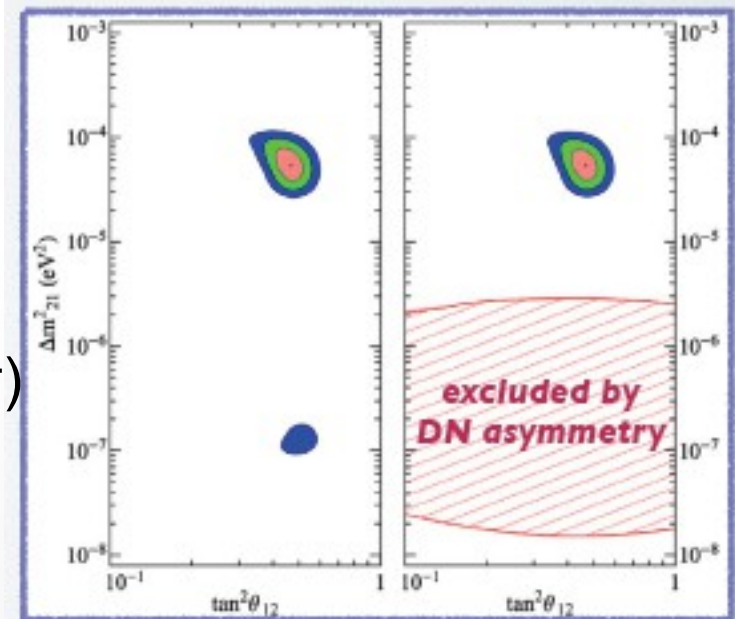
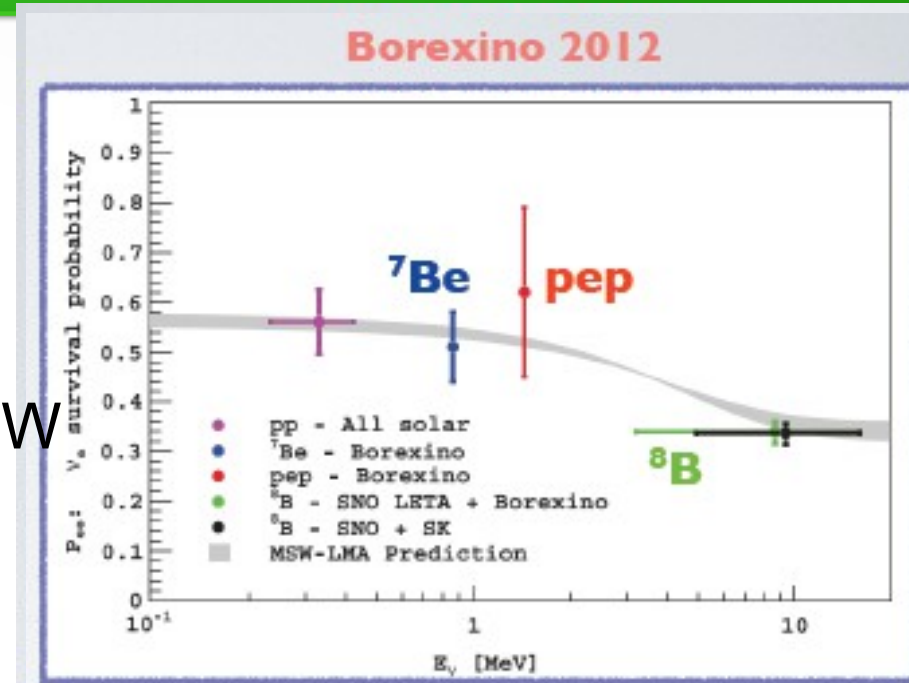
- pomiar neutrin berylowych (5%)
- wykrycie neutrin pep i limit na neutrina CNO
- brak asymetrii dzień/noc dla neutrin berylowych wyklucza rozwiązanie LOW



Super-K również zmierzyło asymetrię zgodną z zerem ( $2.3\sigma$ )  
 $-4.0 \pm 1.3$  (stat)  $\pm 0.8$  (syst)

W planach:  
 - próba detekcji neutrin pp

Justyna Łagoda, NCBJ

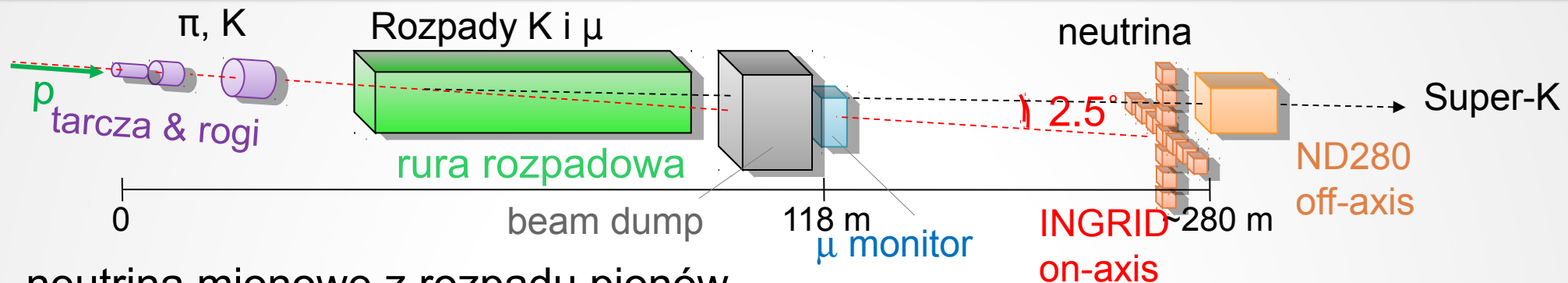


# Eksperymenty z długą bazą

maksymalne mieszanie?



# Neutrino akceleratorowe



- neutrino mionowe z rozpadu pionów
  - domieszka elektronowych z rozpadu kaonów i mionów
- dostępne różne energie i szerokości widma
  - niepewności związane z symulacją wiązki

	T2K	MINOS	CNGS
baza	295 km	735 km	732 km
energia	0.6 GeV (pik)	3 GeV (pik)	17 GeV (średnia)
Detektor bliski	wielozadaniowy	980t, żelazo+scyntylator	-
Detektor daleki	22kt (FV), wodny czerenkowski	4.5kt, żelazo+scyntylator	- 1250 t, emulsje+scyntylatory - 476 t, ciekły argon
Inne cechy	off-axis	pole magnetyczne	

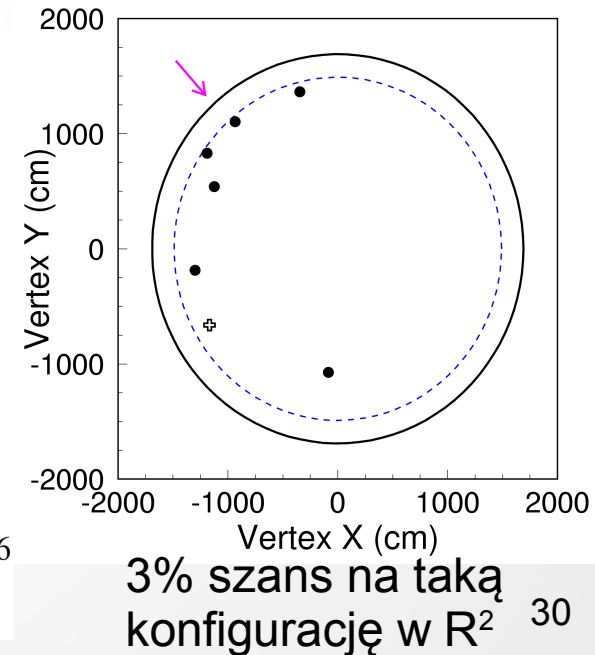
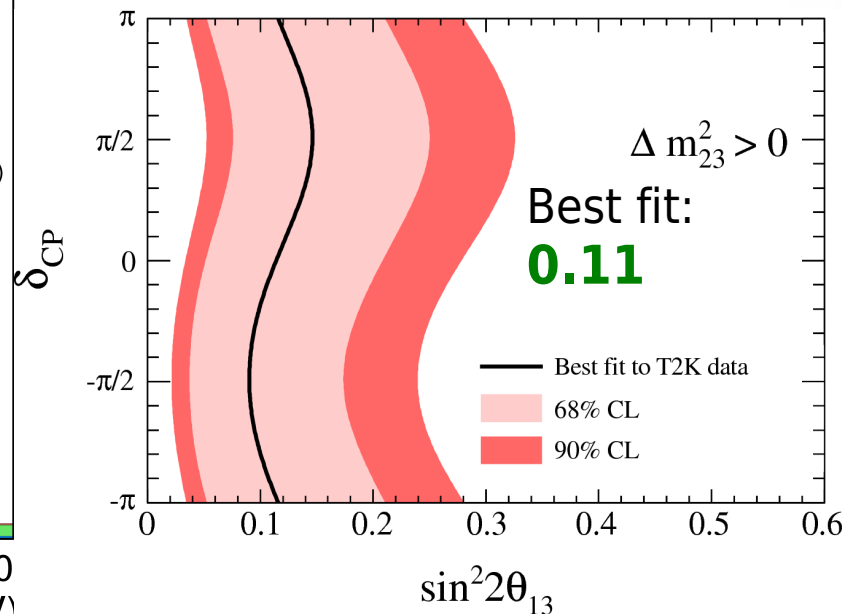
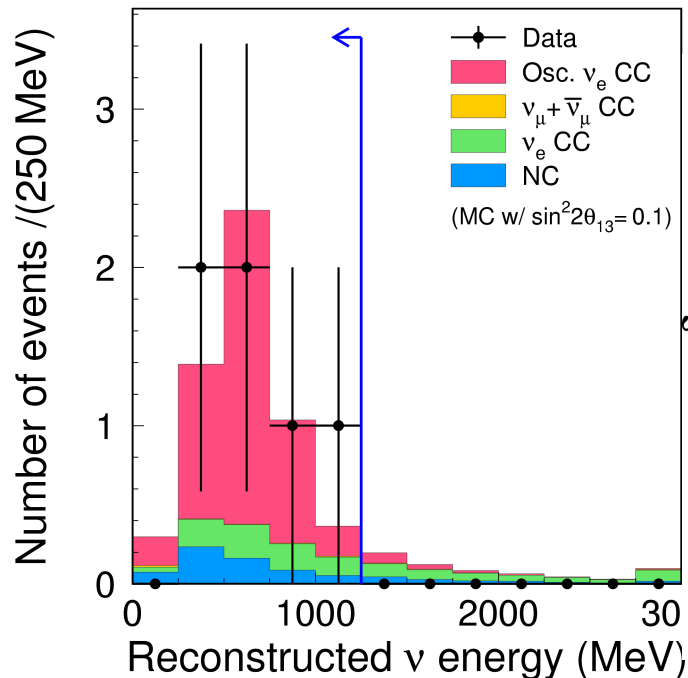


# T2K w 2011



- 13 czerwca 2011 – pierwsze doniesienie o zaobserwowaniu oscylacji  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 
  - Obserwacja 6 przypadków przy spodziewanym tle  $1.5 \pm 0.3$  ( $2.5\sigma$ )
- wskazanie na niezerową wartość  $0.03$  ( $0.04$ )  $< \sin^2 2\theta_{13} < 0.28$  ( $0.34$ )
- zbieranie danych przerwane na niemal rok z powodu trzęsienia ziemi 11.03.2011

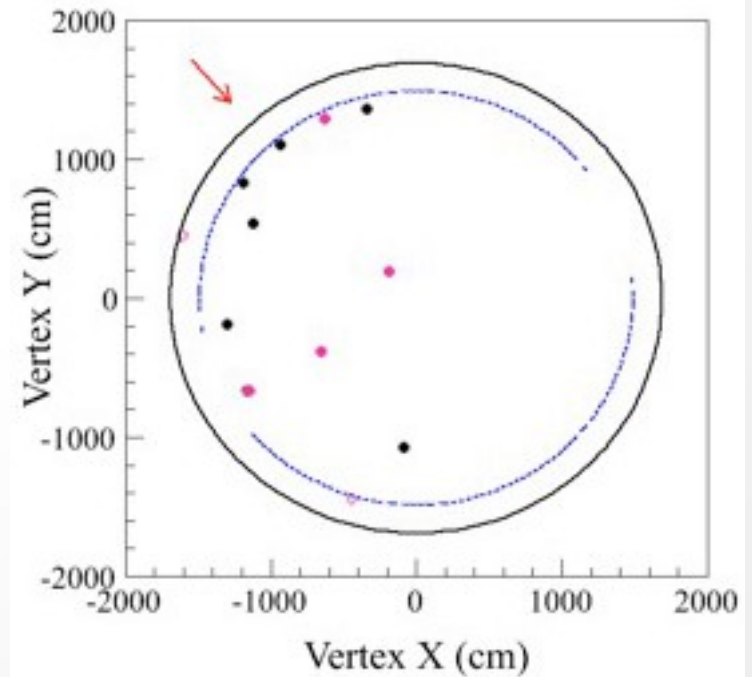
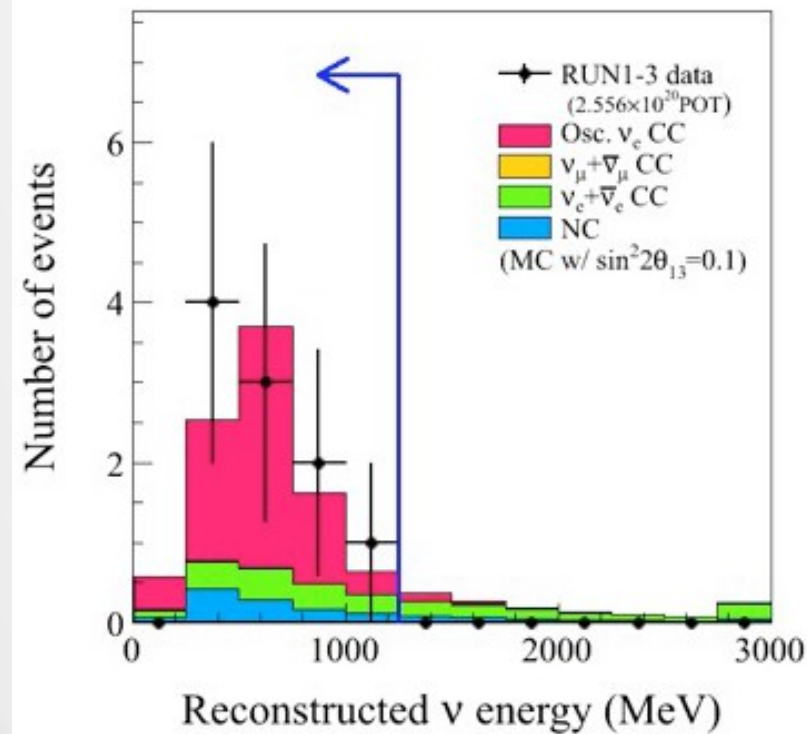
seminarium 14.10.2011 – J.Łagoda



# T2K w 2012

- powtórne uruchomienie eksperymentu
- nowe dane zbierane w 2012 (run3)
- statystyka niemal podwojona

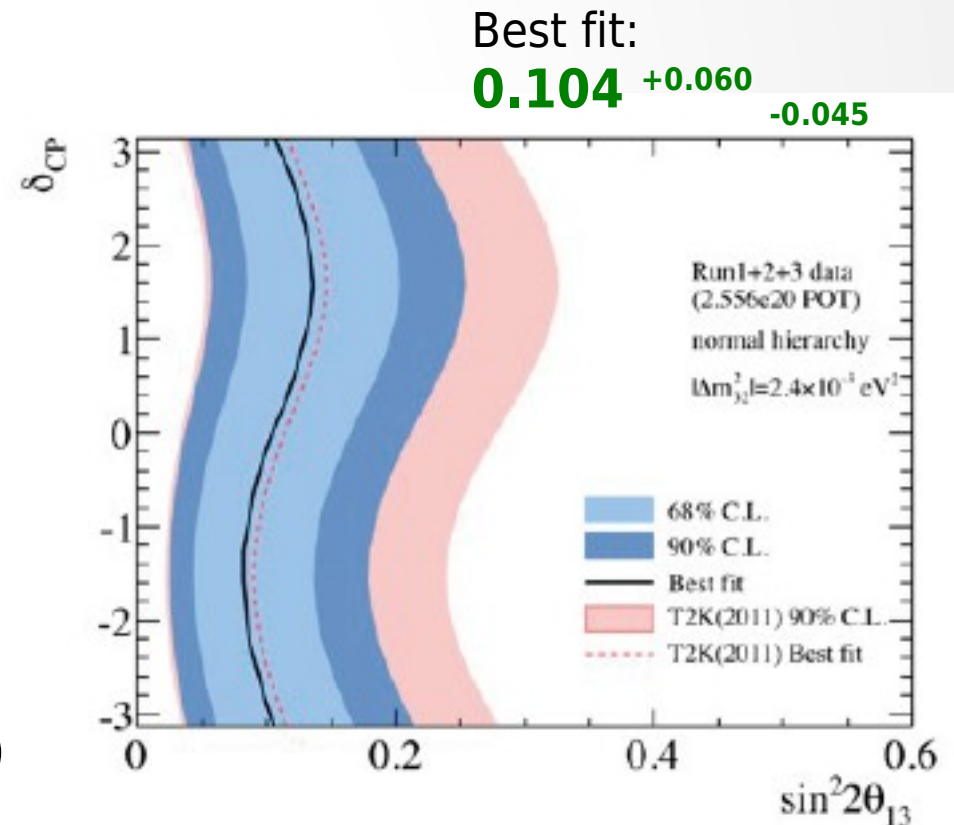
	R U N 1 + 2 + 3 $2.556 \times 10^{20}$ P O T	D a t a	M C E x p e c t a t i o n w / $\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$				
			S i g n a l $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$	B G t o t a l	C C ( $\nu_{\mu} + \nu_{\mu}$ )	C C ( $\nu_e + \nu_e$ )	N C
e-like		19	8.70	13.23	2.30	4.07	6.86
$E_{vis} > 100$ MeV		18	8.50	11.47	1.49	4.03	5.94
No decay-e		13	7.31	8.56	0.28	3.19	5.09
P O L f i t m a s s		10	6.82	3.67	0.07	2.21	1.39
$E_{v}^{rec} < 1250$ MeV (M C $\sin^2 2\theta_{13} = 0$ case)		10	6.61 (0.15)	2.47 (2.58)	0.05 (0.05)	1.36 (1.47)	1.06 (1.06)
E f f i c i e n c y [%]			60.7	1.0	0.0	20.0	0.9



# $\theta_{13}$ w T2K

- prawdopodobieństwo obserwacji 10 lub więcej przypadków przy spodziewanym tle  $2.73 \pm 0.37$  wynosi 0.08% ( $3.2\sigma$ )
- **istnienie oscylacji  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  zostało potwierdzone**
- analiza prowadzona trzema metodami, używającymi
  - tylko liczby przypadków
  - liczby przypadków i rozkładu zrekonstruowanej energii neutrin
  - liczby przypadków, pędu i kąta elektronu

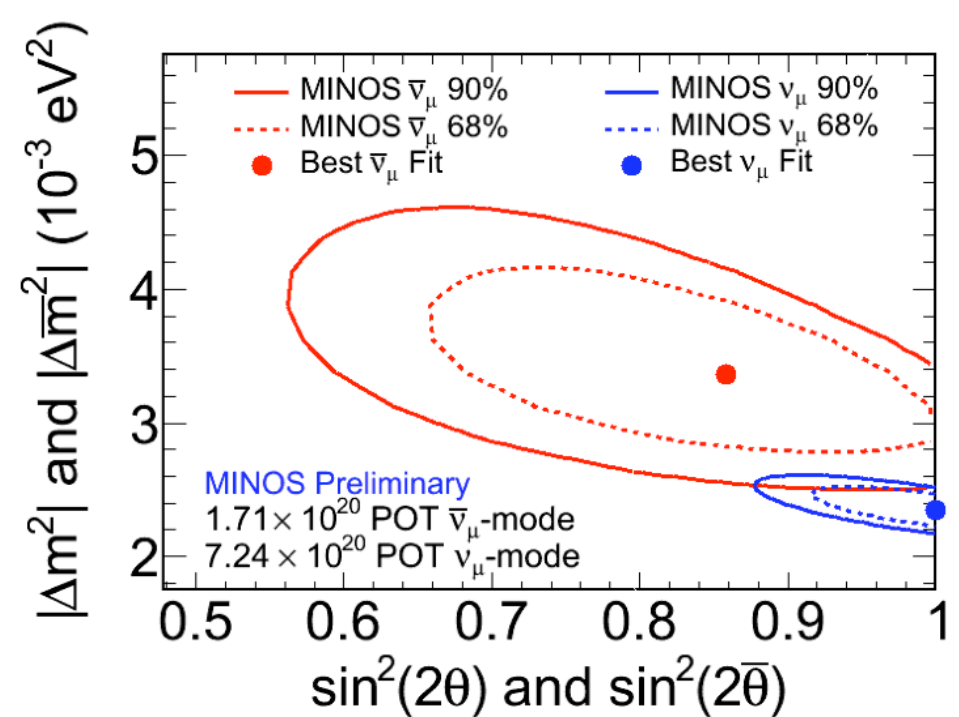
$$0.036 < \sin^2 2\theta_{13} < 0.21 \text{ (90\%CL)}$$





# MINOS

- NEUTRINO 2010  
wyniki oscylacji antyneutrino
  - rozróżnienie neutrin i antyneutrino  
przypadek po przypadku
- NEUTRINO 2012
  - neutrina atmosferyczne:  
37.9 kton\*rok
  - wiązka neutrin:  $10.71 \cdot 10^{20}$  POT
  - wiązka antyneutrino:  $3.36 \cdot 10^{20}$  POT
  - zanik neutrin mionowych
  - pojawianie się neutrin elektronowych





# Antineutrino Contours

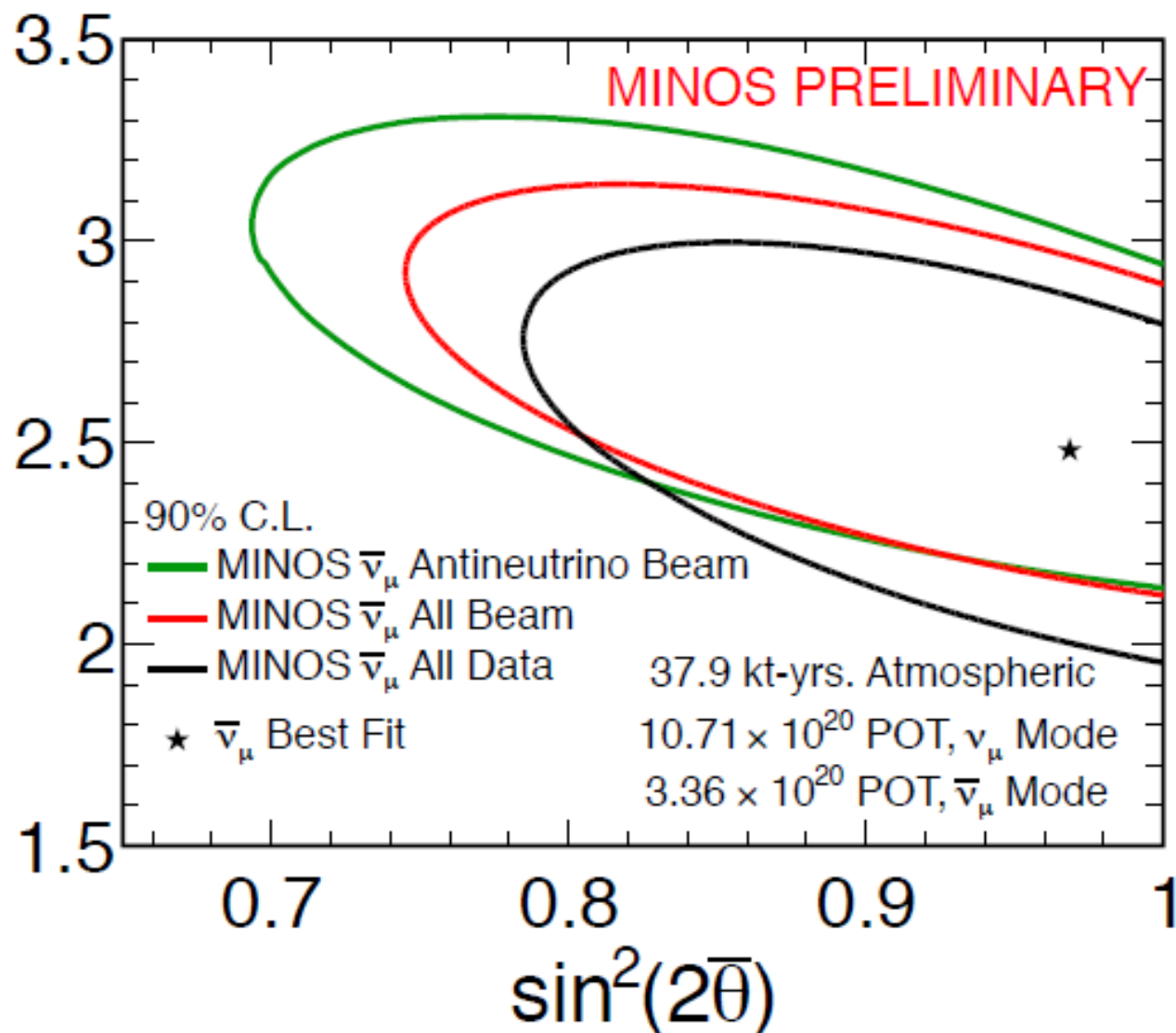
Beam and Atmospheric

New MINOS  
antineutrino oscillation  
parameters:

$$|\Delta\bar{m}^2| = 2.48^{+0.22}_{-0.27} \times 10^{-3} eV^2$$

$$\sin^2(2\bar{\theta}) = 0.97^{+0.03}_{-0.08}$$

$$\sin^2(2\bar{\theta}) > 0.83 \text{ at } 90\% \text{ C.L.}$$

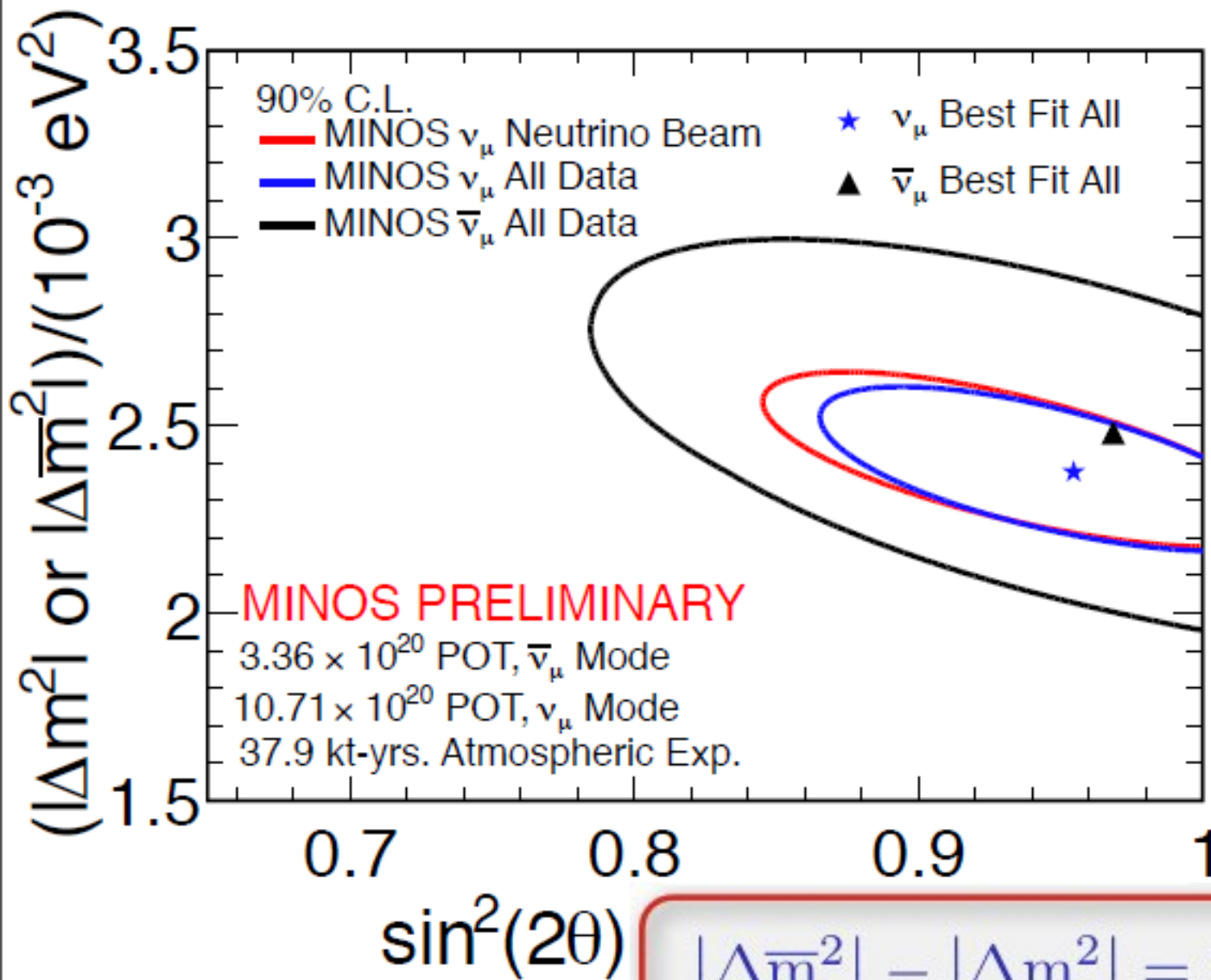


See Poster

R.Nichol



# Neutrino vs Antineutrino



dla danych z wiązki

$$|\Delta m^2| = 2.41^{+0.11}_{-0.10} \times 10^{-3} eV^2$$

$$\sin^2 2\theta = 0.94^{+0.04}_{-0.05}$$

$$|\Delta \bar{m}^2| = 2.64^{+0.28}_{-0.27} \times 10^{-3} eV^2$$

$$\sin^2 2\bar{\theta} > 0.78 (90\%CL)$$

dla wszystkich danych

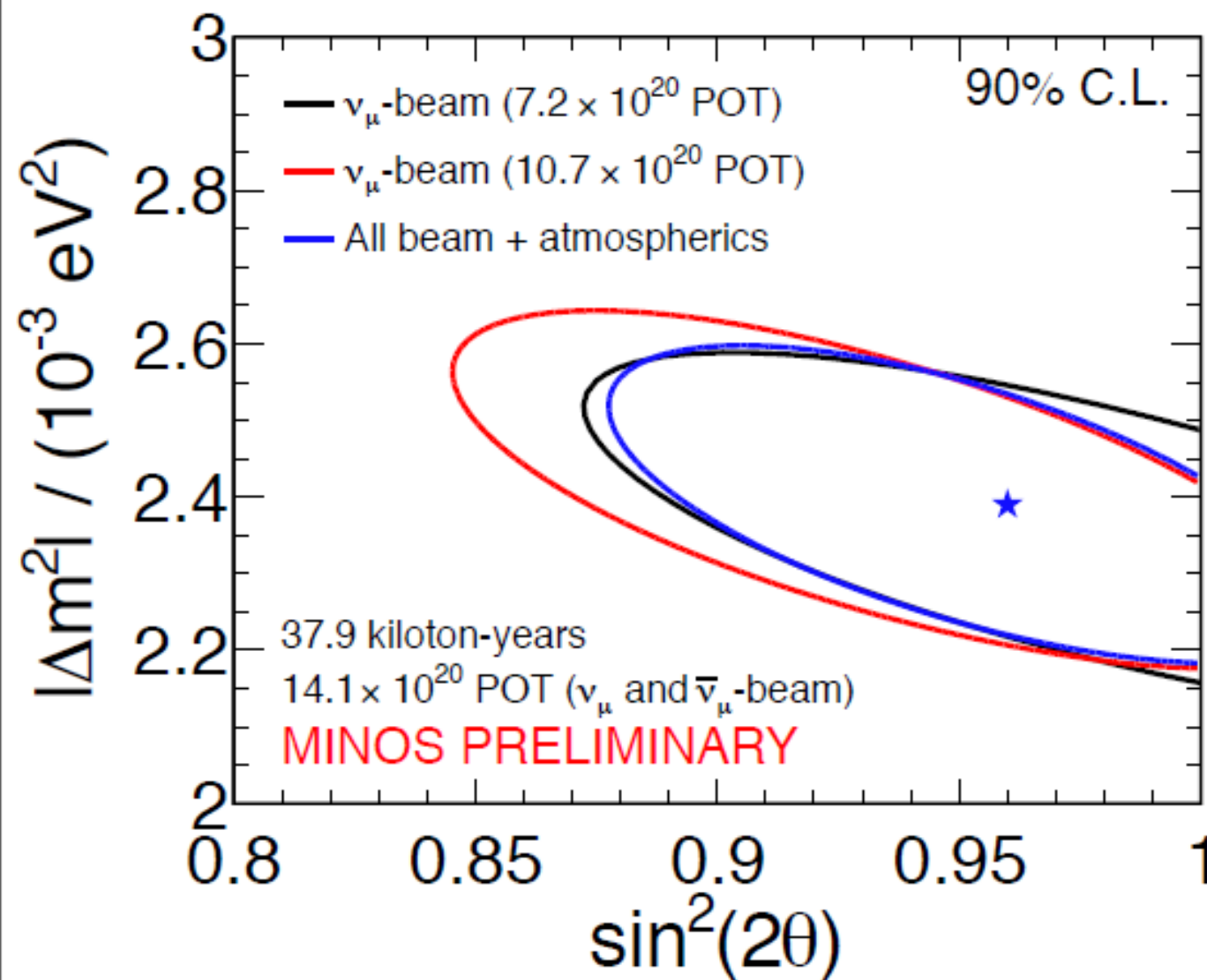
$$|\Delta \bar{m}^2| - |\Delta m^2| = 1.0^{+2.4}_{-2.8} \times 10^{-4} eV^2$$





# Contours

Adding in the extra data and the atmospheric



New MINOS neutrino oscillation parameters:

$$\Delta m^2 = 2.39_{-0.10}^{+0.09} \times 10^{-3} eV^2$$

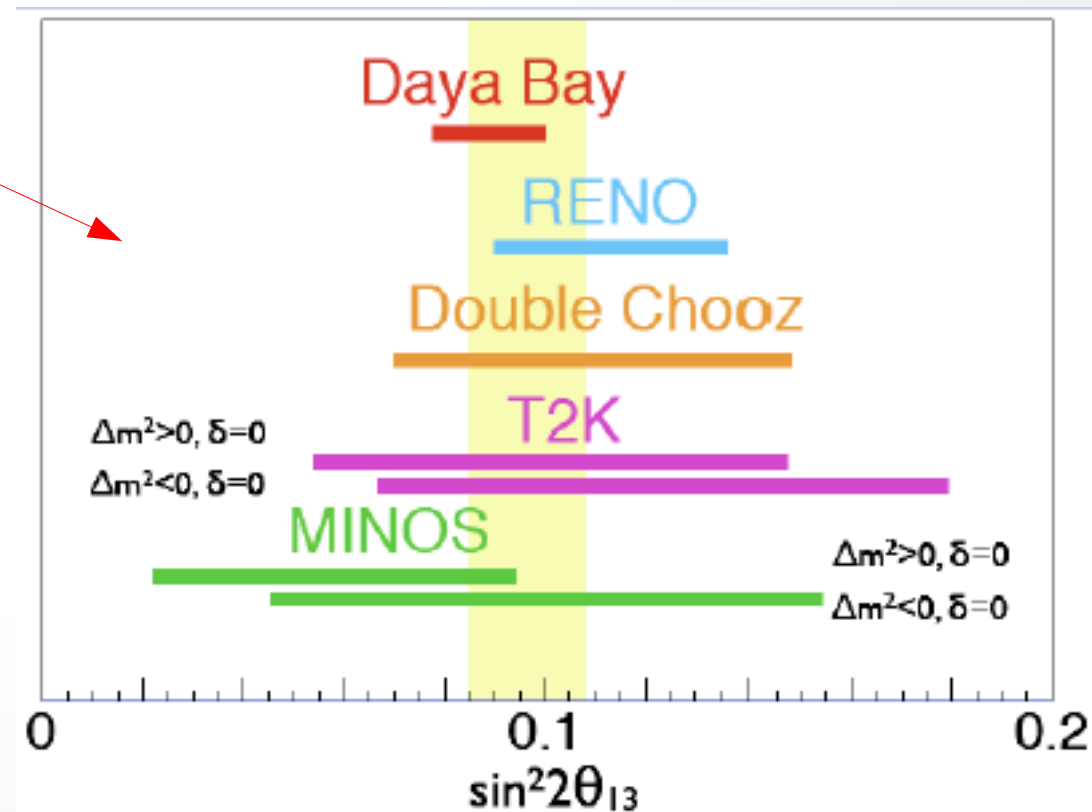
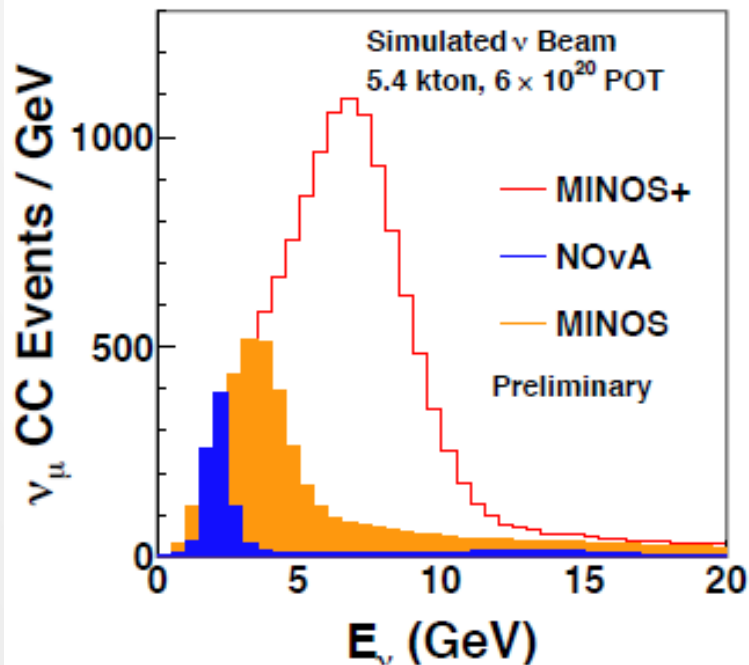
$$\sin^2(2\theta) = 0.96_{-0.04}^{+0.04}$$

$$\sin^2(2\theta) > 0.90 \text{ at } 90\% \text{ C.L.}$$



# Wyniki MINOSa

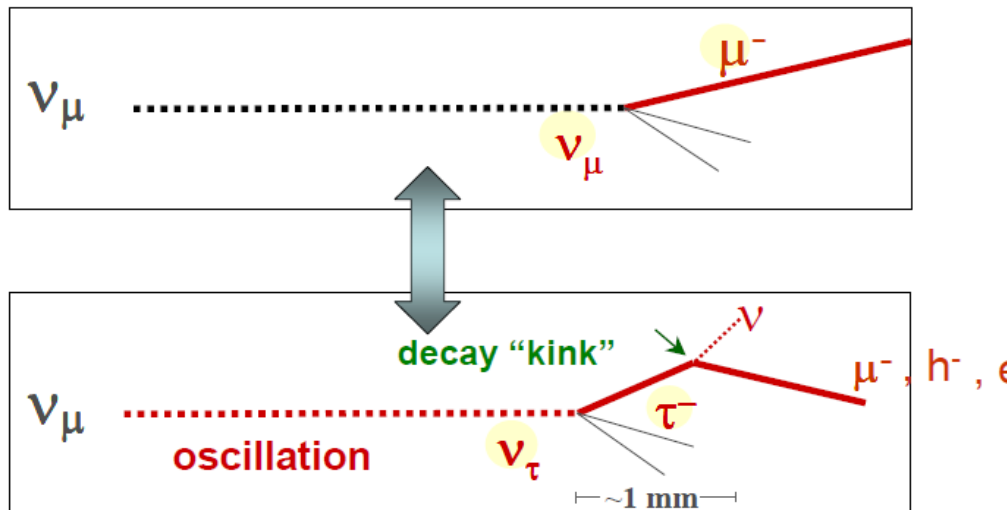
- **najbardziej precyzyjny pomiar  $\Delta m^2_{23}$** , dane dla zaniku neutrin mionowych wskazują na nie maksymalne mieszanie
- zgodne wyniki dla neutrin i antyneutrin
- pomiar  $\sin^2 2\theta_{13}$
- wiązka jest teraz ulepszana i zacznie działać w 2013



# OPERA

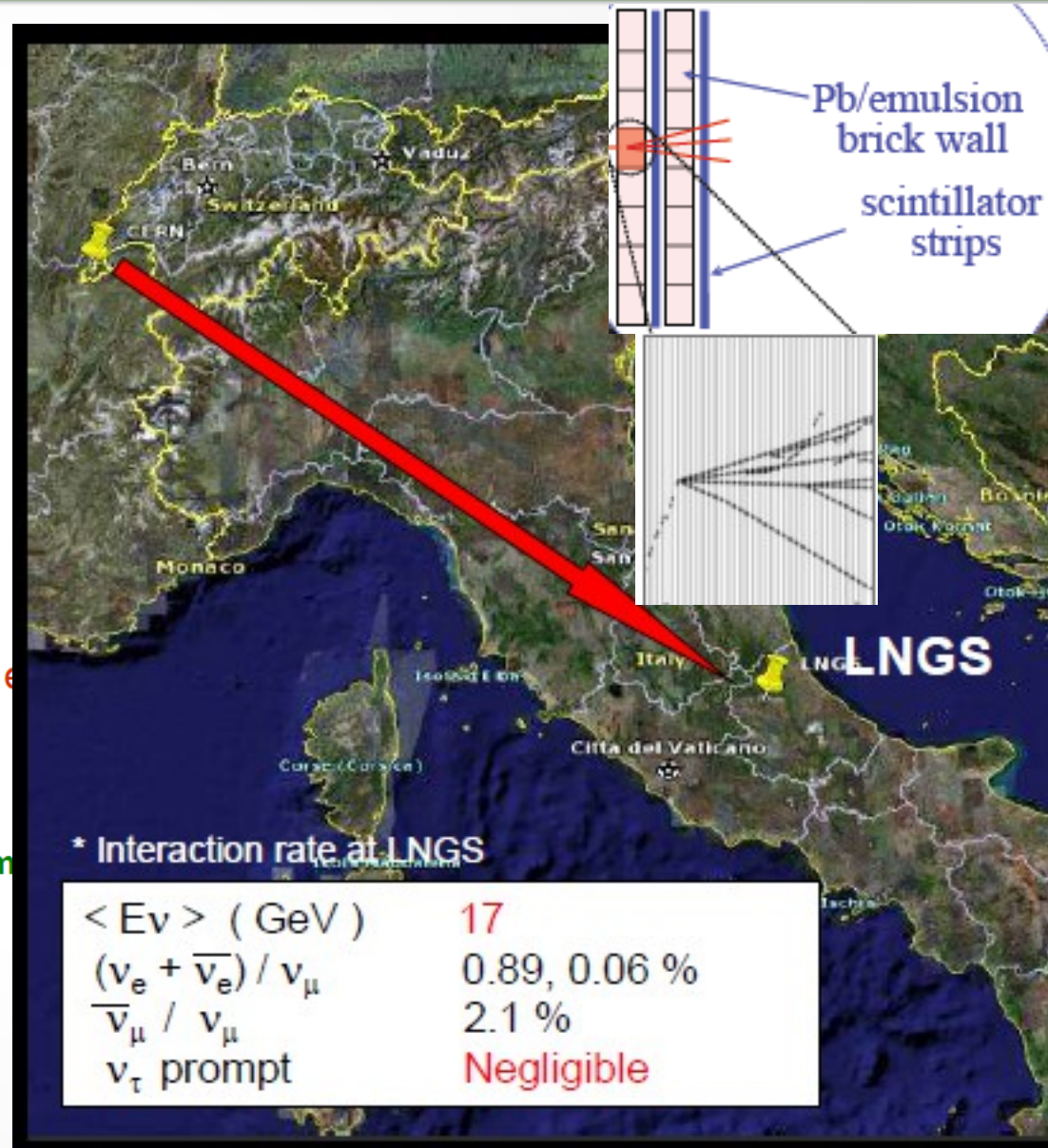
- poszukiwanie neutrin taonowych

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) \approx \sin^2 2\theta_{23} \sin^2\left(\frac{\Delta m_{23}^2 L}{4 E_\nu}\right) \approx 0.017$$



plus 3-prong decay m

- tarcza: emulsje jądrowe przekładane ołowiem, scyntylatory
- spektrometr mionowy

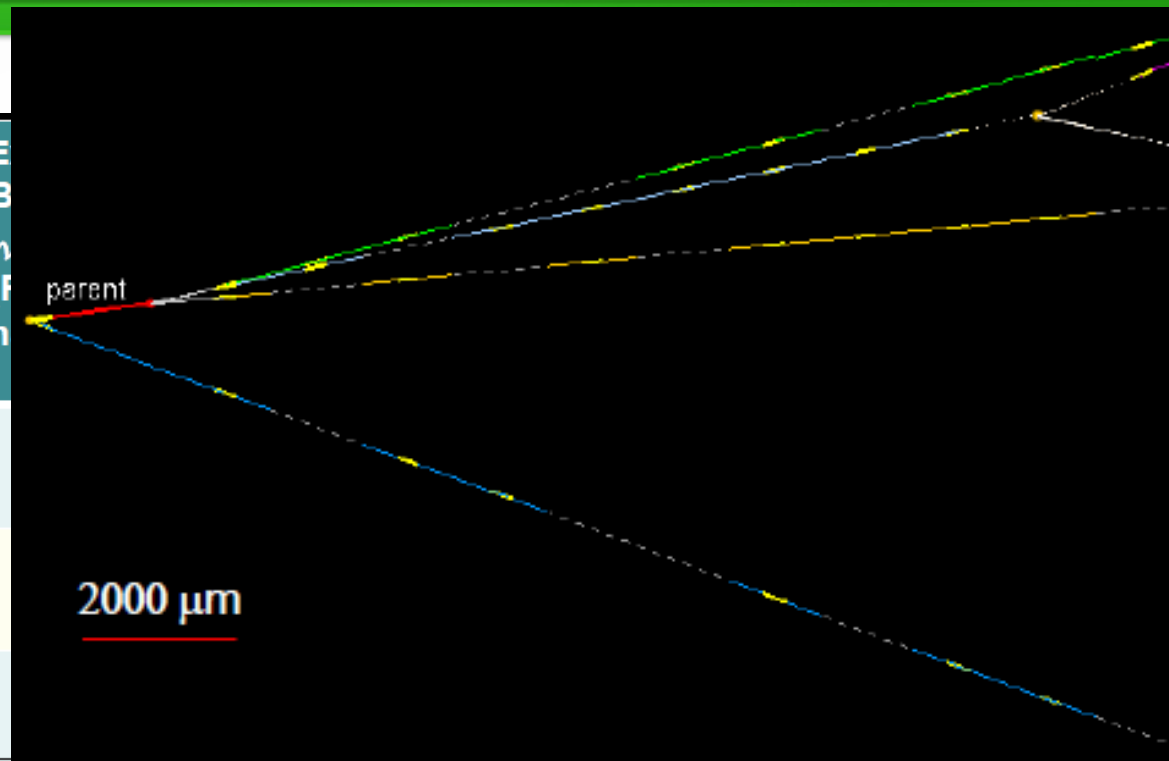




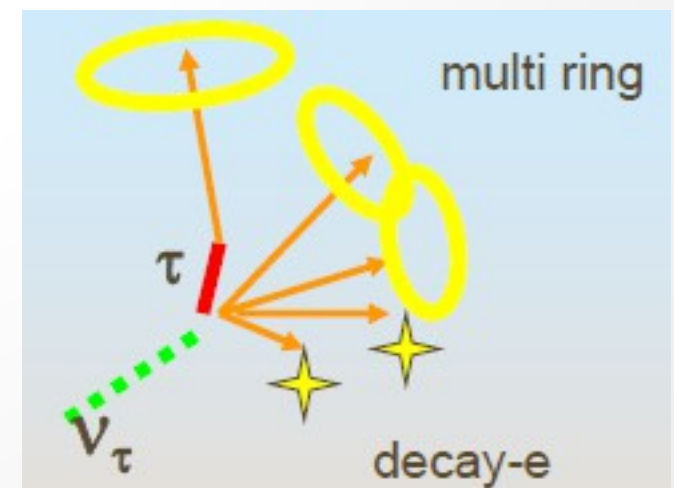
# Wyniki poszukiwania neutrin taonowych

## OPERA

Years	Status	# of events for Decay search	Expected $\nu_\tau$ (Preliminary)	Observed $\nu_\tau$ Candidate Events	$E_{B \nu}$ (f n)
2008-2009	Finished	2783	NEUTRINO 2010	1	
2010-2011	In analysis	1343	NEUTRINO 2012	1	
2012	Started				
Total		4126	2.1	2	0.2



- SuperKamiokande
  - neutrina atmosferyczne
  - przypadki wieloringowe
  - nadwyżka przypadków tau-podobnych idących z dołu
  - $3.8\sigma$



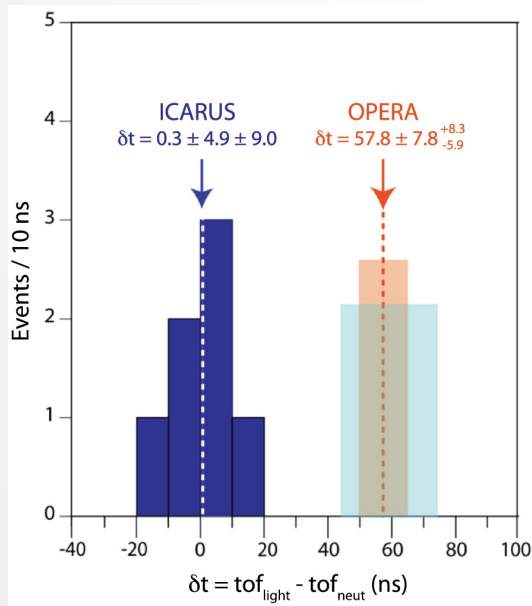
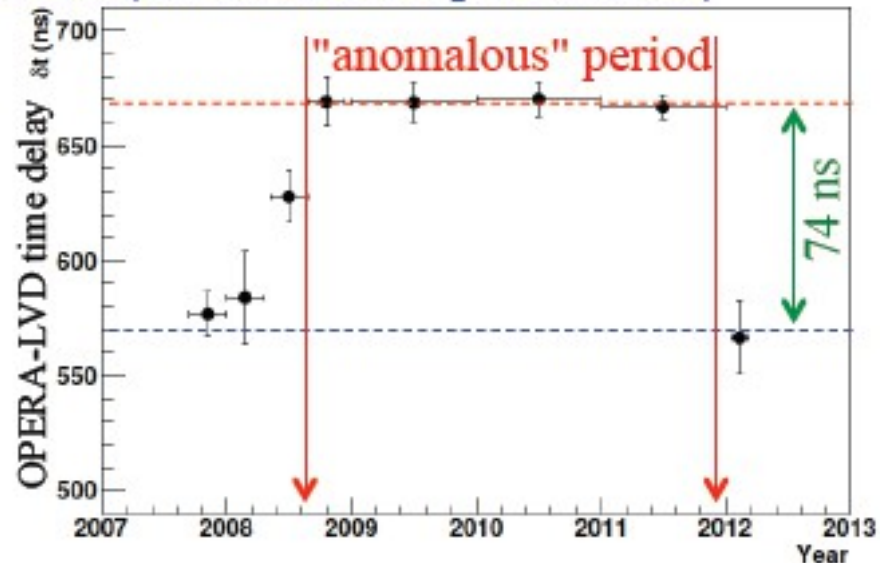
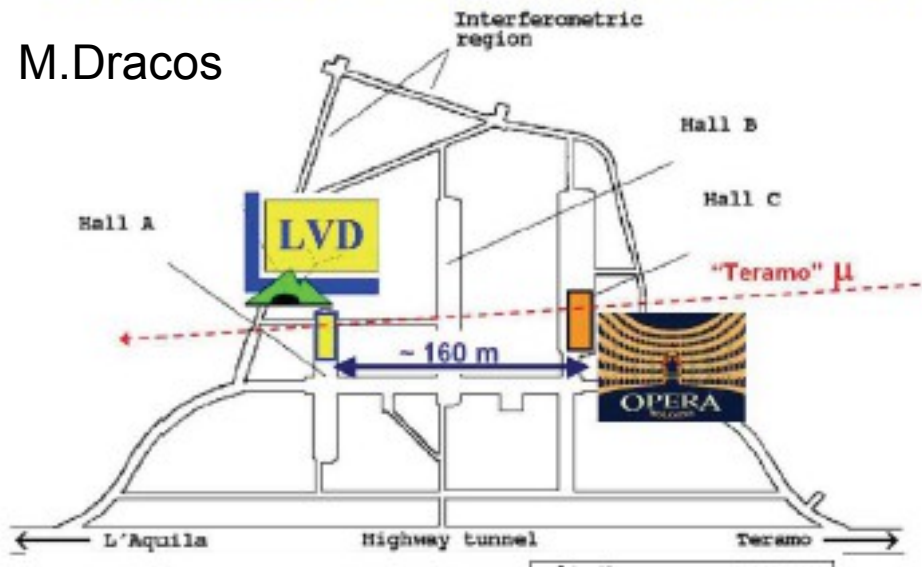
Prędkość neutrin ~~>~~  $\approx c$



# Źródła problemu OPERY

## Coincidences using horizontal cosmic muons (submitted for publication)

M. Dracos



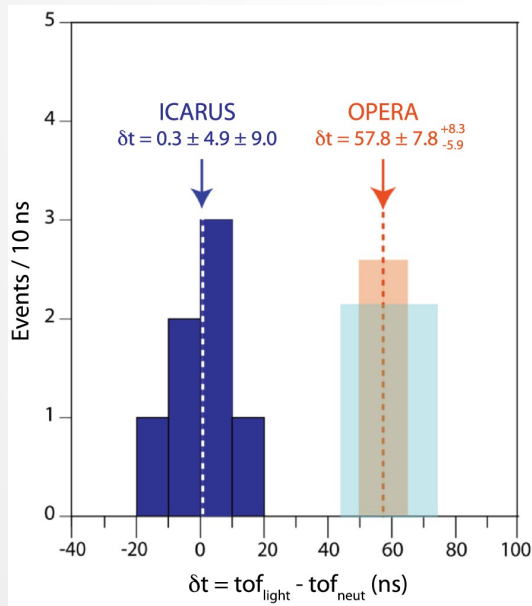
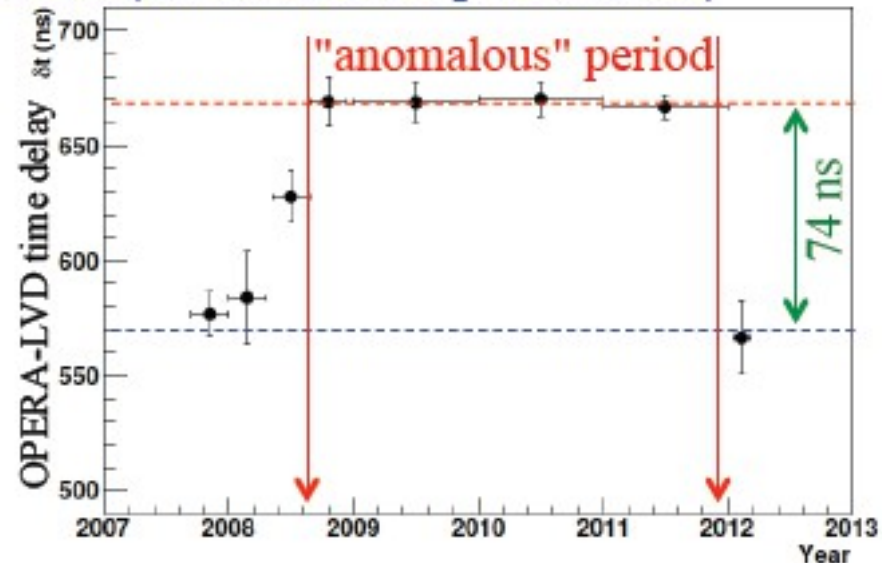
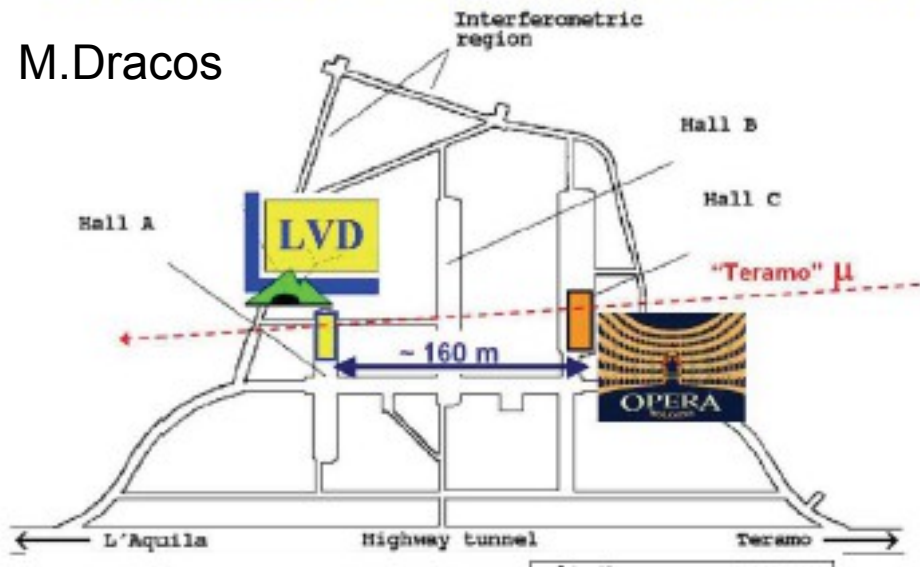
- złe połączenie włókna optycznego z głównym zegarem → czas oczekiwania na przybycie neutrin wydłużony o ~74ns
- złe taktowanie wewnętrznego głównego zegara (zamiast 10ns – 9.99999877ns) → skrócony czas oczekiwania o ~15ns



# Źródła problemu OPERY

## Coincidences using horizontal cosmic muons (submitted for publication)

M. Dracos



- złe połączenie włókna optycznego z głównym zegarem → czas oczekiwania na przybycie neutrin wydłużony o  $\sim 74$  ns
- złe taktowanie wewnętrznego głównego zegara (zamiast  $10$  ns –  $9.99999877$  ns) → skrócony czas oczekiwania o  $\sim 15$  ns

# Prędkość neutrin

- OPERA

- powtórna analiza danych 2009-2011

- +pozostałe detektory

- wiązka o krótkich impulsach (2-3ns)

- 22.10-6.11.2011
- 10-24.05.2012

$$\delta t = TOF_{\nu} - TOT_c [ns]$$

S.Bertolucci

	2009-2011	X-XI 2011	V 2012
LNGS			
OPERA	$-6.5 \pm 7.4^{+9.2}_{-6.8}$	$1.9 \pm 3.7^{+9.2}_{-6.8}$	$1.6 \pm 1.1^{+6.1}_{-3.7}$
Borexino		$-2.9 \pm 7 \pm 6$	$2.7 \pm 1.2 \pm 3$
ICARUS		$0.3 \pm 4.9 \pm 9.0$	$5.1 \pm 1.1 \pm 5.5$
LVD		$2.3 \pm 5.3$	$2.9 \pm 0.6 \pm 3.0$
	2007	2012 - 1	2012 - 2
MINOS	$-126 \pm 32 \pm 64$	$-11.4 \pm 11.2 \pm 29$	$-18 \pm 11 \pm 29$

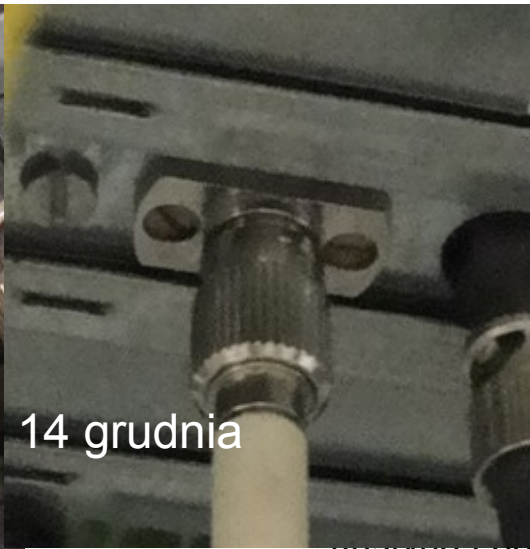
P.Adamson

- MINOS

- długość impulsu 1ns
- ulepszenie aparatury w lutym 2012
- dane zbierane do 1.05.2012
- 2 metody analizy



6 grudnia



14 grudnia

$$(\nu - c)/c = (1.2 \pm 0.2 \pm 1.2) \cdot 10^{-6} \text{ (LVD)}$$



# Ultra wysokie energie



detektory  
fluorescencji

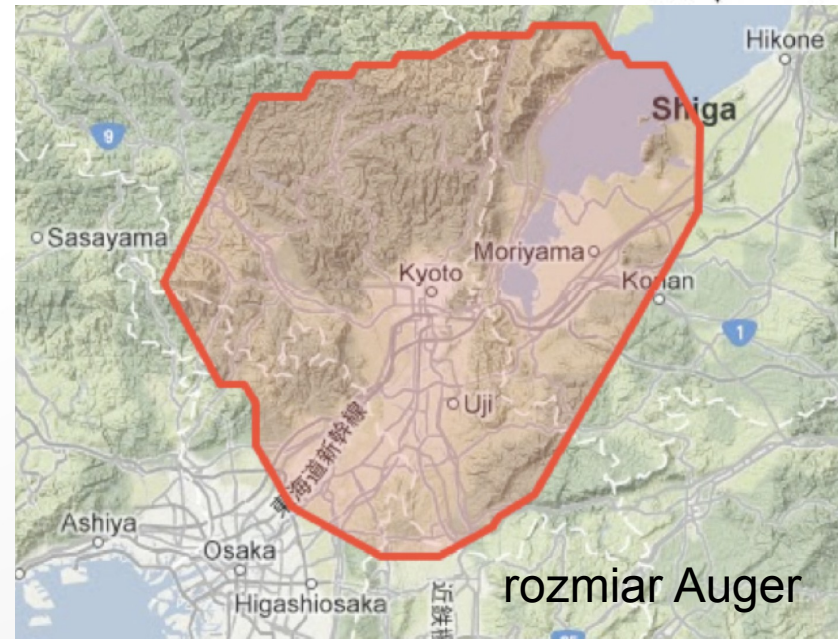
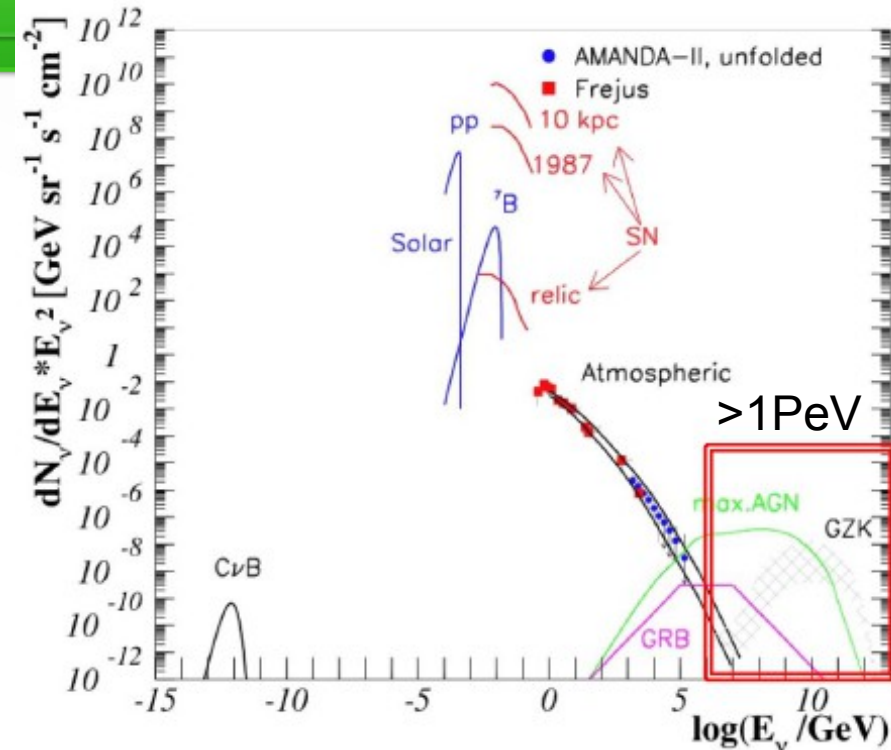
detektory  
powierzchniowe

detektor „naturalny”



# Neutrino o ultra wysokich energiach

- przewidywania strumienia oparte na obserwacjach promieniowania kosmicznego
  - neutrino z błysków gamma
  - neutrino kosmogeniczne (GZK)
  - aktywne jądra galaktyk
  - supernowe
  - źródła egzotyczne (modele *top-down*)
- obserwacje
  - „naturalne” detektory: lód/woda, obserwacja promieniowania Czerenkowa
  - detektory wielkopowierzchniowe – obserwacja głębokich pęków atmosferycznych (oraz fluorescencji)
  - inne (JEM-EUSO, radiowe itp.)

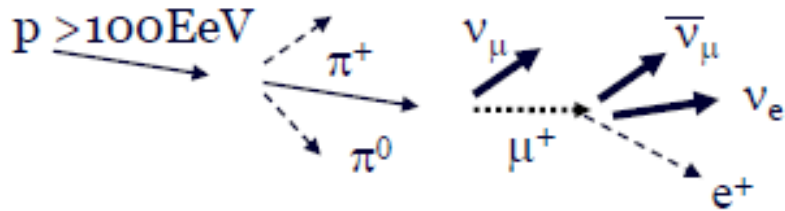


# The highest energy neutrinos

*cosmogenic neutrinos* induced by the interactions of cosmic-ray and CMB photons

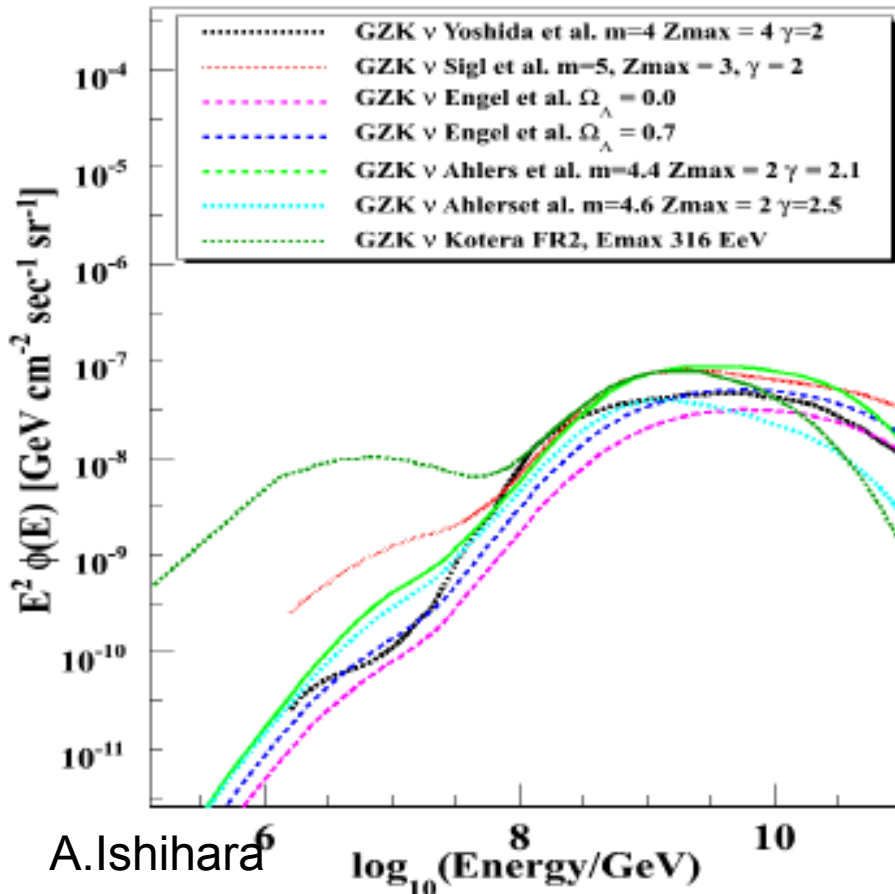
Off-Source (<50Mpc) astrophysical neutrino production via

GZK (Greisen-Zatsepin-Kuzmin) mechanism



The main energy range:  $E_\nu \sim 10^{8-10} \text{ GeV}$

$$p\gamma_{2.7K} \rightarrow \pi^+ + X \rightarrow \mu^+ + \nu \rightarrow e^+ + \nu's$$



Various  
GZK  $\nu$   
models

## Carries important physics

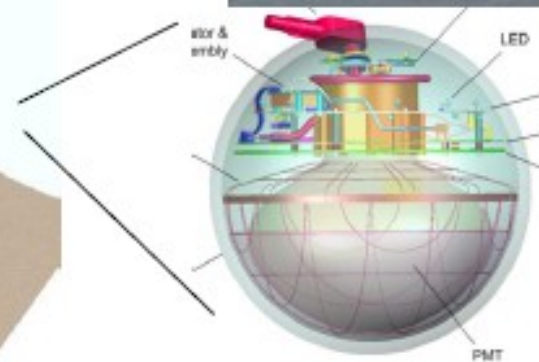
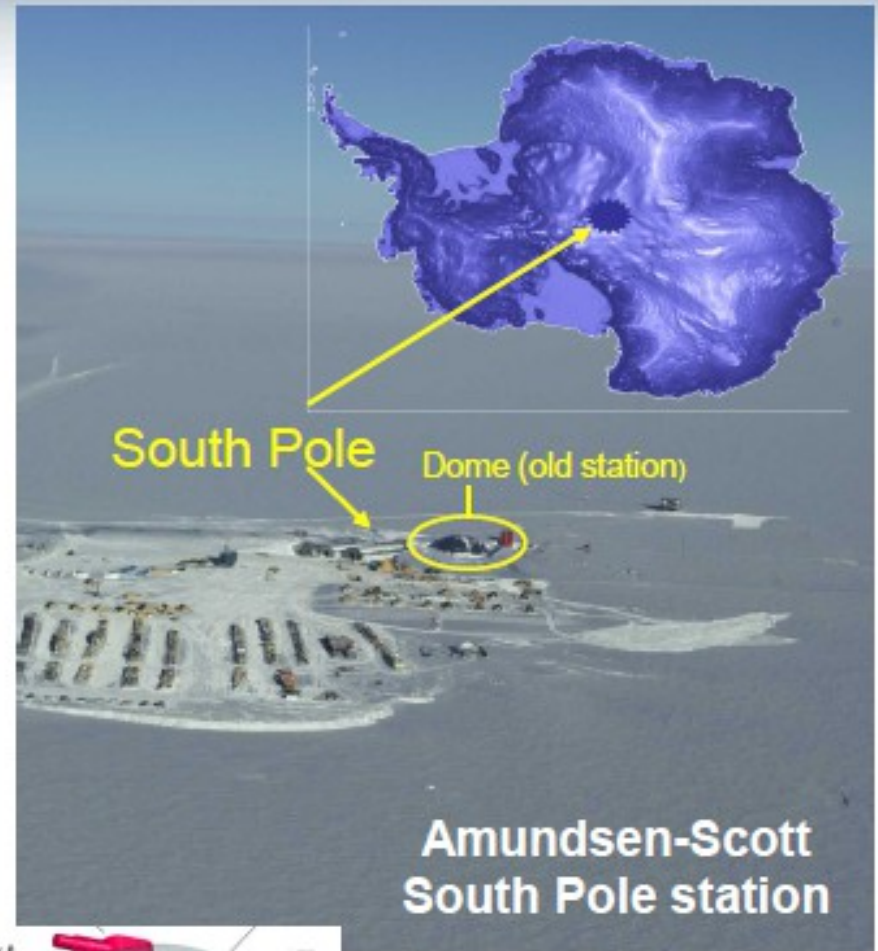
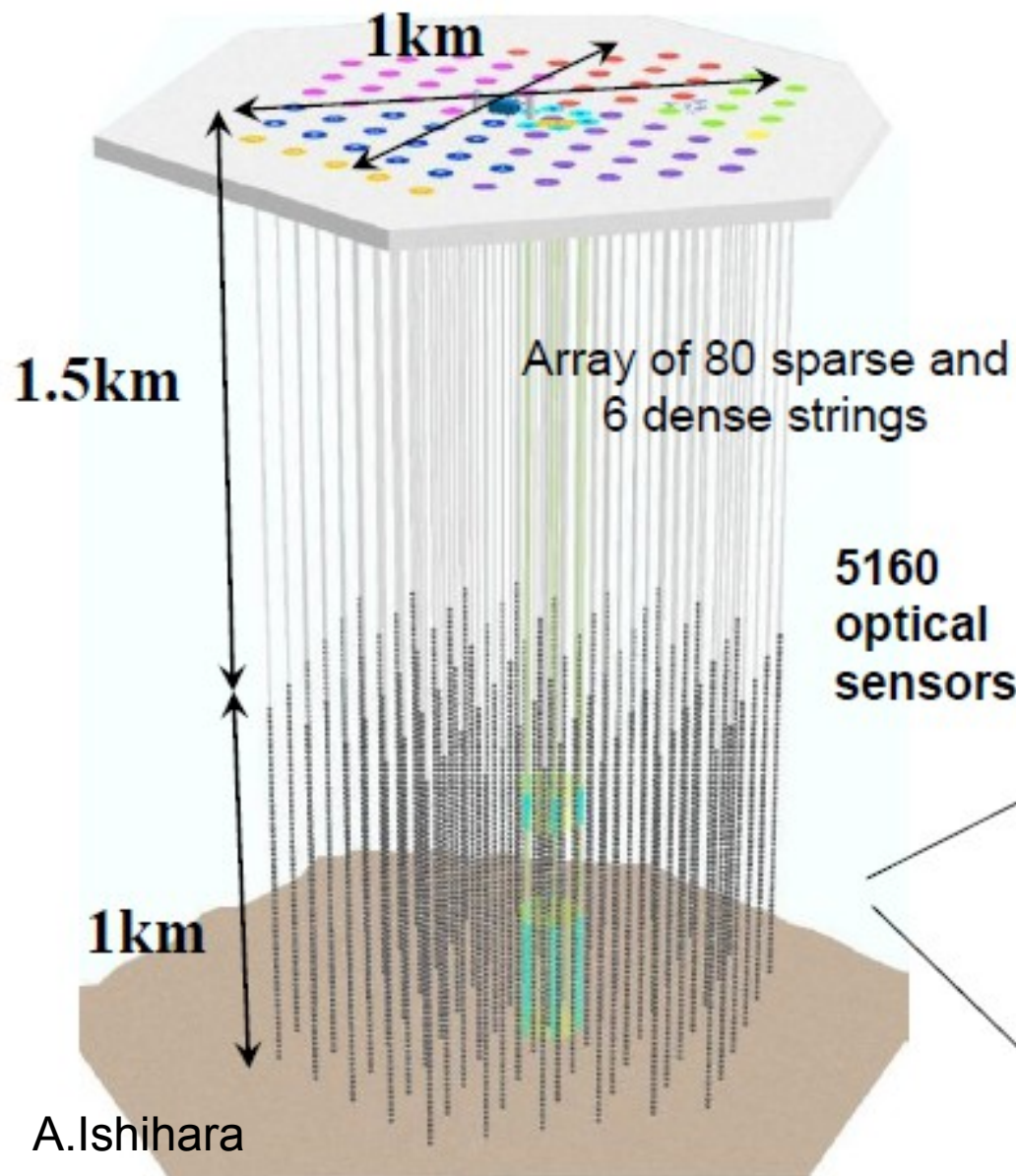
- Location of the cosmic-ray sources
- Cosmological evolution of the cosmic-ray sources
- Cosmic-ray spectra at sources
- The highest energy of the cosmic-rays
- Composition of the cosmic-rays
- Particle physics beyond the energies accelerators can reach

W zakresie energii PeV spodziewane są też: neutrina atmosferyczne „konwencjonalne” oraz „prompt” (z rozpadu ciężkich mezonów, dotąd nie obserwowane)

A. Ishihara<sup>6</sup>



# The IceCube Detector





# Two events passed the selection criteria

2 events / 672.7 days - background (atm.  $\mu$  + conventional atm.  $\nu$ ) expectation 0.14 events  
preliminary p-value: 0.0094 ( $2.36\sigma$ )

Run119316-Event36556705

Jan 3<sup>rd</sup> 2012

NPE  $9.628 \times 10^4$

Number of Optical Sensors 312

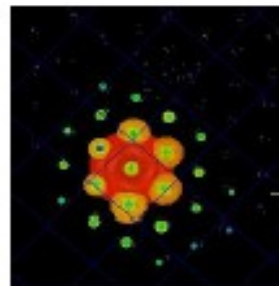
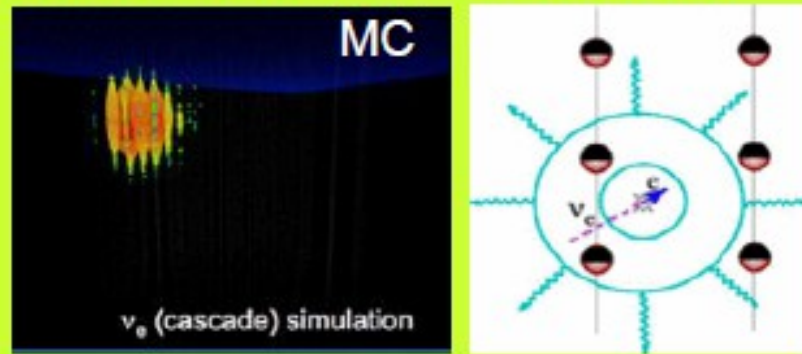
Run118545-Event63733662

August 9<sup>th</sup> 2011

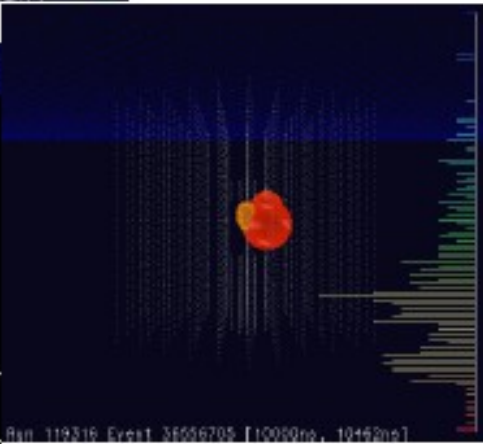
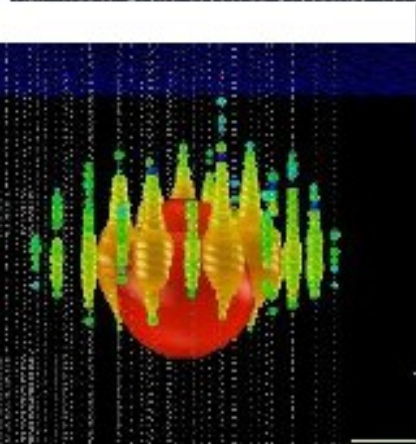
NPE  $6.9928 \times 10^4$

Number of Optical Sensors 354

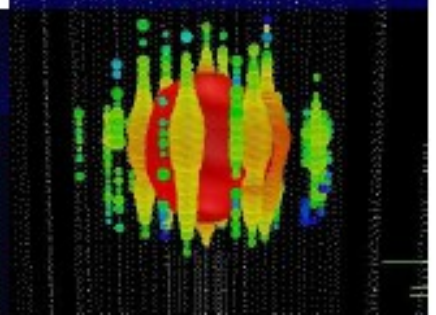
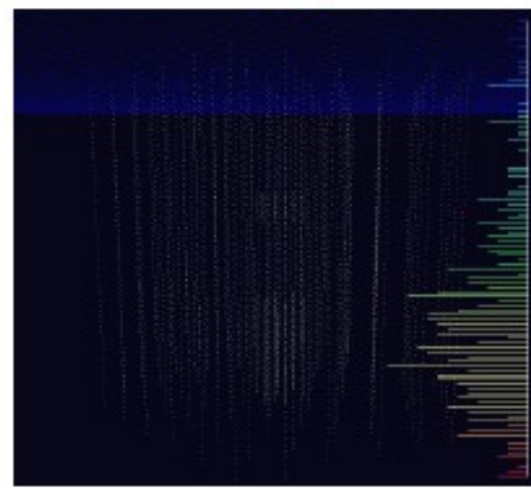
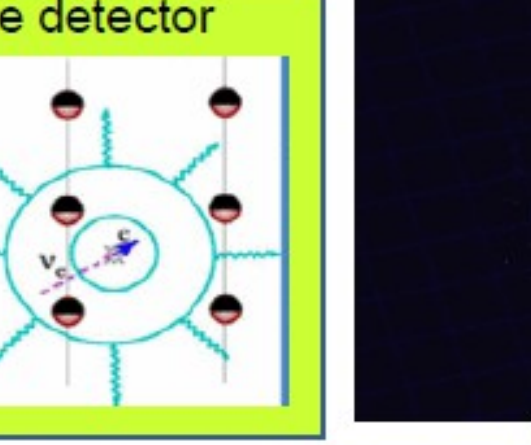
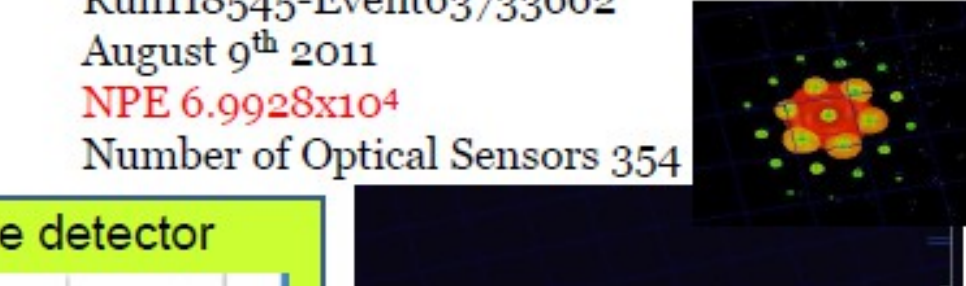
CC/NC interactions in the detector



Run 119316 Event 36556705 [10000ns, 10462ns]



Run 119316 Event 36556705 [10000ns, 10462ns]



A.Ishihara

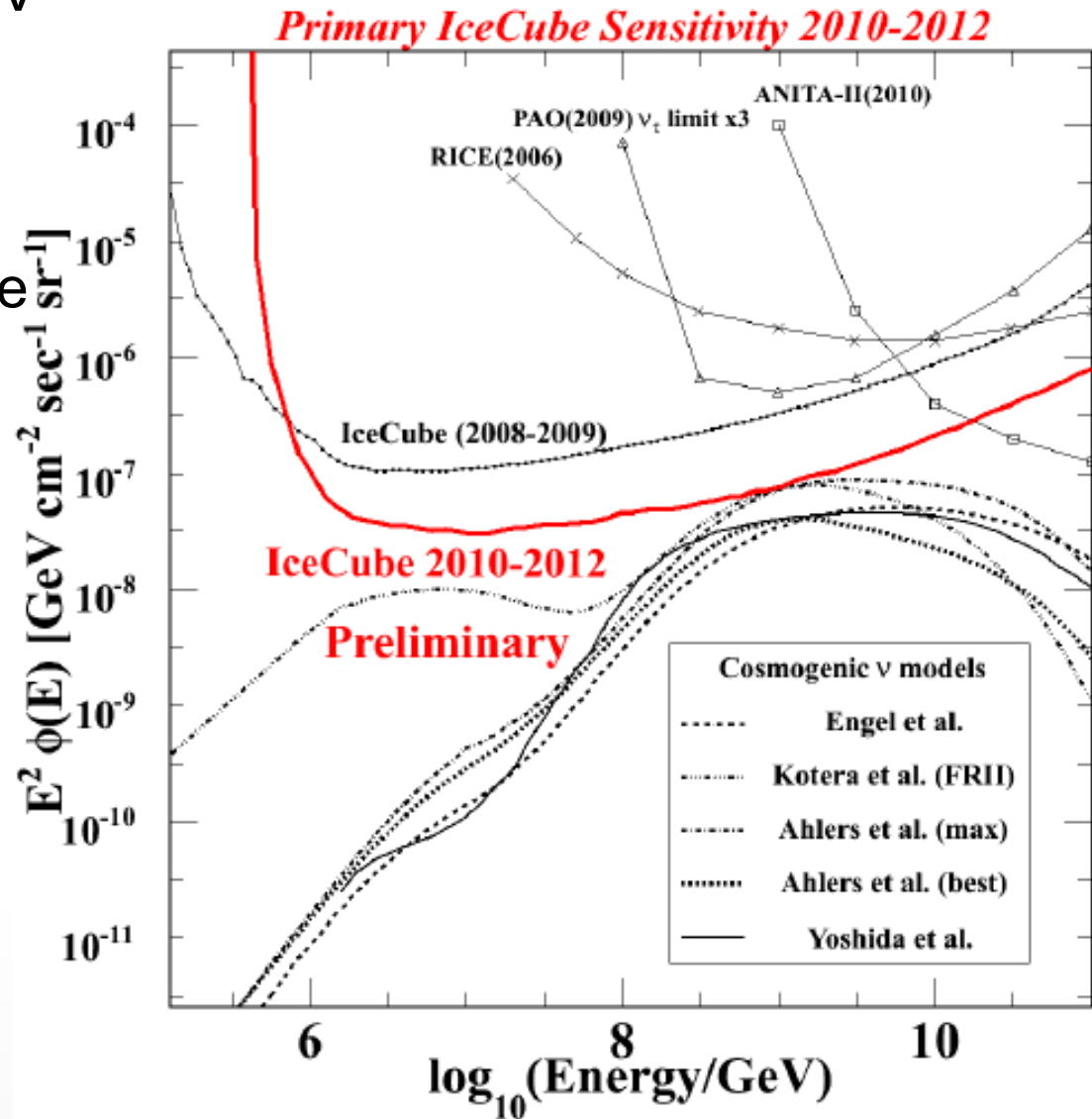
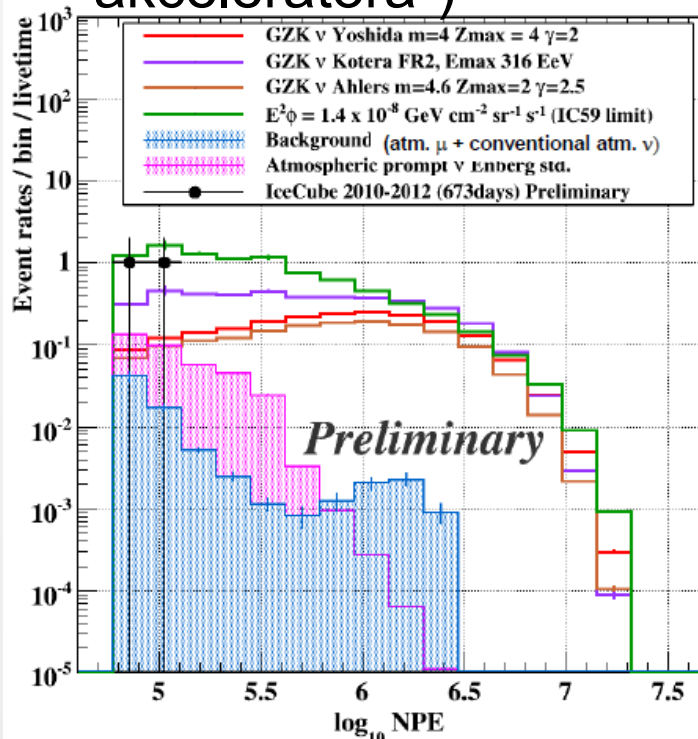
8

selekcja oparta na liczbie fotoelektronów oraz kierunku

Justyna Łagoda, NCBJ

# Wyniki IceCube

- energia szacowana na 1-10 PeV
  - najwyższa zaobserwowana!
- pochodzenie?
  - kosmogeniczne, atmosferyczne (konwencjonalne lub „prompt”, pochodzące z „kosmicznego akceleratora”)





# Neutrino sterylne?

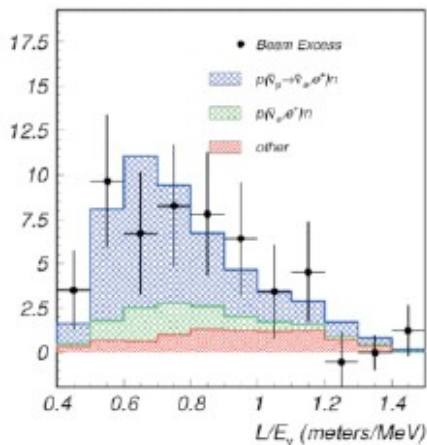




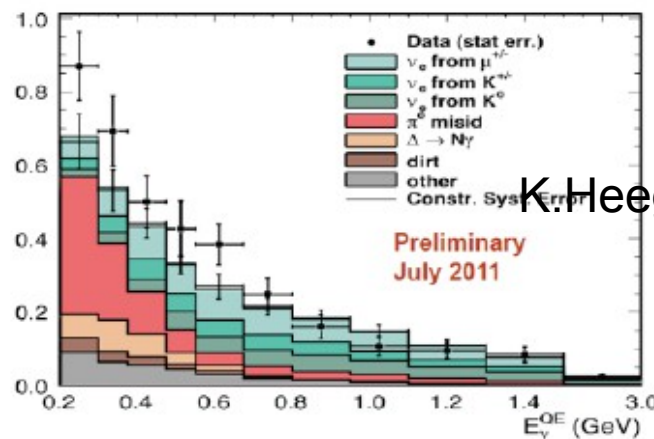
# Anomalie

- LSND – nadwyżka  $\bar{\nu}_e$  w wiązce  $\bar{\nu}_\mu$  ( $3.8\sigma$ ) i słabszy efekt dla neutrin
  - oscylacje z  $\Delta m^2 \sim 1 \text{eV}^2$  ?
- 2010 – MiniBoone – brak efektu dla antyneutrin ( $1.3\sigma$ )  
ale obserwowano nadwyżkę dla neutrin ( $3\sigma$ ), dla nieco innego L/E ( $E < 475 \text{MeV}$ )

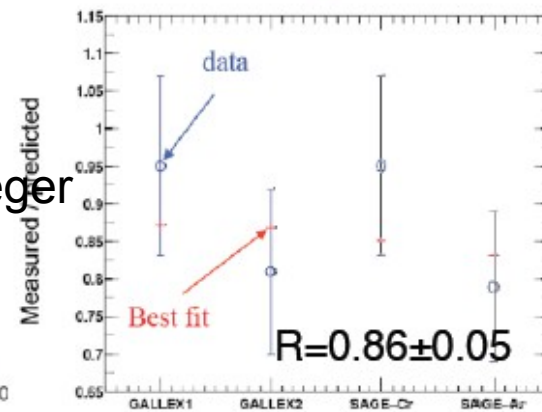
LSND



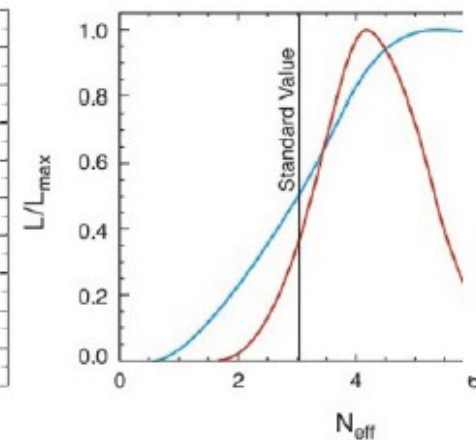
MiniBoone



Ga Anomaly



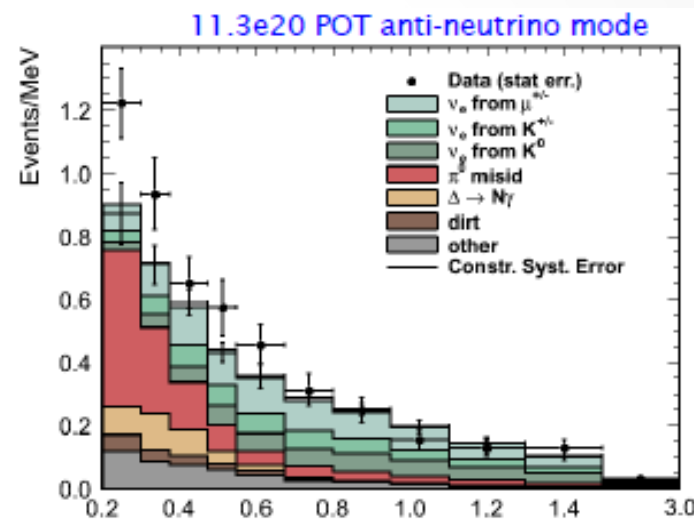
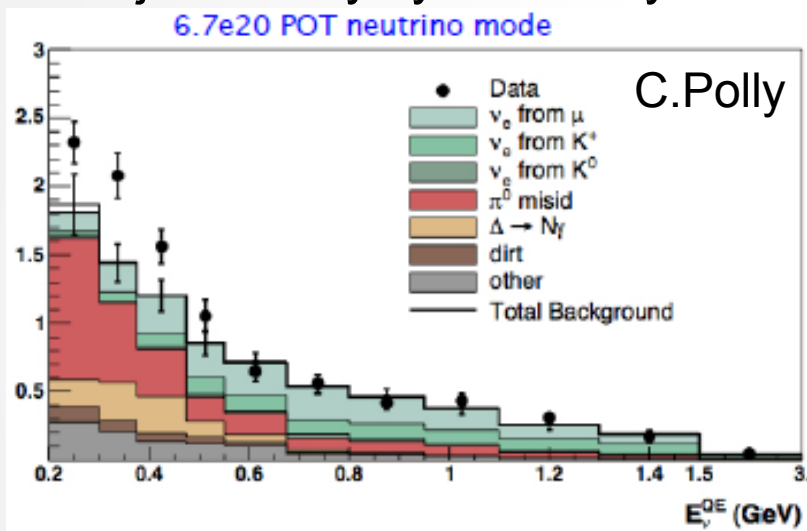
Cosmology (WMAP)



- anomalia reaktorowa ( $3\sigma$ )
- anomalia galowa – zbyt mały mierzony strumień źródła kalibracyjnego ( $2.7\sigma$ )
- wyniki WMAP – liczba lekkich neutrin  $4.34 \pm 0.87$  ( $2\sigma$ , zależy od modelu)

# Nowe wyniki MiniBoone

- pomiary domieszek w wiązce: neutrin w wiązce antyneutrin i pierwotnych neutrin elektronowych
- podwojenie statystyki dla antyneutrin



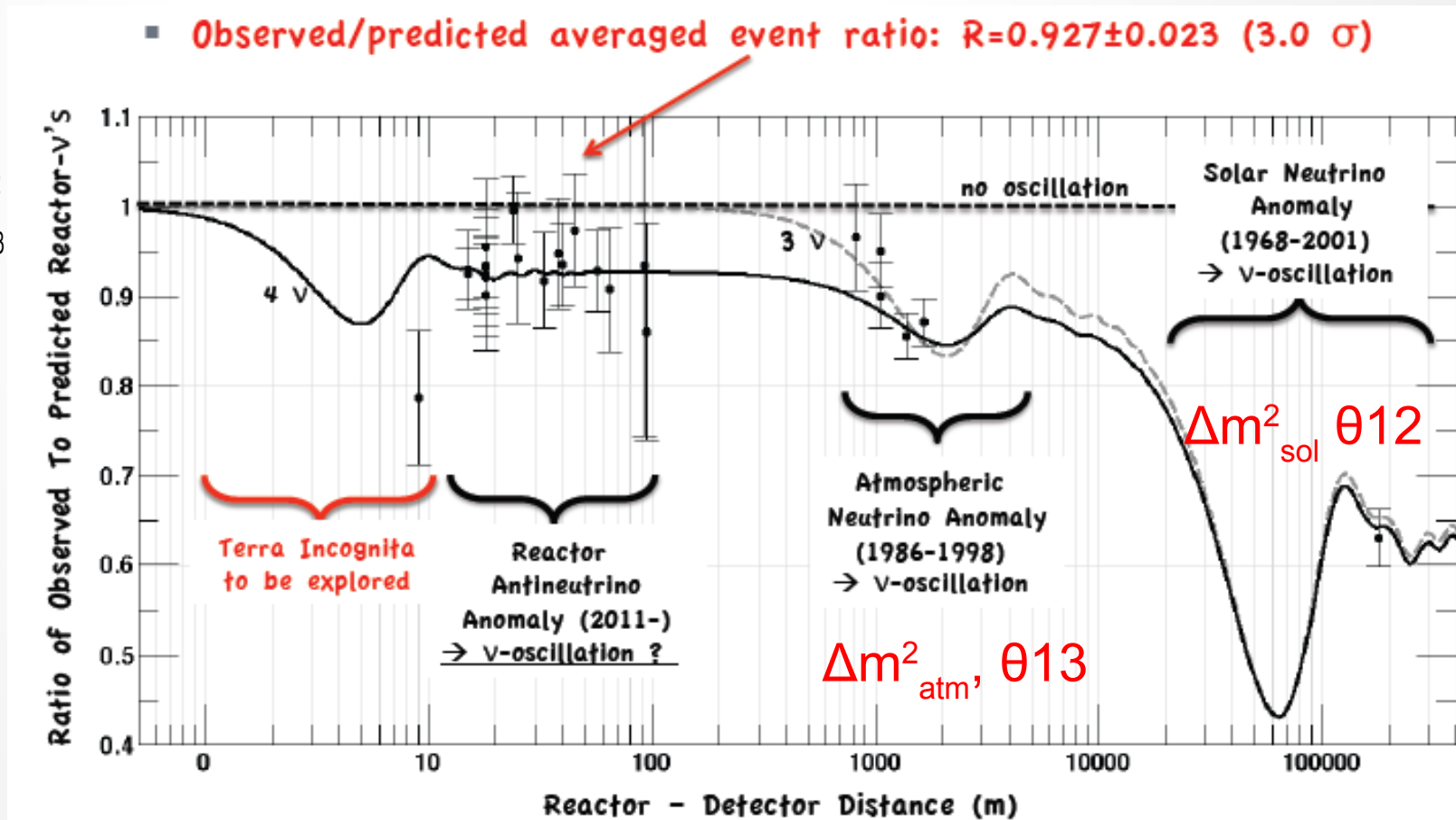
największy efekt  
w obszarze  
200-475 MeV  
  
(duże tło od  $\pi^0$ )

- nadwyżki neutrin  $3.0\sigma$ , antyneutrin  $2.5\sigma$ , łącznie  $3.8\sigma$
- oscylacje? tło? inne zjawisko?
  - w rekonstrukcji energii zakłada się proces QE, jeśli w reakcji biorą udział dodatkowe cząstki, to zrekonstruowana energia będzie zaniżona
    - mechanizm MEC (meson exchange current) z emisją kilku protonów?
    - mógłby też tłumaczyć wyższy niż spodziewany przekrój na CCQE zmierzony w MiniBoone

# Anomalia reaktorowa

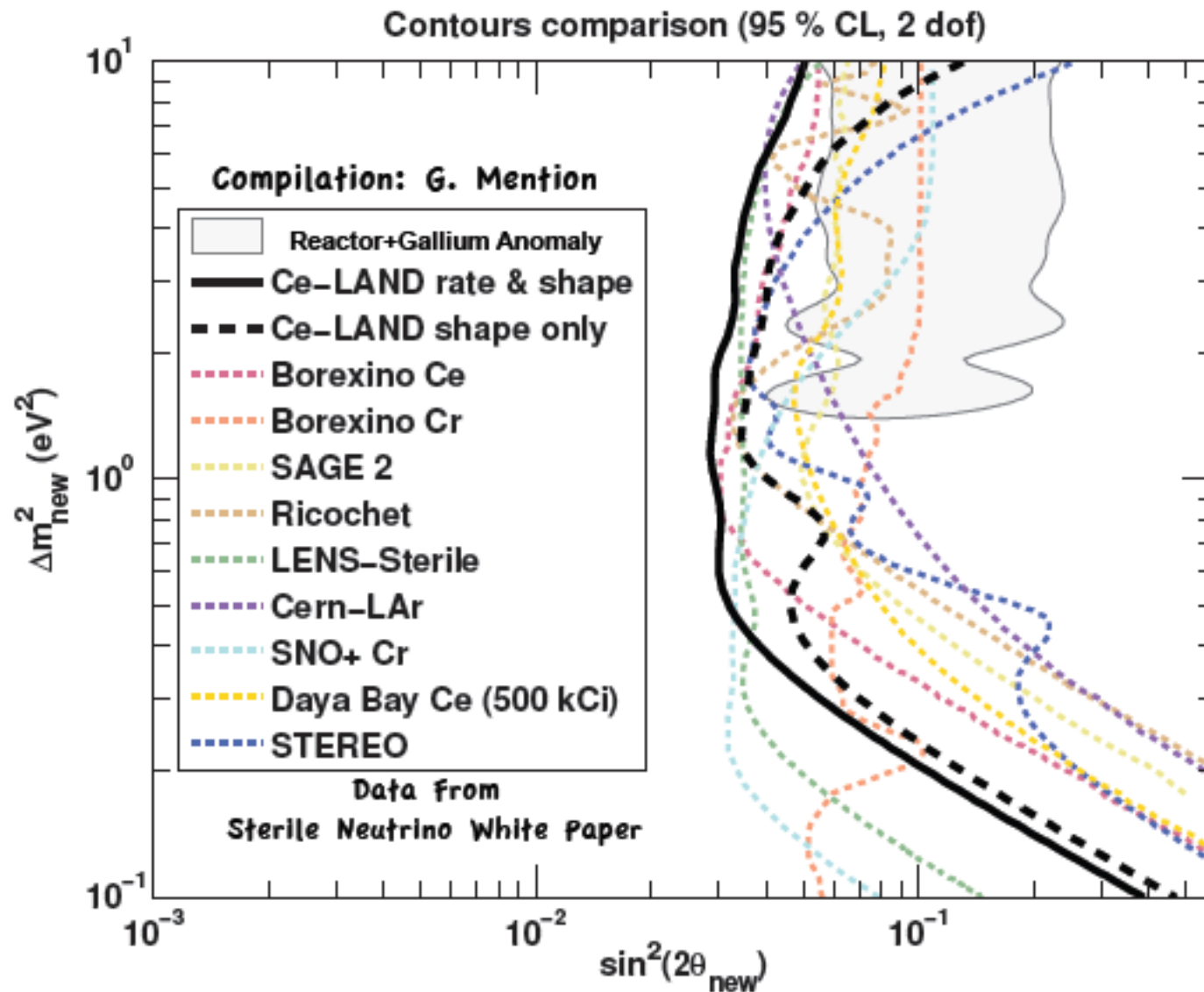
- nowe obliczenia przewidywanego strumienia (2011) → przesunięcie przewidywań o 3% w górę
- efekt jądrowy, problem z normalizacją czy oscylacje na krótkiej bazie (1-10m?)

- jeśli to oscylacje, to  $\Delta m^2 \sim 1 \text{eV}^2$   
 $\sin^2 2\theta > 10^{-3}$





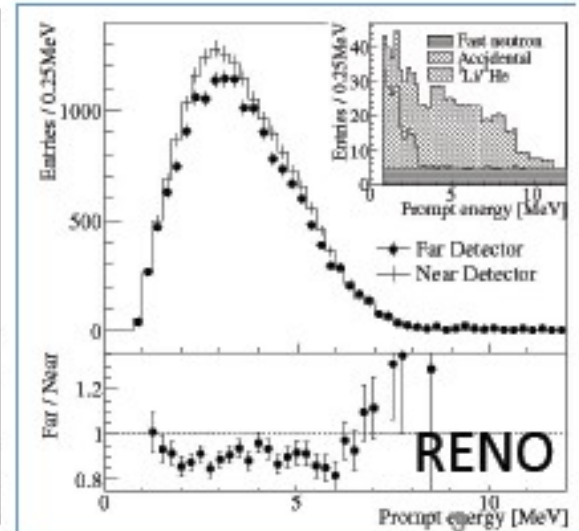
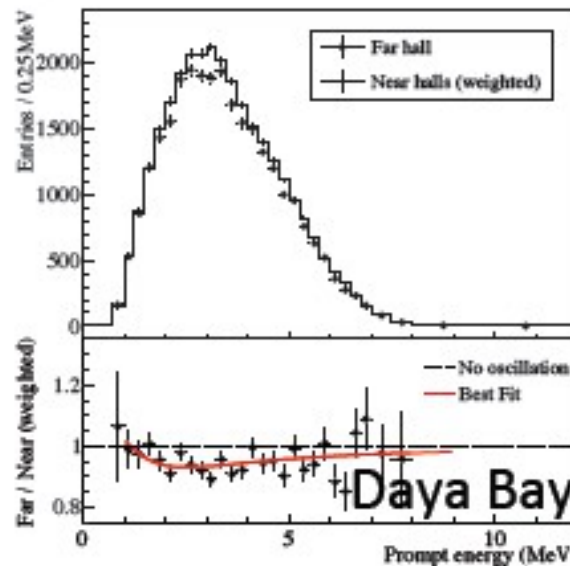
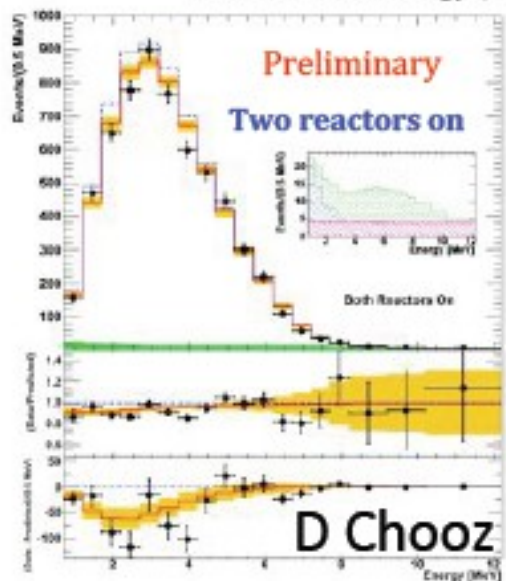
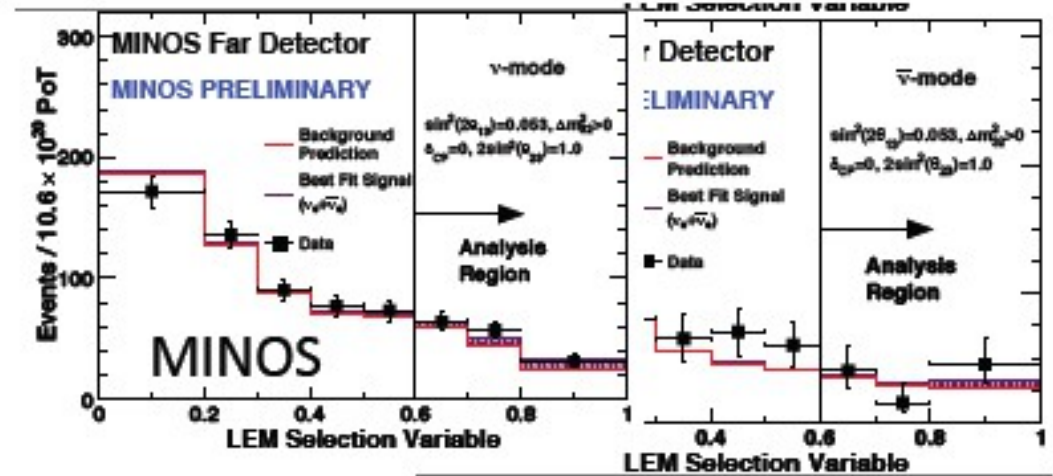
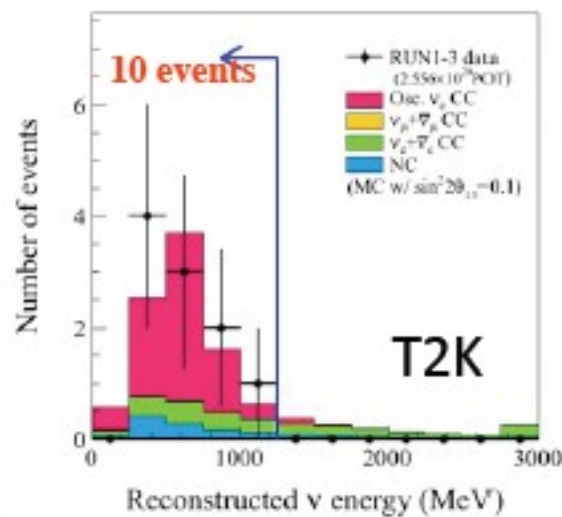
# Comparison of proposal sensitivities







This is the first conference of this series  
 the three lepton mixing angles are known





## Numerical $1\sigma$ , $2\sigma$ , $3\sigma$ ranges:

G.Fogli

Parameter	Best fit	$1\sigma$ range	$2\sigma$ range	$3\sigma$ range
$\delta m^2/10^{-5} \text{ eV}^2$ (NH or IH)	7.54	7.32 – 7.80	7.15 – 8.00	6.99 – 8.18
$\sin^2 \theta_{12}/10^{-1}$ (NH or IH)	3.07	2.91 – 3.25	2.75 – 3.42	2.59 – 3.59
$\Delta m^2/10^{-3} \text{ eV}^2$ (NH)	2.43	2.34 – 2.50	2.26 – 2.58	2.15 – 2.66
$\Delta m^2/10^{-3} \text{ eV}^2$ (IH)	2.42	2.32 – 2.49	2.25 – 2.56	2.14 – 2.65
$\sin^2 \theta_{13}/10^{-2}$ (NH)	2.45	2.14 – 2.79	1.81 – 3.11	1.49 – 3.44
$\sin^2 \theta_{13}/10^{-2}$ (IH)	2.46	2.15 – 2.80	1.83 – 3.13	1.50 – 3.47
$\sin^2 \theta_{23}/10^{-1}$ (NH)	3.98	3.72 – 4.28	3.50 – 4.75	3.30 – 6.38
$\sin^2 \theta_{23}/10^{-1}$ (IH)	4.08	3.78 – 4.43	3.55 – 6.27	3.35 – 6.58
$\delta/\pi$ (NH)	0.89	0.45 – 1.18	—	—
$\delta/\pi$ (IH)	0.90	0.47 – 1.22	—	—

Note: above ranges obtained for "old" reactor fluxes. For "new" fluxes, ranges are shifted (by  $\sim 1/3 \sigma$ ) for two parameters only:  $\Delta \sin^2 \theta_{12}/10^{-1} \simeq +0.06$  and  $\Delta \sin^2 \theta_{13}/10^{-2} \simeq +0.10$

### Fractional $1\sigma$ accuracy [defined as $1/6$ of $\pm 3\sigma$ range]

$\delta m^2$	$\sin^2 \theta_{12}$	$\sin^2 \theta_{13}$	$\sin^2 \theta_{23}$	$\Delta m^2$
2.6%	5.4%	13%	13%	3.5%

We were already in the **precision era** for  $\nu$  physics!

Possible tension btw Kamland and solar  $\Delta m^2$

So, the most interesting and urgent questions for global analyses remain: the  $\theta_{23}$  **octant** and (to some extent)  $\delta_{CP}$ . Difficult to attack the **hierarchy** with current data.

O planach na przyszłość słyszeliśmy tydzień temu

# Podsumowanie

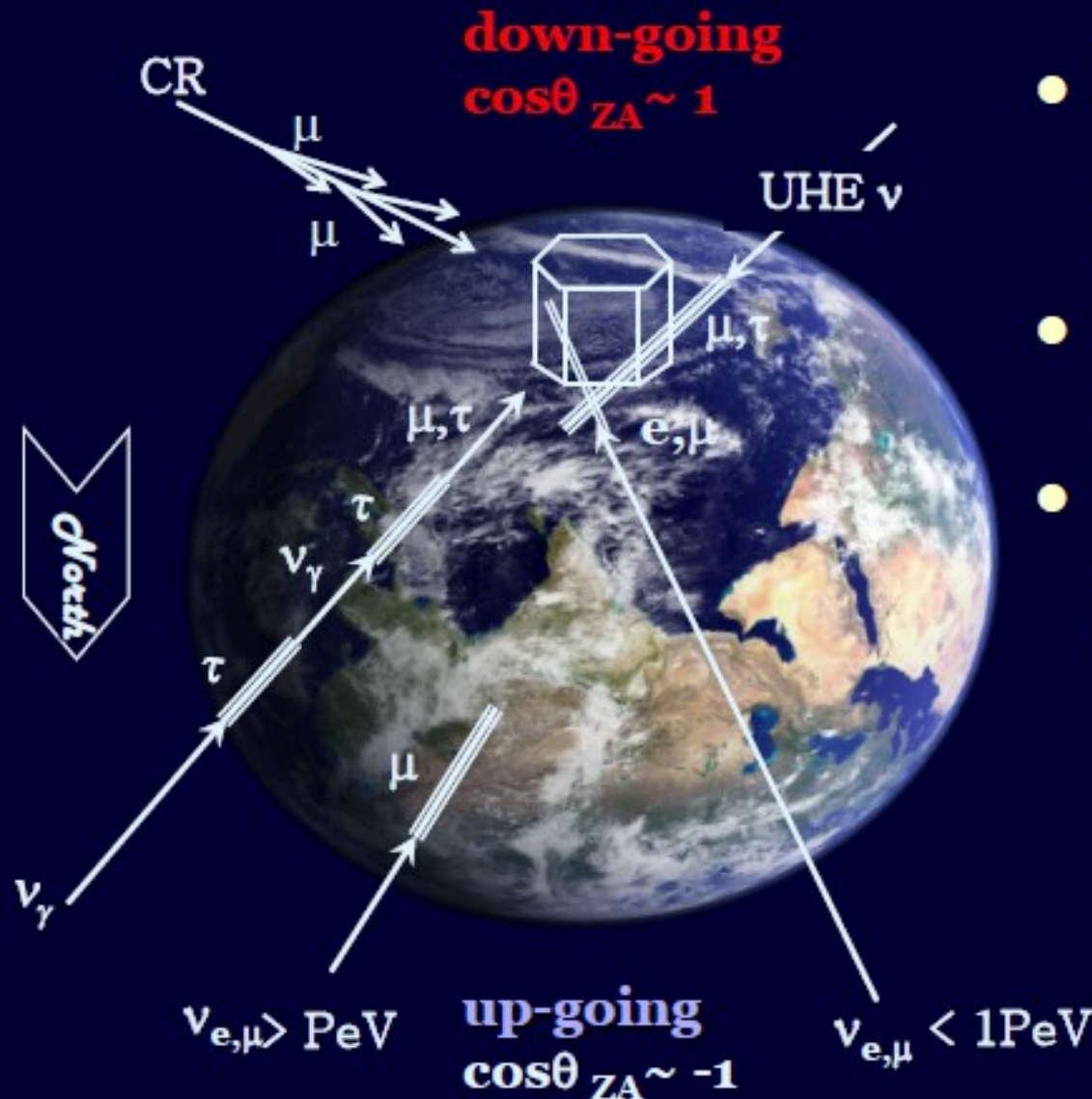
- Japońskie konferencje:
  - Sendai, 1986 – anomalie w neutrinach atmosferycznych (Kamiokande i IMB)
  - Takayama, 1998 – odkrycie oscylacji neutrin atmosferycznych
  - Kioto, 2012 – pomiar kąta  $\theta_{13}$
- 2014 – Boston, 2-7.06
- 2016 – Londyn, lipiec
- 2018 - Heidelberg
- 2020 – ? – Chicago, Seul, Minneapolis...
- 2030 – setna rocznica „urodzin” koncepcji Pauliego – Zurych?



# Backup slides



# UHE Neutrinos In the Earth...



- Generally neutrinos identified as “through the Earth” up-going events
- Earth is opaque for UHE neutrinos
- UHE neutrino-induced events are coming from above and near horizontal direction

UHE neutrino mean free path

$$\lambda_n \sim 100 \text{ km} \ll R_{\text{Earth}}$$

$$\sigma_{nN}^{cc} \sim 10^{-6 \sim -4} \text{ mb}$$

# Masy neutrin

- oscylacje neutrin (różnice kwadratów, dolne ograniczenie)

- pomiar widma elektronów w rozpadzie trytu

$$m_{\beta} = \left[ c_{13}^2 c_{12}^2 m_1^2 + c_{13}^2 s_{12}^2 m_2^2 + s_{13}^2 m_3^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

- podwójny bezneutrinowy rozpad beta (zależny od modelu)

$$m_{\beta\beta} = \left| c_{13}^2 c_{12}^2 m_1 + c_{13}^2 s_{12}^2 m_2 e^{i\phi_2} + s_{13}^2 m_3 e^{i\phi_3} \right|$$

- ograniczenie kosmologiczne (zależne od modelu)

$$\Sigma m < 0.3 \text{eV}$$

- przygotowywane eksperymenty:

- KATRIN (spektrometr, rozpadu trytu), ← start 2015
- MARE, ECHO (bolometr, rozpad renu, holmu),
- Project 8 (częstość cyklotronowa, rozpad kryptonu)

# Podwójny bezneutrinowy rozpad beta

- Ograniczenia:

- KamLand ZEN: ksenon 136, 38.6 kg\*rok:  
 $\tau > 6.2 \cdot 10^{24}$  lat,  $m < 260\text{-}540\text{meV}$  (90%CL)
- EXO: ksenon 136, 23,5 kg\*rok:  
 5 przypadków przy spodziewanym tle 7.5,  $\tau > 1.6 \cdot 10^{25}$  lat,  
 $m < 140\text{-}280\text{meV}$  (90%CL)

