

# Neutrino (2)

## Elementy fizyki cząstek elementarnych

### Wykład VIII

- Neutrino słoneczne
- Wyniki Super-Kamiokande
- Eksperyment SNO
- Eksperyment Kamland
- Podsumowanie

# Przypomnienie

## Wyniki LSND

Zmierzono przypadki odpowiadające reakcji



Reakcja z łamaniem zasady zachowania liczby leptonowej ?

Czy oscylacja  $\nu_{\mu} \leftrightarrow \nu_e$  ?...

## Wyniki Super-Kamiokande

Obserwacja **neutrin atmosferycznych**

- **neutrina elektronowe**
  - ⇒ strumień zgodny z przewidywaniami modelu
  - ⇒ tyle samo neutrin “do góry” co “do dołu”
- **neutrina mionowe**
  - ⇒ strumień “do dołu” zgodny z przewidywaniami
  - ⇒ **deficyt**  $\sim 50\%$  neutrin lecących “do góry”

Wyniki zgodne z hipotezą oscylacji  $\nu_{\mu} \leftrightarrow \nu_{\tau}$ .

Dopasowane parametry:

$$\sin^2 2\theta_{\mu\tau} = 1.00 \quad \Delta m_{\mu\tau}^2 = 0.0025 \text{ eV}^2$$

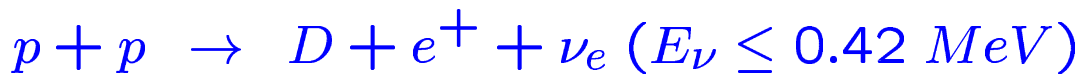
Wyniki potwierdzone przez K2K.

# Neutrina słoneczne

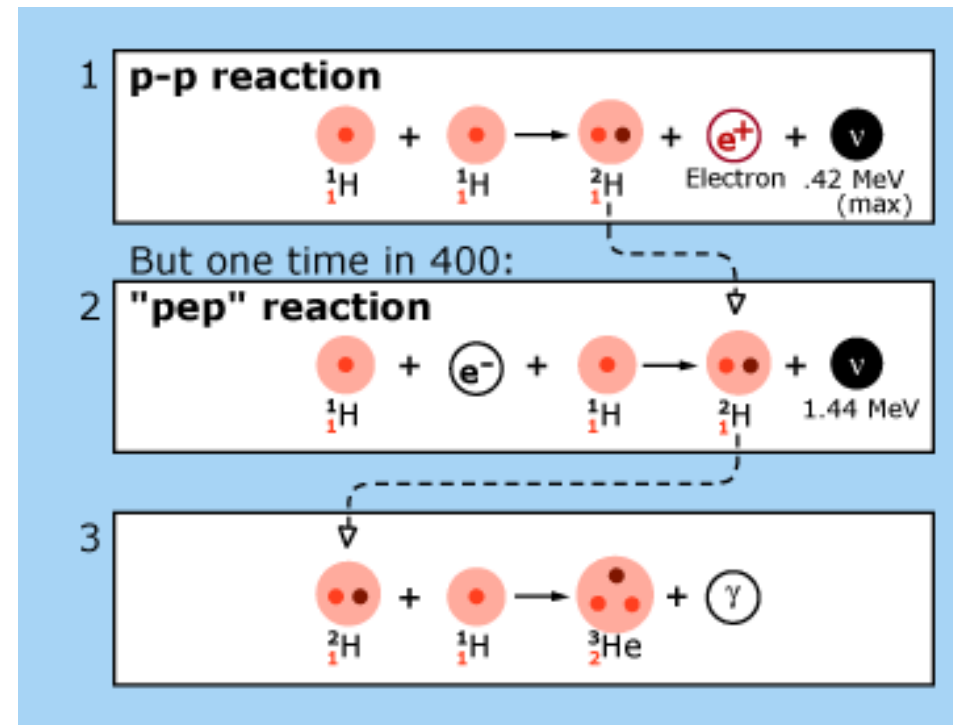
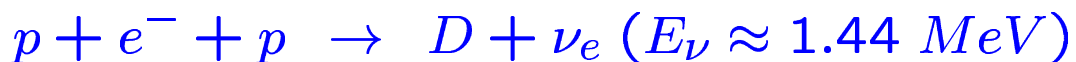
## Produkcja neutrin

Słońce jest nie tylko źródłem promieniowania elektromagnetycznego, ale też niezwykle intensywnym źródłem neutrin elektronowych.

Ogromna **większość** neutrin pochodzi z reakcji **p-p**:



jednak **wyższe energie** uzyskują neutrina z reakcji **"pep"**:

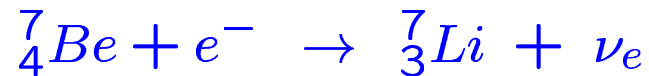


# Neutrina słoneczne

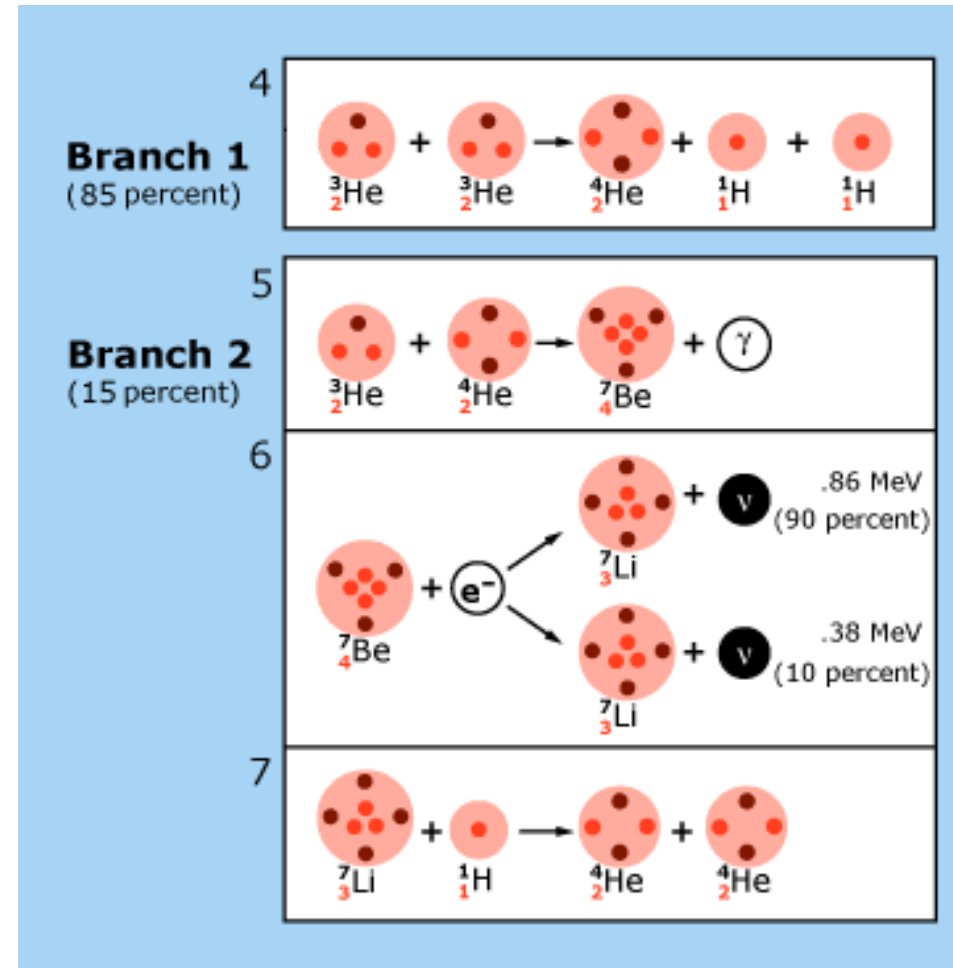
## Produkcja neutrin

Dalsze reakcje syntezy  ${}^3\text{He}$ ,  ${}^4\text{He}$ ,  ${}^7\text{Be}$  i  ${}^7\text{Li}$  prowadzą do emisji dodatkowych neutrin.

Neutrino z przemiany  ${}^7\text{Be}$



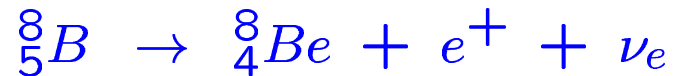
mają jednak energie **poniżej 1 MeV**



# Neutrina słoneczne

## Produkcja neutrin

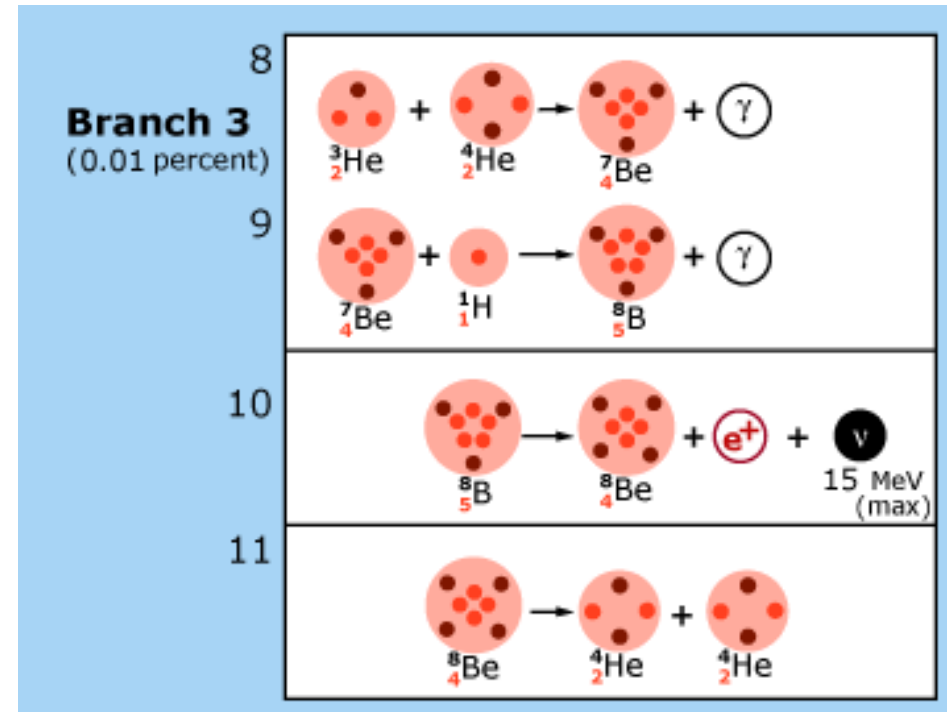
Źródłem wysokoenergetycznych neutrin jest przemiana  ${}^8\text{B}$



w której energia emitowanych neutrin dochodzi do **15 MeV**

Tylko te neutrina mogą być mierzone w detektorach cząstek elementarnych.

Np. w Super-Kamiokande mierzymy neutrina o  $E_\nu > 5-7 \text{ MeV}$ ...



# Neutrina słoneczne

## Widmo energii

Widmo energii **neutrino elektronowych** produkowanych w reakcjach jądrowych na słońcu  $\Rightarrow$

**Strumień neutrino** o energiach poniżej kilku MeV może być zmierzony **metodami radiochemicznymi**: mierzymy produkcję powstających **izotopów**:

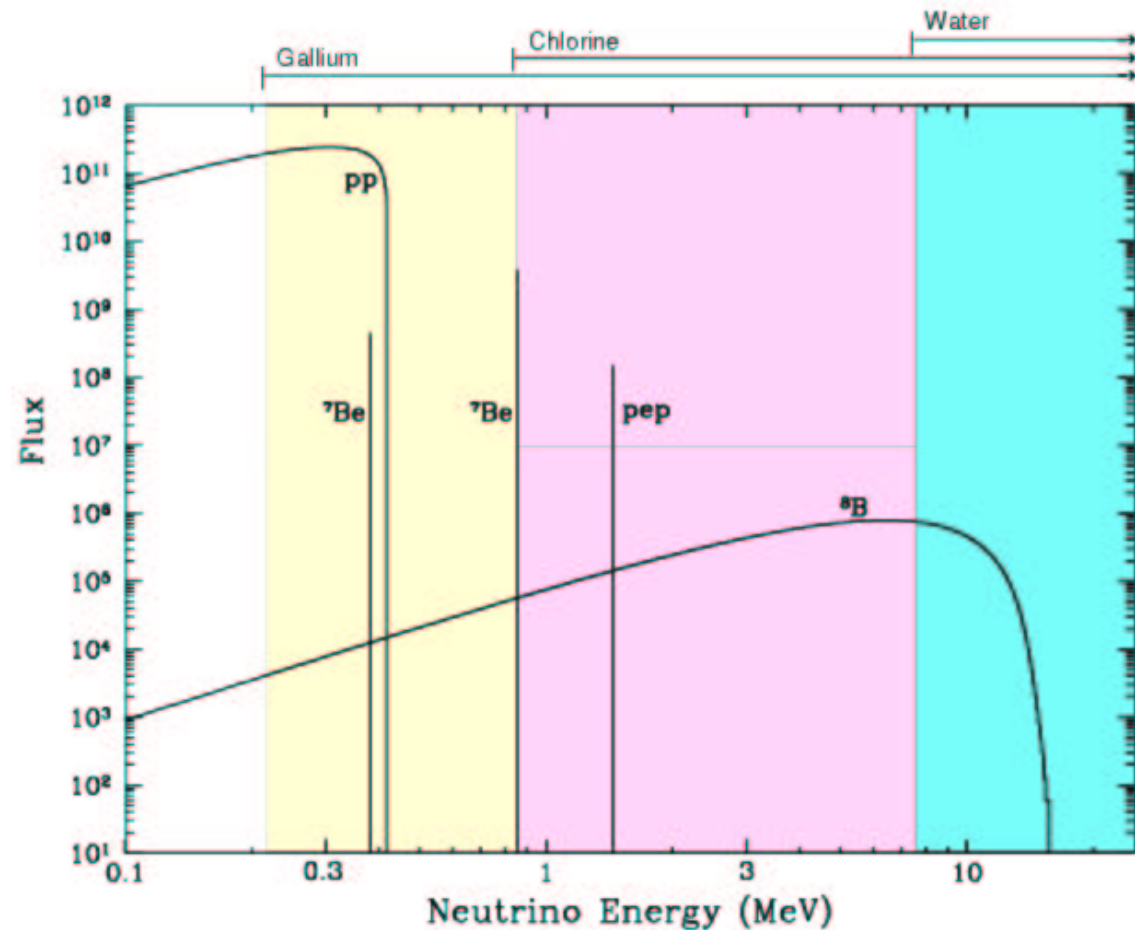


(eksperyment Homestake)



(SAGE, GALLEX, GNO)

**Tylko neutrino elektronowe !**



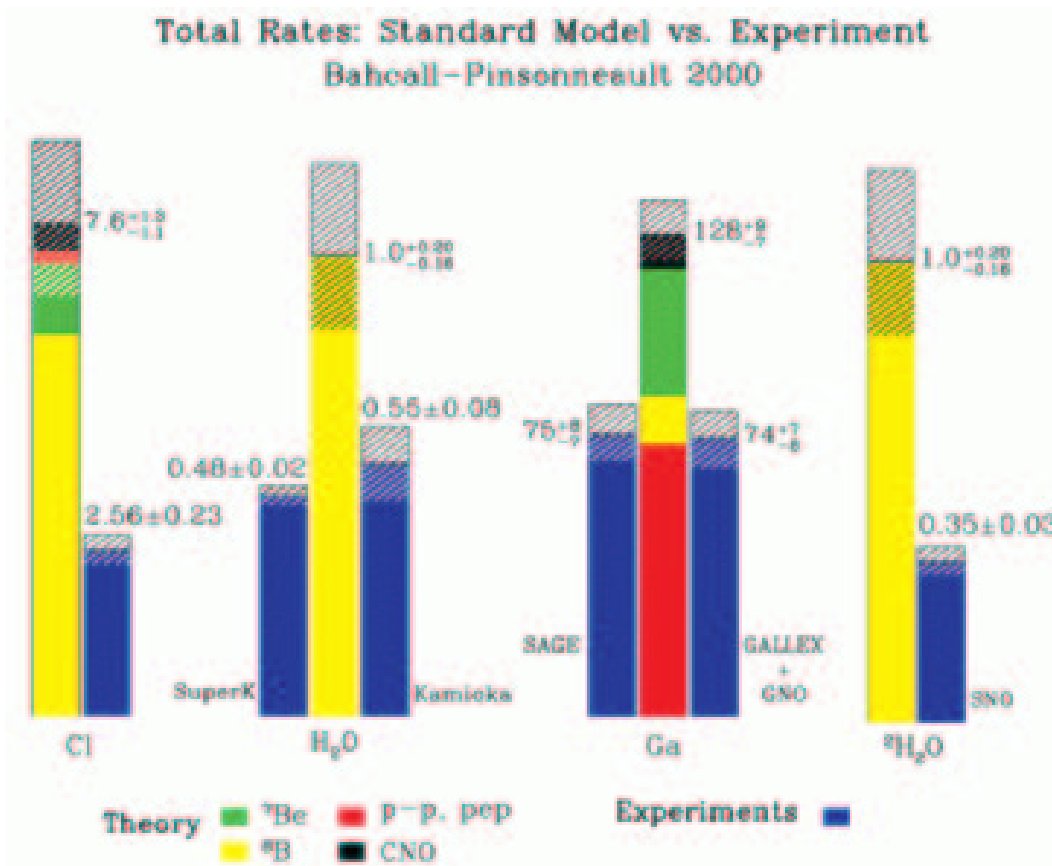
Ga

Cl

woda

# Neutrina słoneczne

## Deficyt neutrin słonecznych



Wszystkie przeprowadzone eksperymenty wykazały, że dociera do nas zbyt mało neutrin !

Aby wytłumaczyć wyniki pomiarów trzeba by założyć, że:

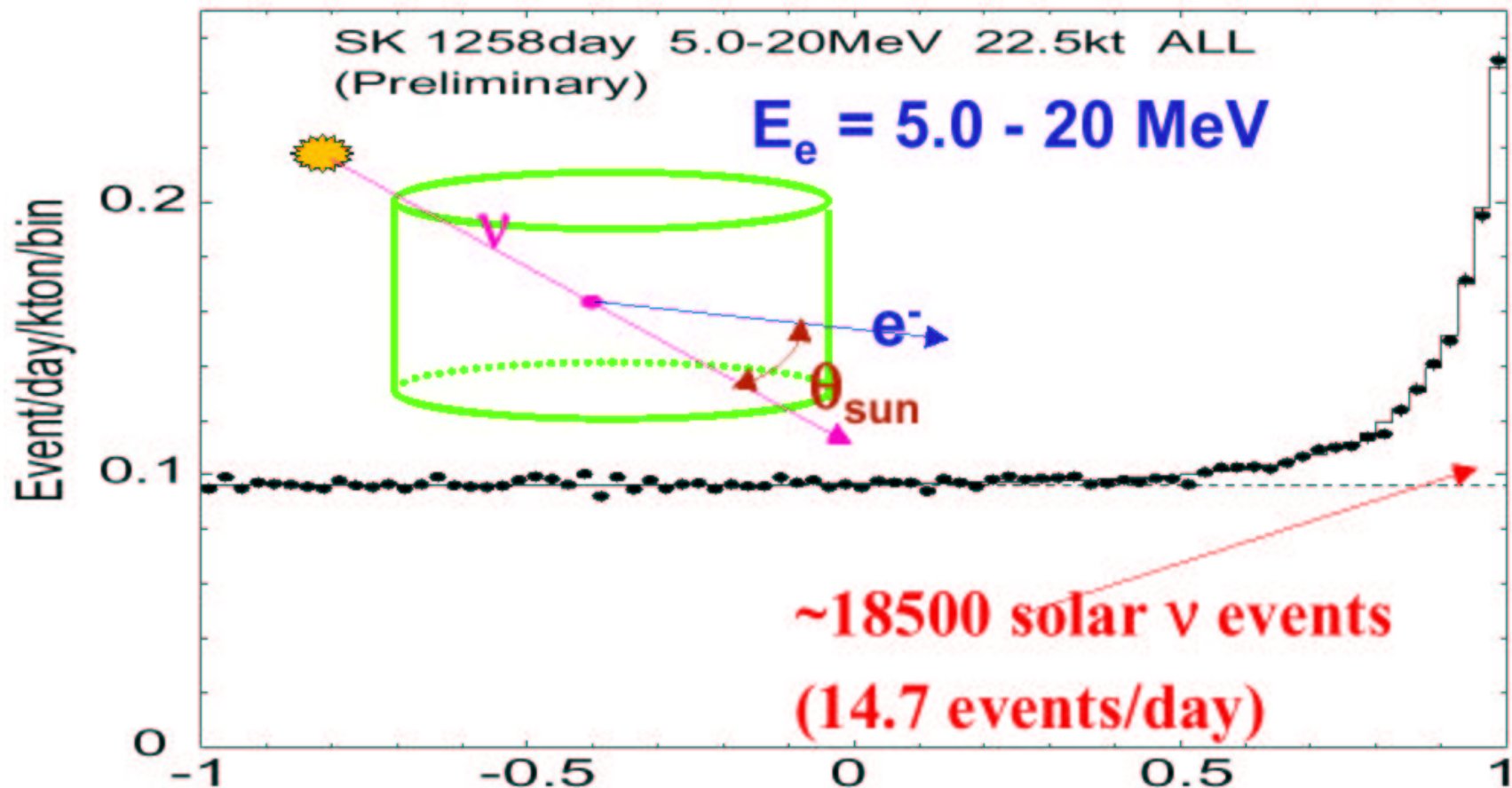
- reakcja  ${}^8_5B \rightarrow {}^8_4Be + e^+ + \nu_e$  zachodzi  $2 \times$  rzadziej
- reakcja  ${}^7_4Be + e^- \rightarrow {}^7_3Li + \nu_e$  wogóle nie zachodzi !...

Ale Słońce świeciłoby wtedy zupełnie inaczej...

# Super-Kamiokande

## Obserwacja neutrin słonecznych

Oddziaływania **neutrin słonecznych** możemy odróżnić od oddziaływań neutrin atmosferycznych mierząc **kąt rozproszenia** elektronu względem **kierunku od słońca**:

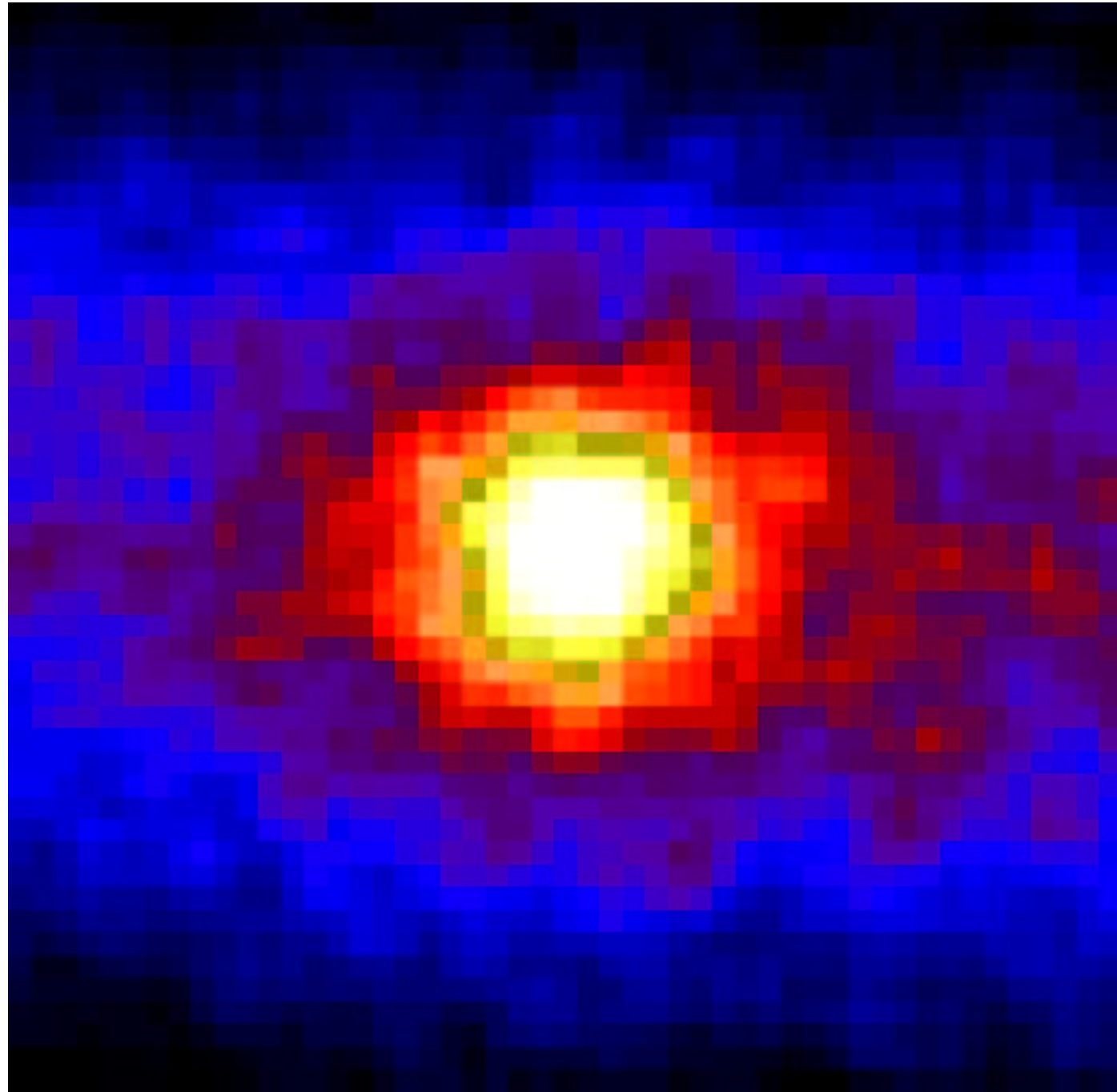




## Super-Kamiokande

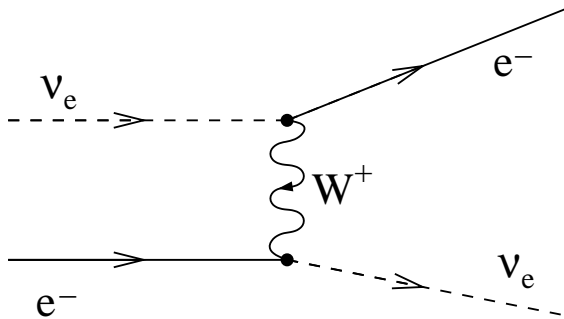
“Zdjęcie” Słońca  
w “świele” neutrin

rzeczywisty rozmiar  
Słońca  $\sim \frac{1}{2}$  pixla

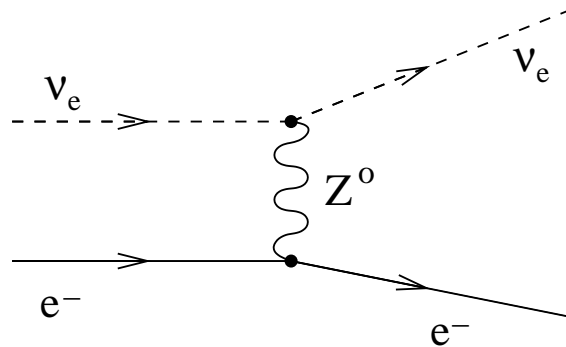
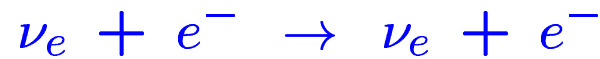


# Super-Kamiokande

Neutrina słoneczne obserwowane w SK pochodzą głównie z reakcji typu CC

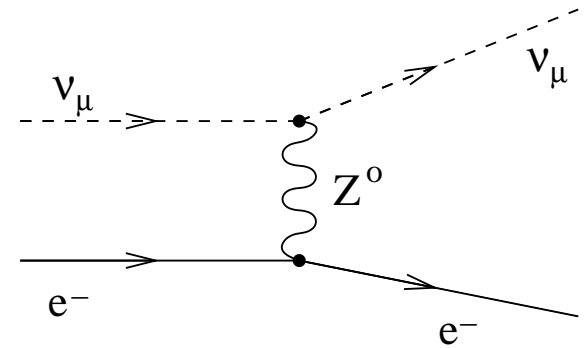


Możliwa jest też detekcja  $\nu_e$  poprzez proces typu NC:



przekrój czynny  $\sim 5$  razy mniejszy...

Ale proces typu NC możliwy jest też dla innych neutrin, np:



(także dla  $\nu_\tau$ )

Pomiar Super-Kamiokande:

$$\Phi^{SK} \approx \Phi_{\nu_e} + 0.154 \cdot (\Phi_{\nu_\mu} + \Phi_{\nu_\tau})$$

# Super-Kamiokande

## Deficyt neutrin słonecznych

Obserwowany **kształt rozkładu energii** neutrin słonecznych zgadza się **bardzo dobrze** z SSM (Standard Solar Model).

Obserwujemy jednak jedynie ok. **45%** oczekiwanych **przypadków** (neutrin elektronowych ?!):

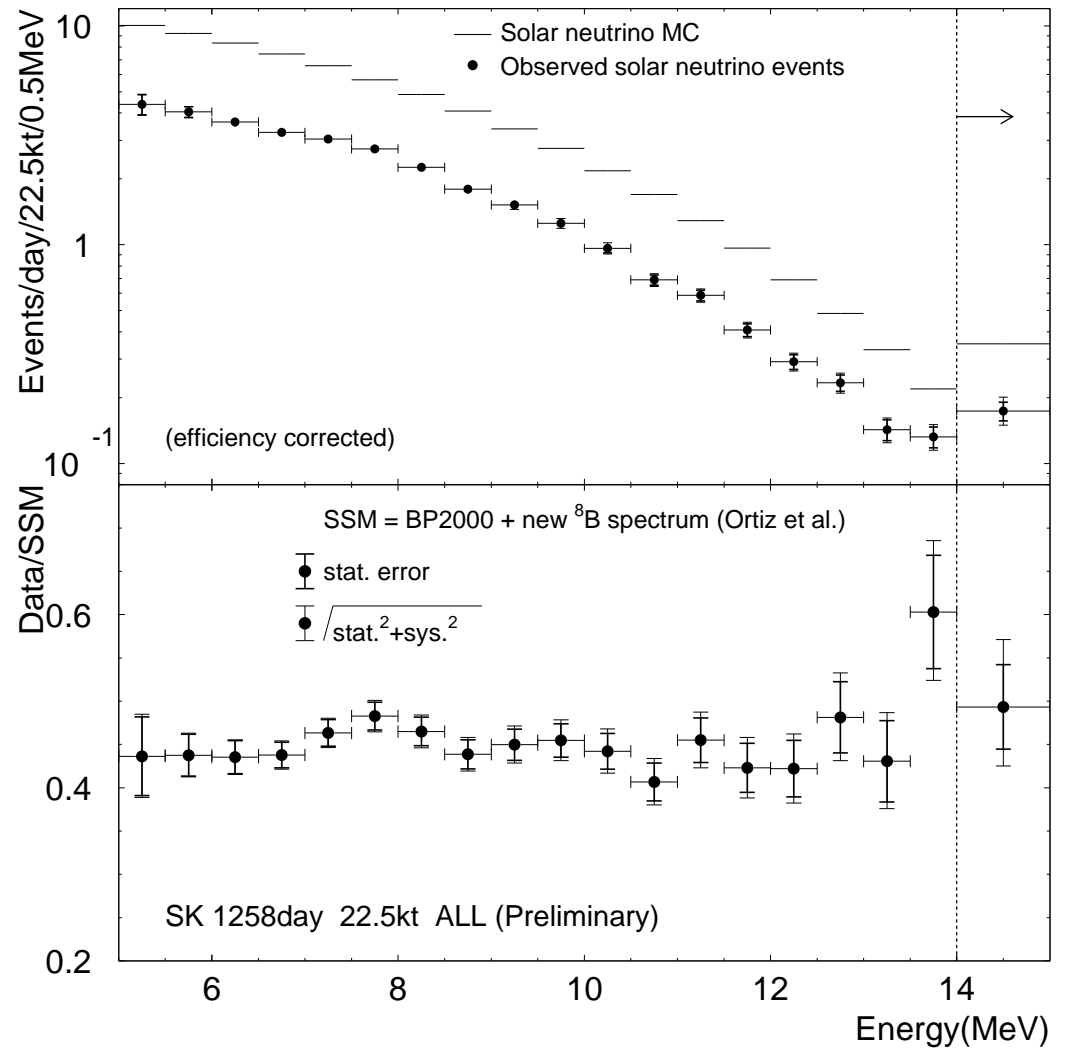
$$N^{SSM} = 48\,200 \quad \text{oczekiwanych}$$

$$N^{SK} = 22\,400 \quad \text{zmierzonych}$$

$$\frac{SK}{SSM} = 0.465 \pm 0.005 \begin{matrix} +0.016 \\ -0.015 \end{matrix}$$

**Deficyt neutrin elektronowych...**

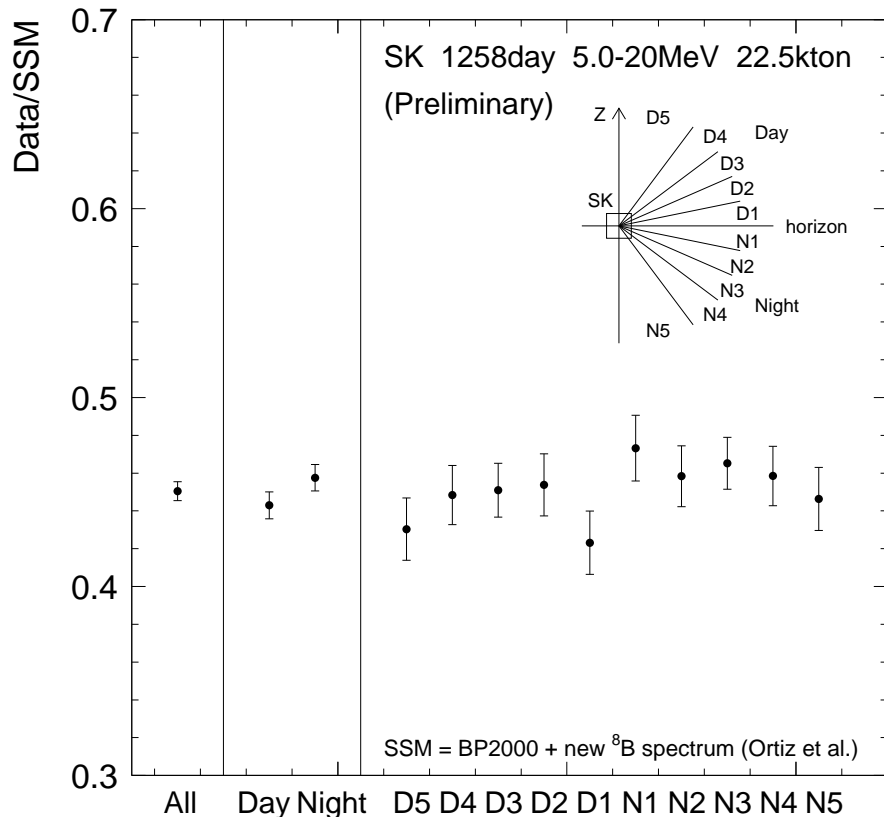
**Może to znowu oscylacje !?...**



# Super-Kamiokande

## Efekt dzień–noc

Strumień neutrin słonecznych  
mierzony w różnych porach **dnia** i **nocy**:



Porównując strumień mierzony **w dzień** (“od góry”) i **w nocy** (“od dołu”), możemy sprawdzić **oscylacje** na odległości  $\sim$  średnicy **Ziemi**

**Nie obserwujemy zmian** związanych z przechodzeniem neutrin przez Ziemię

$\Rightarrow$  ewentualne **oscylacje**  $\nu_e$  dużo **słabsze** niż dla  $\nu_\mu$  (**oscylacje neutrin atmosferycznych**)

Wszystkie pomiary neutrin słonecznych można wytłumaczyć przyjmując ( $X = \mu$  lub  $\tau$ ):

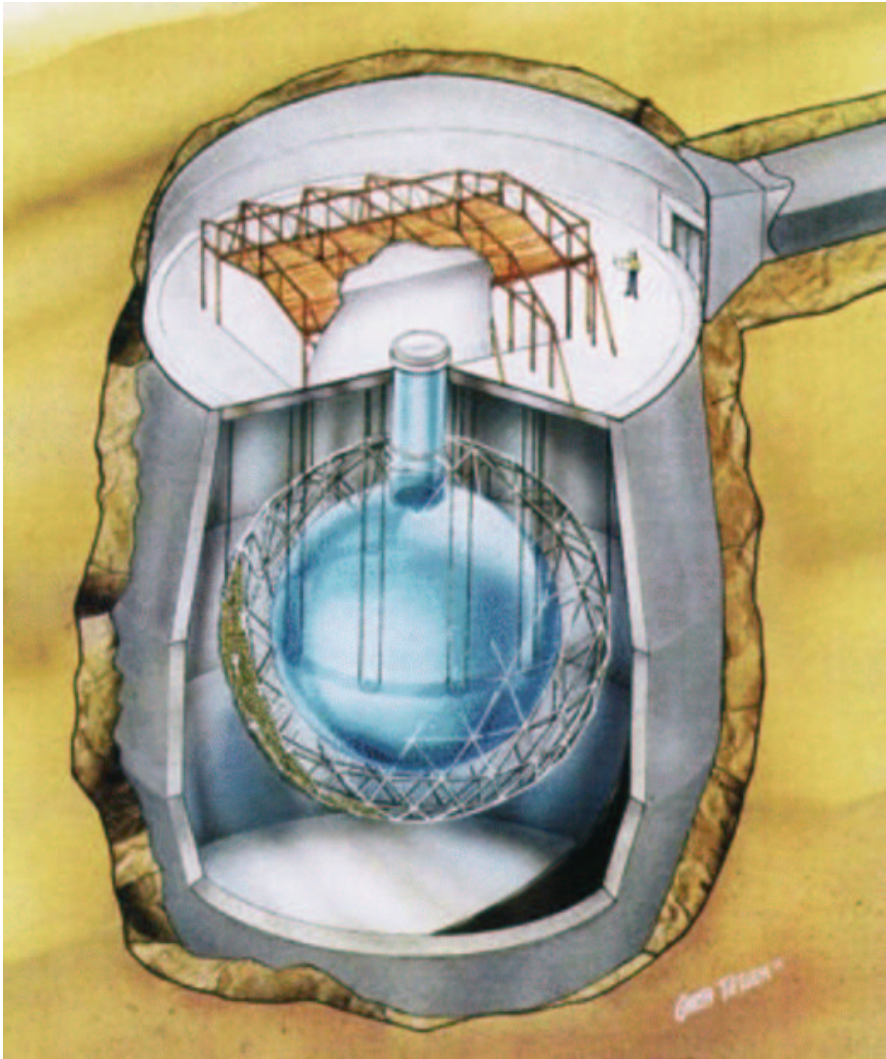
$$\sin^2 2\theta_{eX} \sim 0.80$$

$$\Delta m_{eX}^2 \sim 0.00005 \text{ eV}^2$$

parametry oscylacji  $\nu_e \longleftrightarrow \nu_X$

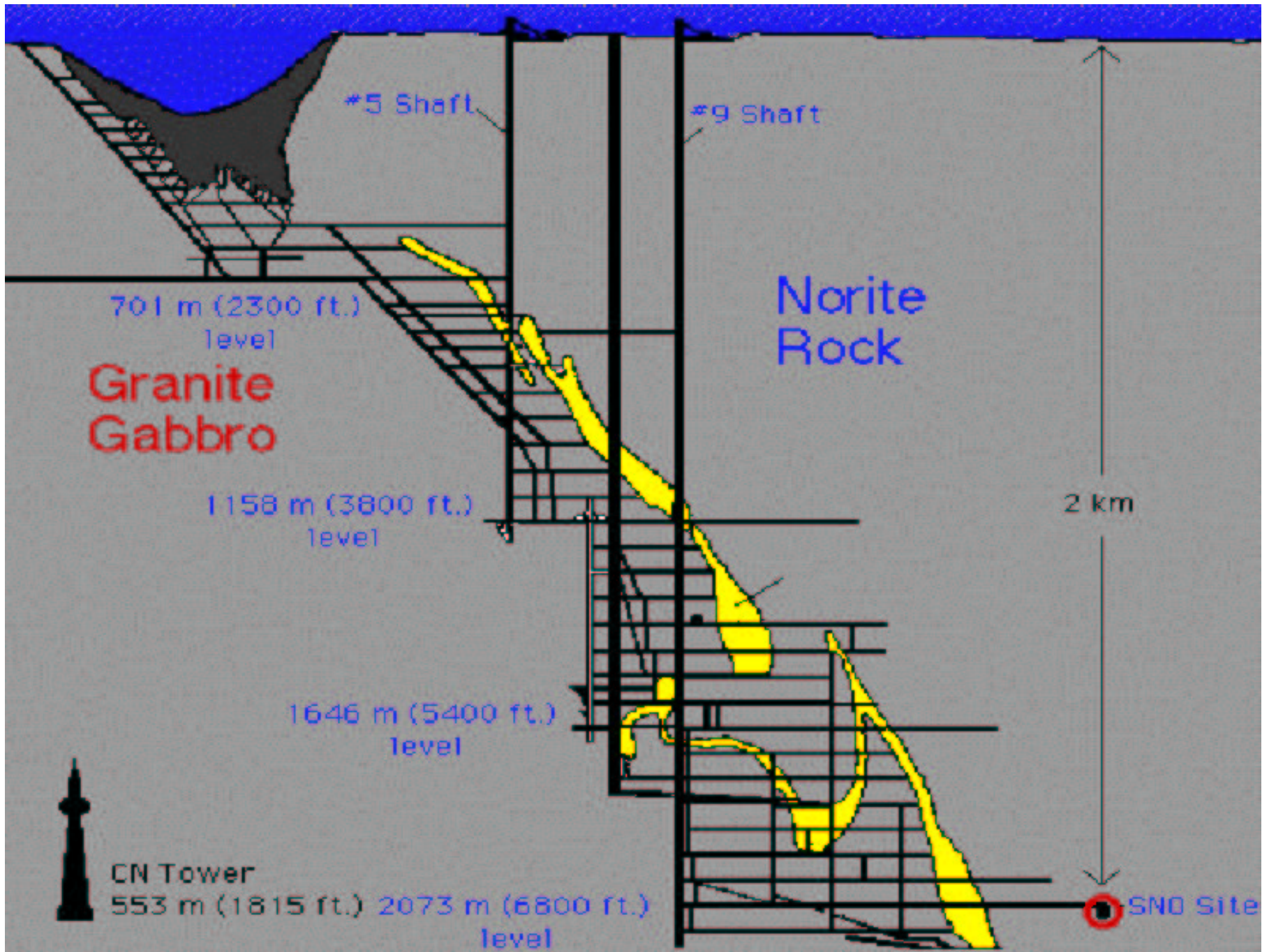
# SNO

## Eksperyment SNO (Sudbury Neutrino Observatory)



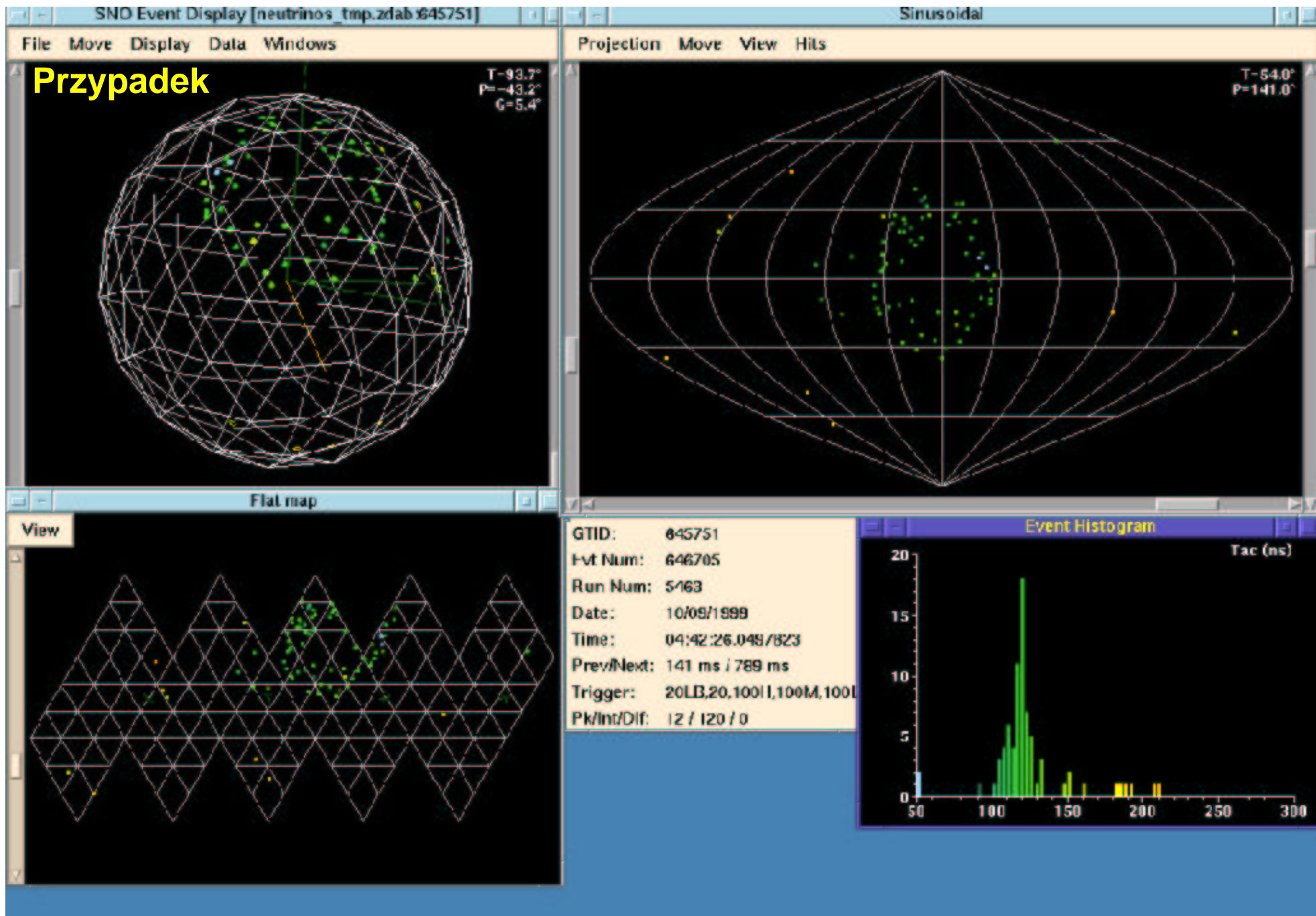
- ogromny zbiornik wypełniony 7000 t wody ( $H_2O$ )
- w środku kula wypełniona 1000 t ciężkiej wody ( $D_2O$ )
- promieniowanie Czerenkowa mierzone przez ok. 9500 fotopowielaczy.
- całość umieszczona na głębokości ponad 2000 m

# SNO



## Fotopowielacze







# SNO

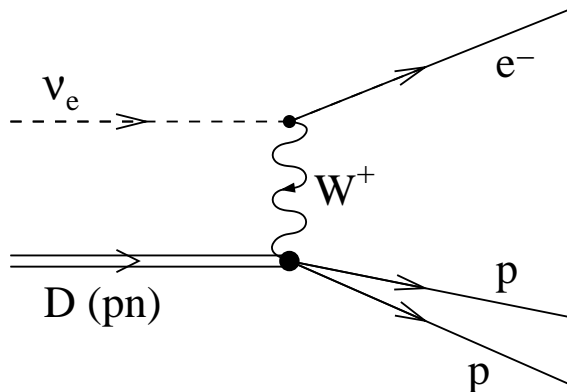
## Detekcja neutrin

Jak w SK możemy zmierzyć sygnał pochodzący z rozpraszania neutrin na elektronach:



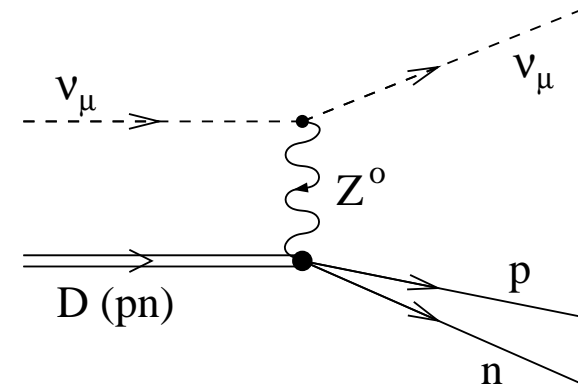
$$\sim \Phi_{\nu_e} + 0.154 \cdot (\Phi_{\nu_\mu} + \Phi_{\nu_\tau}) \Rightarrow \text{informacja o wszystkich typach neutrin}$$

Zastosowanie ciężkiej wody umożliwia dodatkowo pomiar rozpraszania na deuterze:



$$\sim \Phi_{\nu_e}$$

$\Rightarrow$  informacja o **neutrinach elektronowych**



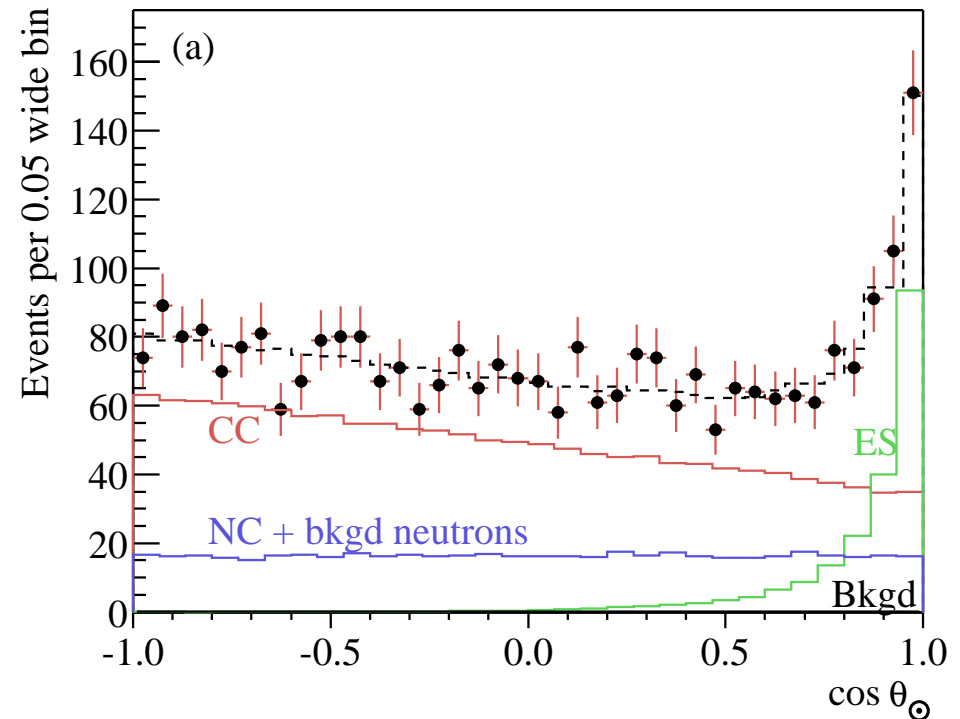
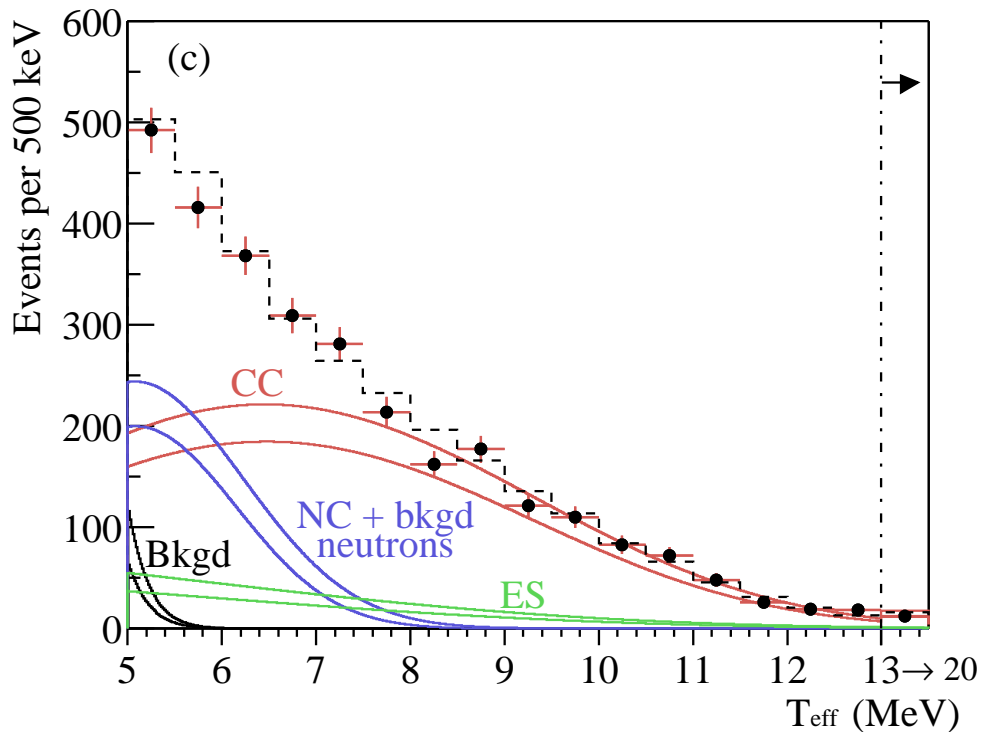
$$\sim \Phi_{\nu_e} + \Phi_{\nu_\mu} + \Phi_{\nu_\tau}$$

$\Rightarrow$  informacja o **wszystkich neutrinach**

# SNO

## Wyniki

Wkłady od poszczególnych procesów można rozdzielić na podstawie mierzonych rozkładów energii i kąta rozproszenia:



# SNO

## Wyniki

Z dopasowania uzyskujemy  
(w jednostkach  $10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ):

$$\Phi_{CC} = 1.76 \pm 0.05 \pm 0.09 = \Phi_{\nu_e}$$

$$\begin{aligned} \Phi_{ES} &= 2.39 \pm 0.24 \pm 0.12 \\ &= \Phi_{\nu_e} + \varepsilon(\Phi_{\nu_\mu} + \Phi_{\nu_\tau}) \\ &\quad (\text{SK} : 2.32 \pm 0.09) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi_{NC} &= 5.09 \pm 0.44 \pm 0.46 \\ &= \Phi_{\nu_e} + \Phi_{\nu_\mu} + \Phi_{\nu_\tau} \end{aligned}$$

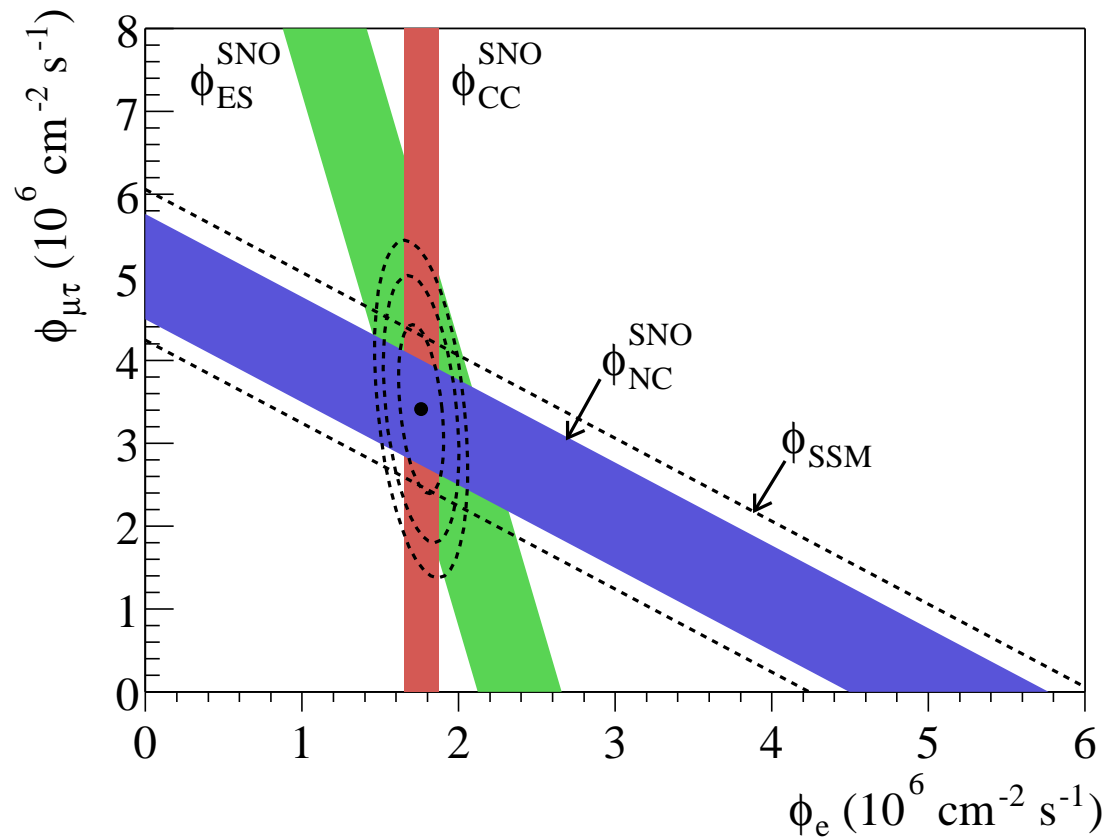
Przewidywania SSM

$$\Phi^{SSM}(\nu_e) = 5.15 \pm 0.95$$

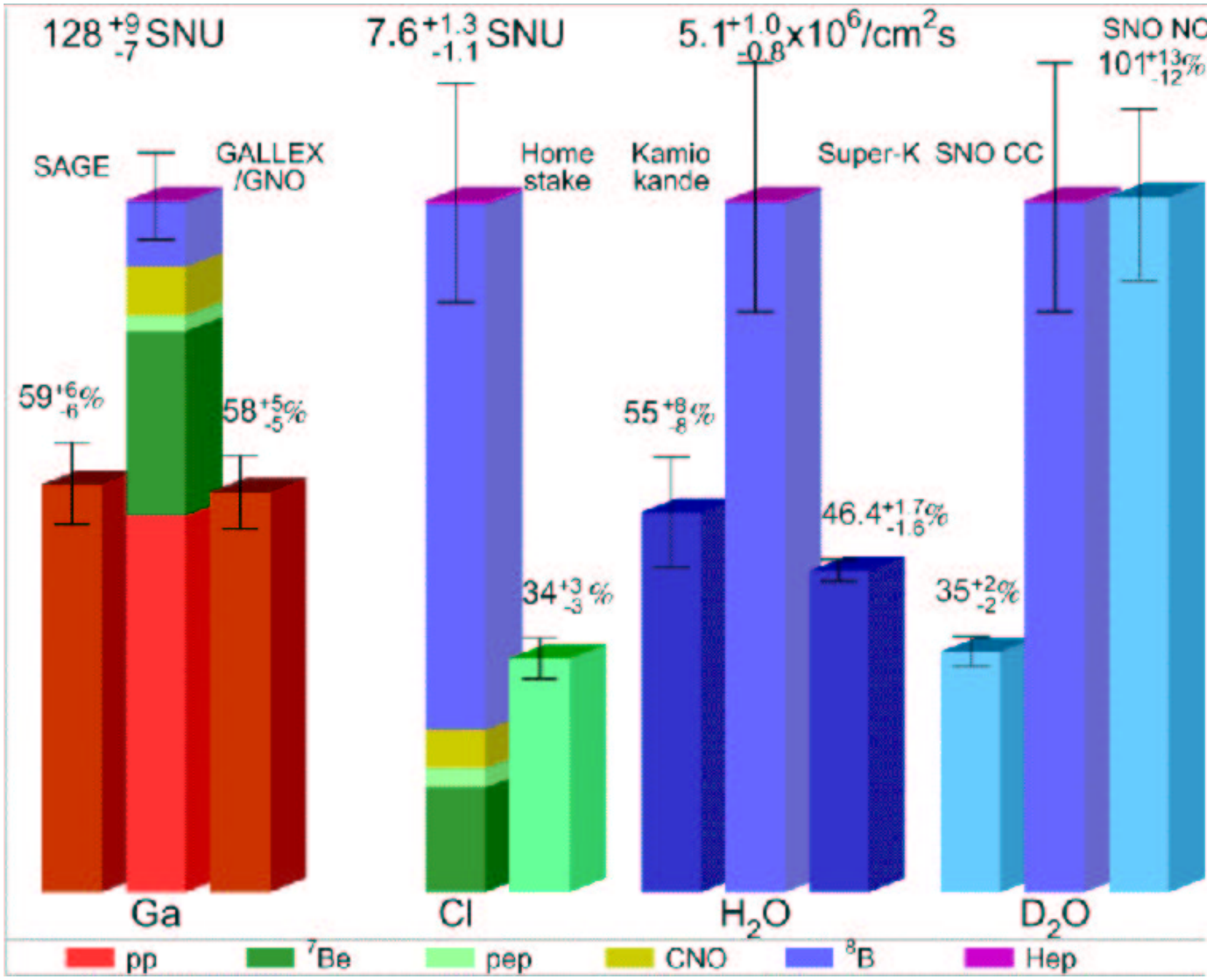
Dobra zgodność dla całkowitego strumienia neutrin.

W miejsce “brakujących”  $\nu_e$  obserwujemy  $\nu_\mu$  i  $\nu_\tau$

$$\Phi(\nu_\mu + \nu_\tau) = 3.41 \pm 0.45 \pm 0.48 \approx 2 \times \Phi_{\nu_e} \quad (\text{po równo})$$



Nowe  
porównanie  
wyników



# Kamland

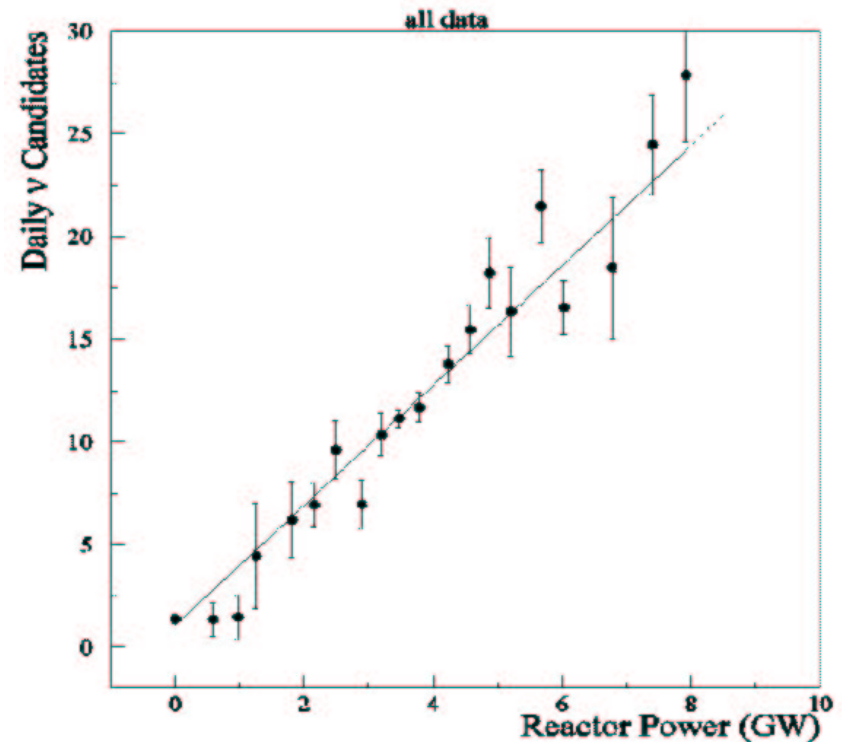
Wyniki SNO potwierdzają, że obserwowany **deficyt** neutrin słonecznych jest rezultatem **oscylacji** - “przemiany”  $\nu_e$  w inne rodzaje neutrin ( $\nu_\mu$  i  $\nu_\tau$ ).

Chcielibyśmy jednak **sprawdzić** obserwowany efekt w warunkach “laboratoryjnych”, podobnie jak w przypadku neutrin atmosferycznych (**doświadczenia z “długą bazą”**).

Intensywną “wiązkę” **anty-neutrin** elektronowych otrzymujemy z **reaktorów jądrowych** (z rozpadów neutronów).

**Strumień** neutrin jest **proporcjonalny do mocy** reaktora i można go dość dokładnie wyliczyć.

Wyniki eksperymentu **CHOOZ**  $\Rightarrow$



# Kamland

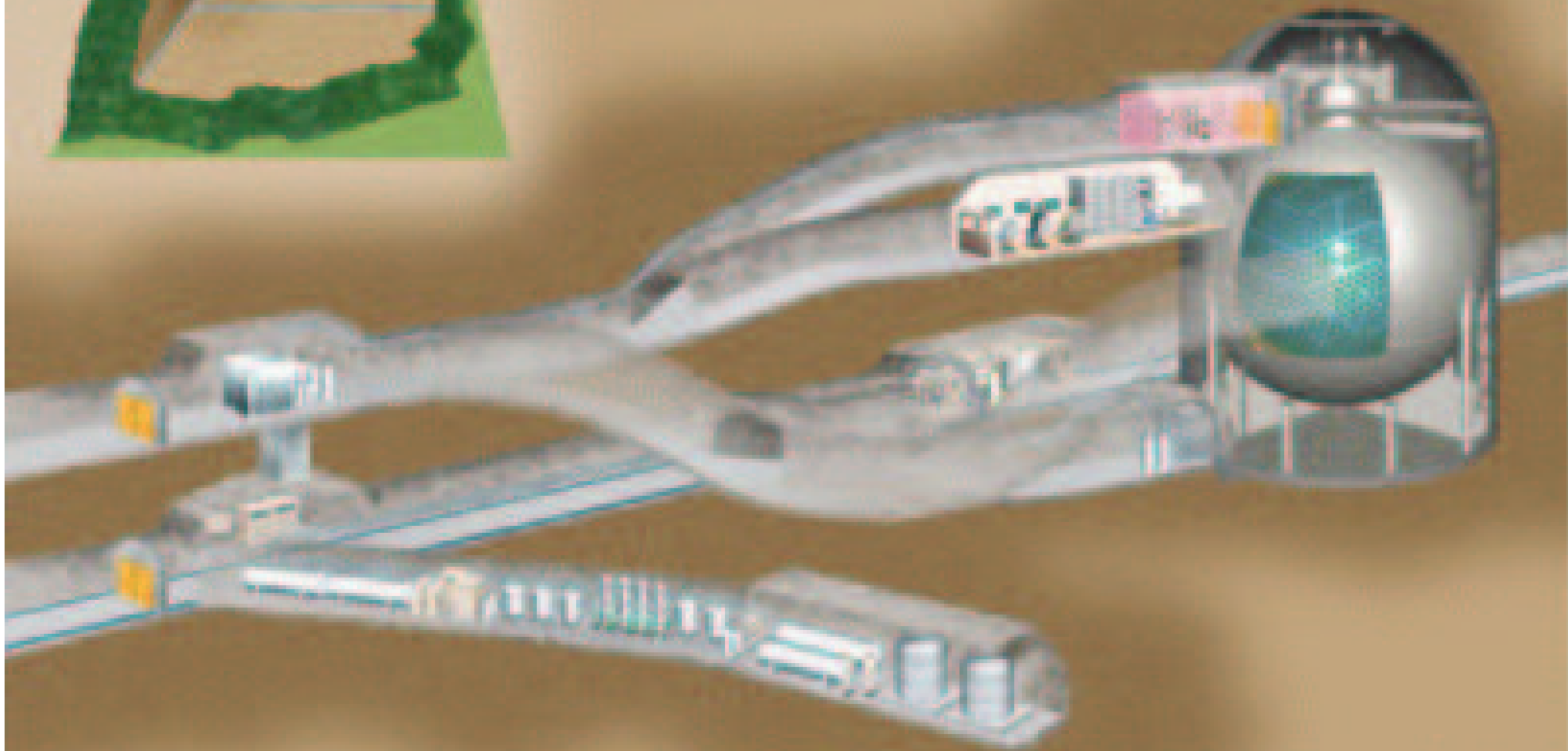
## Eksperyment Kamland



“Wymarzonym” miejscem na tego typu eksperyment jest Japonia - “mocarstwo” energetyki atomowej.

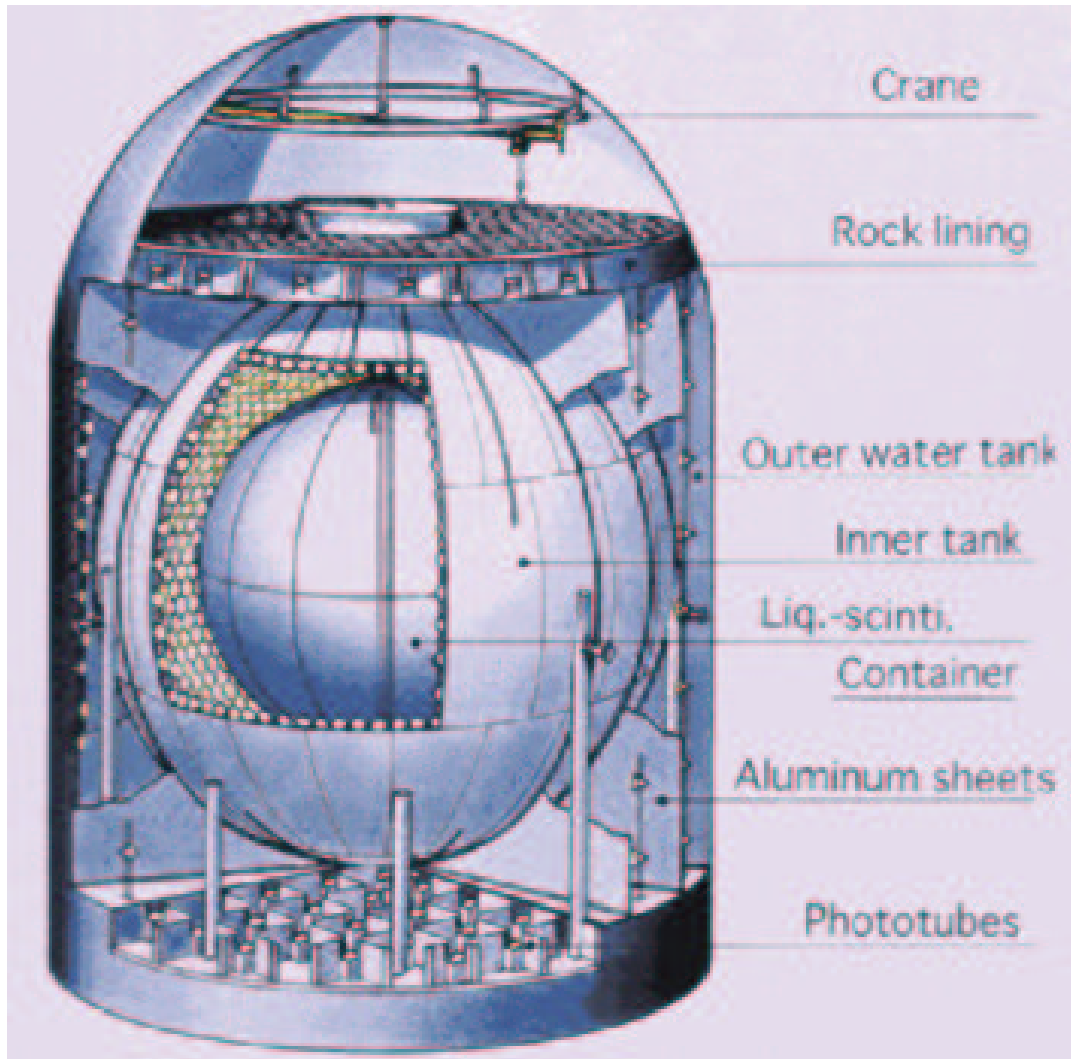
Eksperyment Kamland został zbudowany w miejscu starego eksperymentu Kamiokande, poprzednika Super-Kamiokande.

## KAMLAND, góra Kamioka, Japonia



# Kamland

## Detektor Kamland



Budowa podobna do SNO:

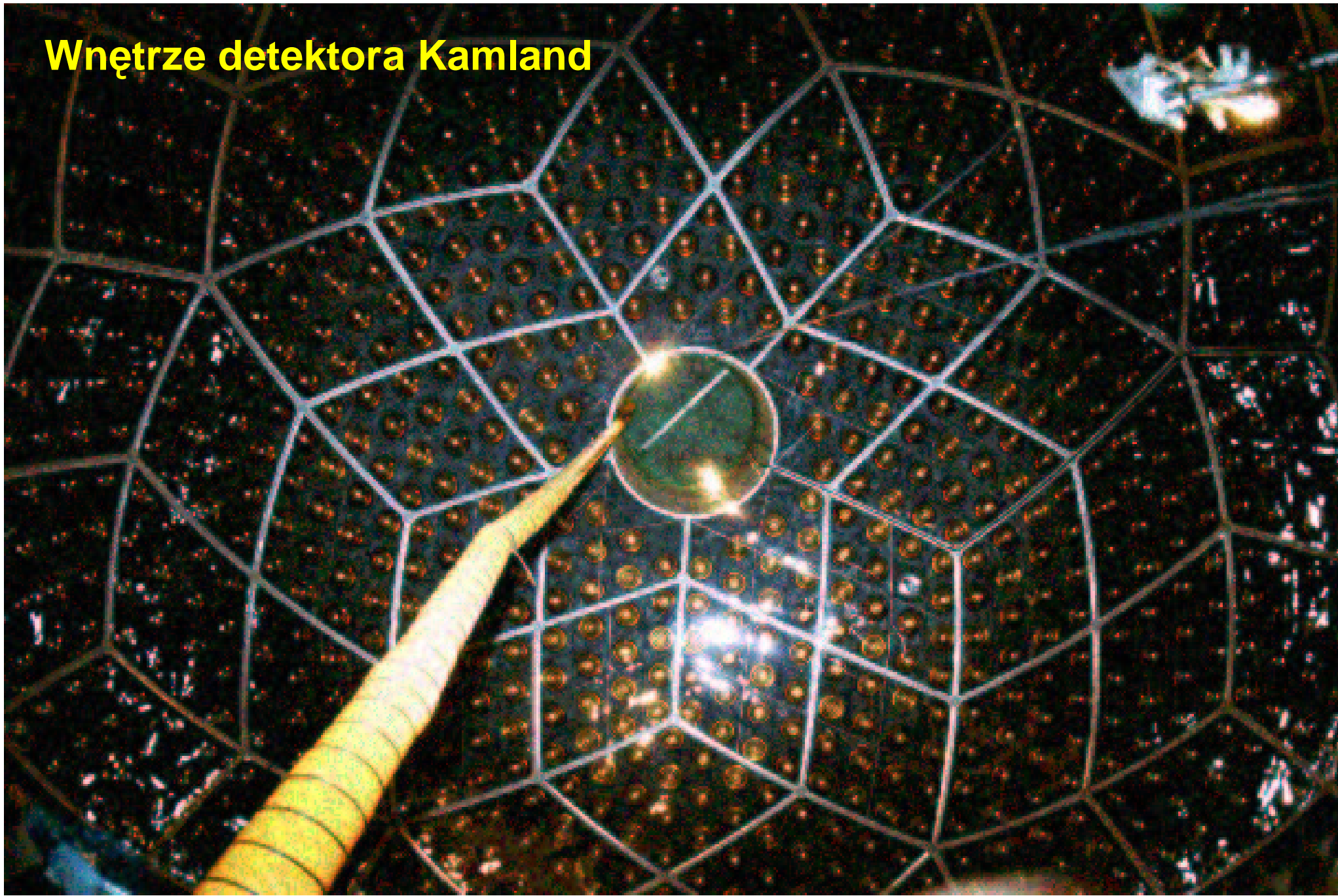
- zewnętrzny zbiornik wypełniony 3200 t wody
- wewnętrzny kulisty zbiornik wypełniony 2000 t oleju
- w środku balon wypełniony 1000 t ciekłego scyntylatora
- pomiar przy użyciu ok. 2100 fotopowielaczy.
- całość umieszczona na głębokości ok. 2700 m (“water-equivalent”)



# Detektor Kamland zbiornik wewnętrzny



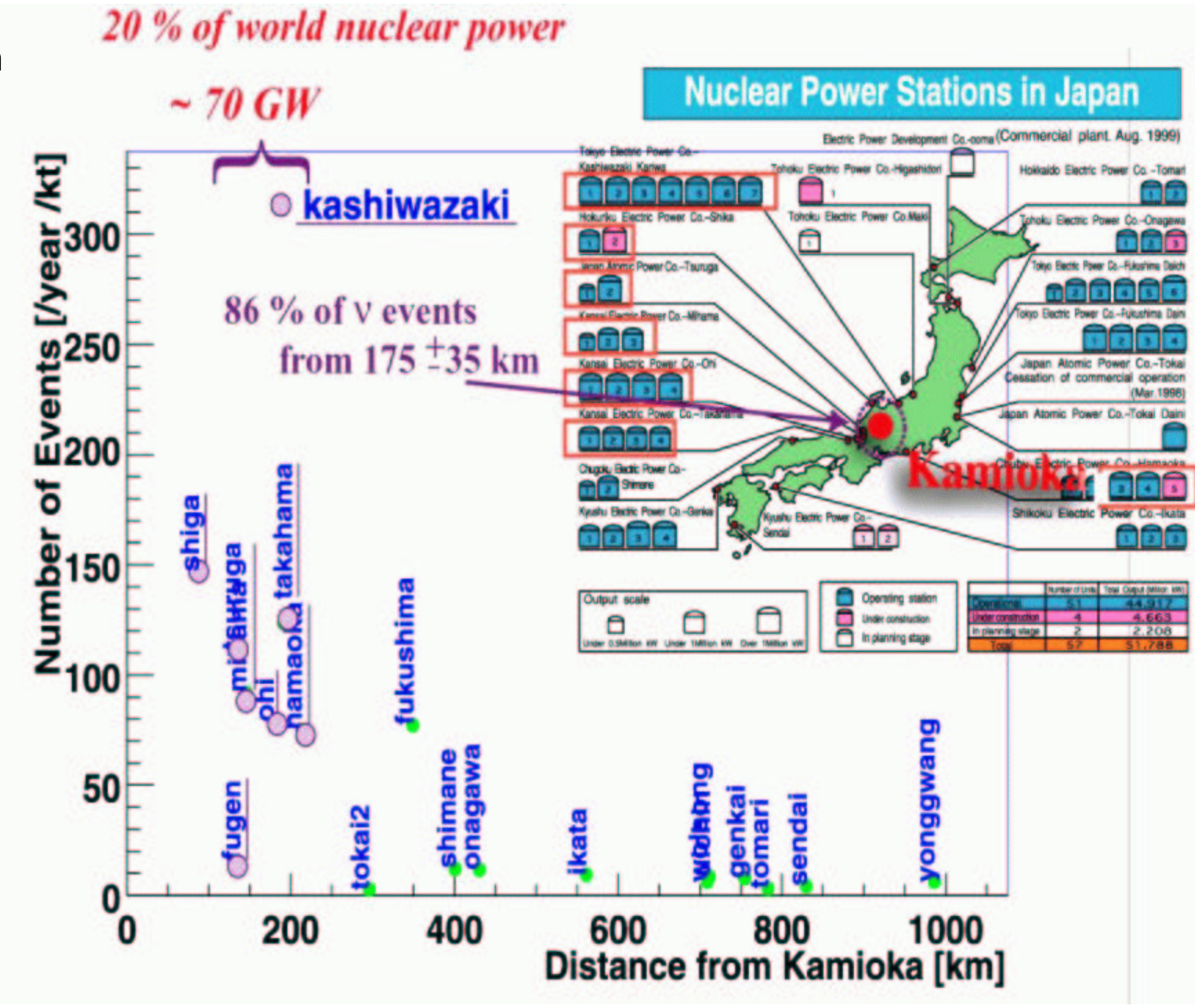
## Wnętrze detektora Kamland



Większość neutrin  
 przychodzi z  
 odległości  
 140–210 km.

Bliżej:  
 brak reaktorów

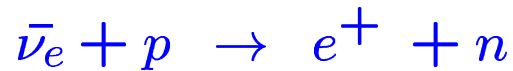
Dalej:  
 strumień  $\sim \frac{1}{R^2}$



# Kamland

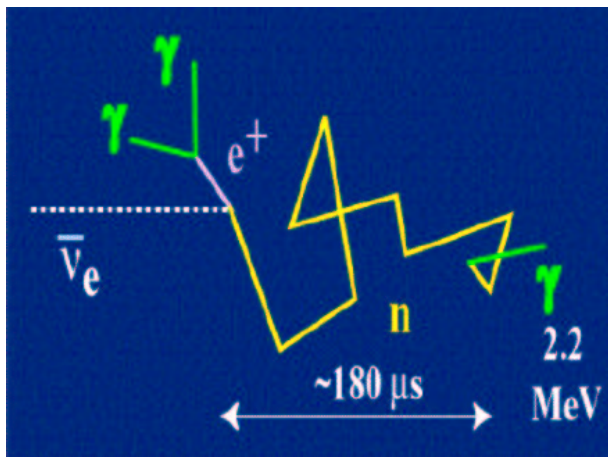
## Selekcja przypadków

W oddziaływaniach **antyneutrino**

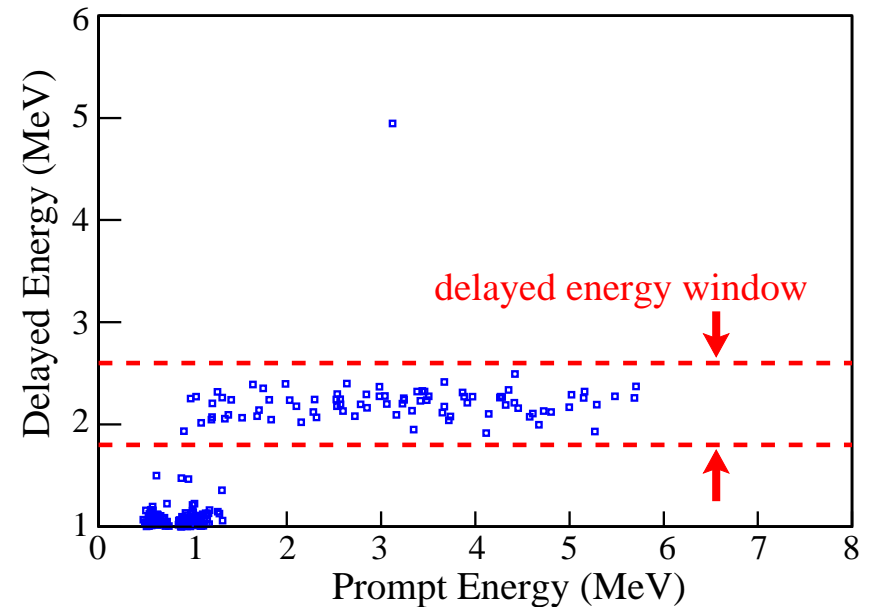


spodziewamy się:

- natychmiastowej emisji  $\gamma$  z anihilacji  $e^+$
- opóźnionej emisji  $\gamma$  z wychwytu **neutronu**



Cięcie na energii fotonu z wychwytu neutronu:



Oczekujemy  $E_2^\gamma \approx 2.2 \text{ MeV}$

Wyraźny sygnał, zaniedbywalne tło

# Kamland

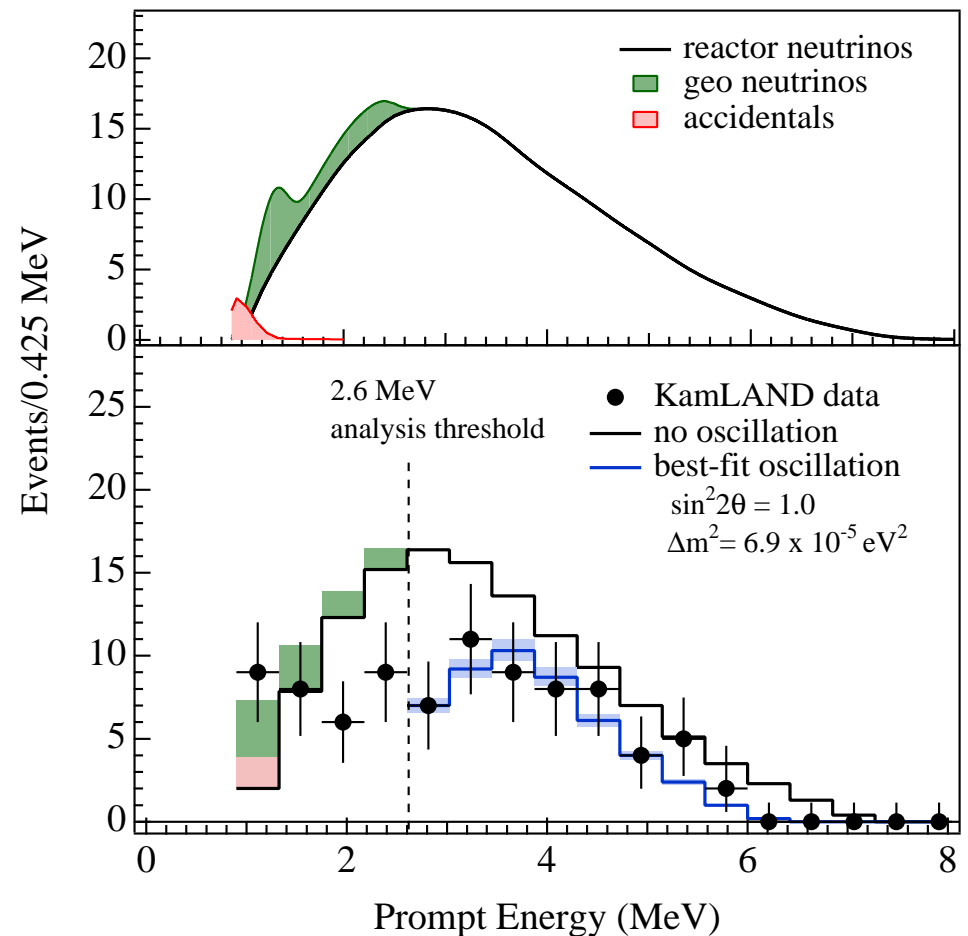
Wyniki (9 grudzień 2002 !)

Liczba zarejestrowanych przypadków oddziaływania anty-neutrino elektronowych po 145 dniach działania detektora

- oczekiwana:  $86.8 \pm 5.6$
- w tym tła:  $0.95 \pm 0.99$
- zmierzona: 54

$$\frac{N_{obs} - N_{BG}}{N_{exp}} = 0.611 \pm 0.085 (stat) \pm 0.041 (sys)$$

Wyraźny efekt “znikania”  $\bar{\nu}_e$  ( $> 3\sigma$ )



# Kamland

## Wyniki

Dopasowanie parametrów oscylacji do danych Kamland:

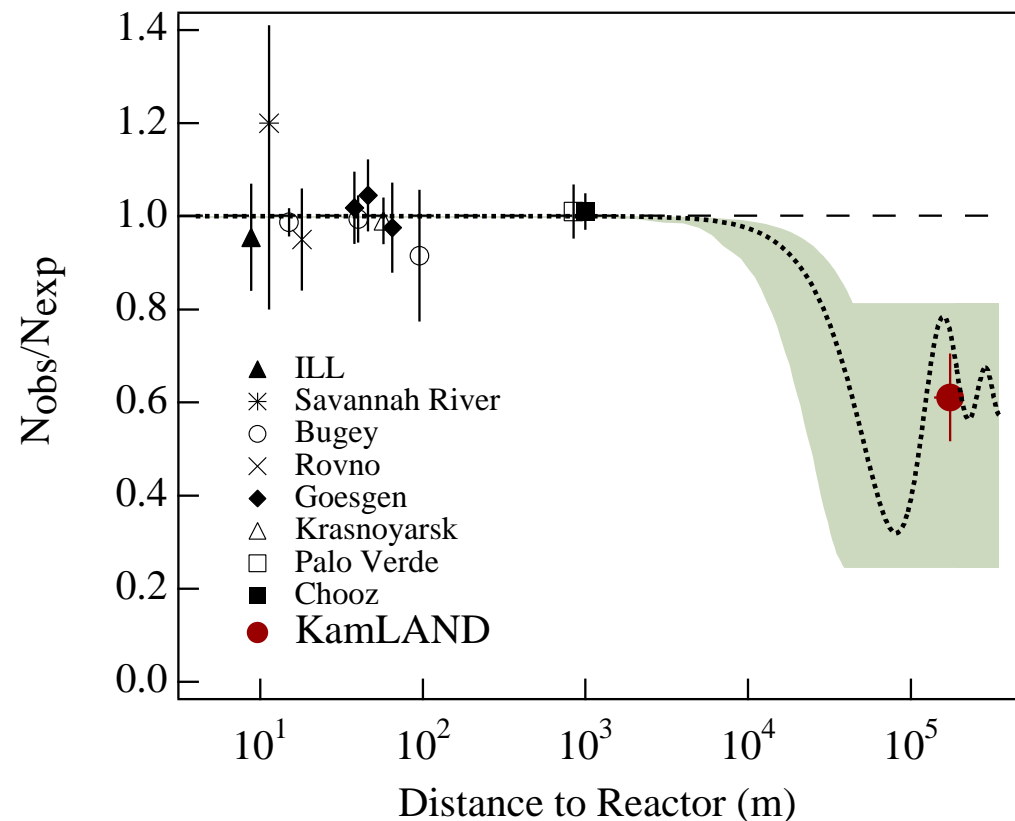
$$\sin^2 2\theta_{eX} \sim 1.00$$

$$\Delta m_{eX}^2 \sim 0.000069 \text{ eV}^2$$

$$(X = \mu \text{ lub } \tau)$$

Wyniki zgodne z wynikami dla neutrin słonecznych (krzywa kropkowana)  $\Rightarrow$

Zakładamy zachowanie parzystości CPT (ładunek-przestrzeń-czas)



# Oscylacje neutrin

## Podsumowanie

Stany fizyczne neutrin są mieszankami stanów o ustalonym zapachu.

Prowadzi to do oscylacji neutrin, które zostały dokładnie zmierzone w dwóch “sektorach”:

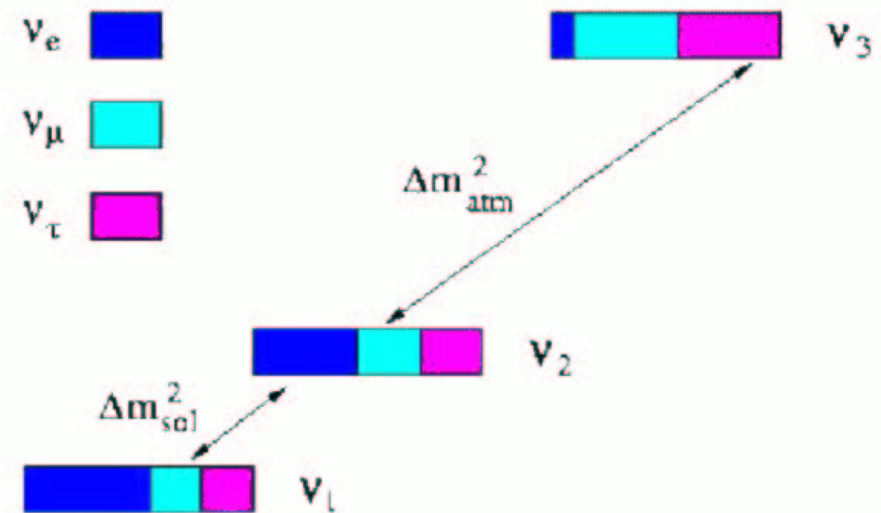
- neutrina atmosferyczne + K2K

$$\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau: \quad \Delta m_{\mu\tau}^2 \sim 0.0025 \text{ eV}^2$$

- neutrina słoneczne + KamLAND

$$\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu (?): \quad \Delta m_{e\mu}^2 \sim 0.00006 \text{ eV}^2$$

Widmo mas (jedna z możliwości):



Mieszanie 3 zapachów wyjaśnia wszystkie dane doświadczalne z wyjątkiem LSND, które wymaga  $\Delta m_{e\mu}^2 > 0.025 \text{ eV}^2 \Rightarrow$  czwarte neutrino ?!...

# Oscylacje neutrin

## Podsumowanie

Możemy wprowadzić macierz mieszania dla neutrin:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{11} & V_{12} & V_{13} \\ V_{21} & V_{22} & V_{23} \\ V_{31} & V_{32} & V_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 0.82 & -0.55 & 0 \\ 0.42 & 0.61 & 0.64 \\ 0.34 & 0.52 & -0.76 \end{pmatrix}$$

Macierz **MNS** - **Maki-Nakagawa-Sakata** odpowiednik macierzy CKM dla kwarków

$$U = \underbrace{\begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu} \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix}}_{\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau} \underbrace{\begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13} & 0 & c_{13} \end{pmatrix}}_{\nu_e \leftrightarrow \nu_\tau}$$

Mieszanie:

$\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$

neutrina

słoneczne

$\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$

neutrina

atmosferyczne

$\nu_e \leftrightarrow \nu_\tau$

ew. słabe

mieszanie

**maksymalne mieszanie**



# Oscylacje neutrin

## Podsumowanie

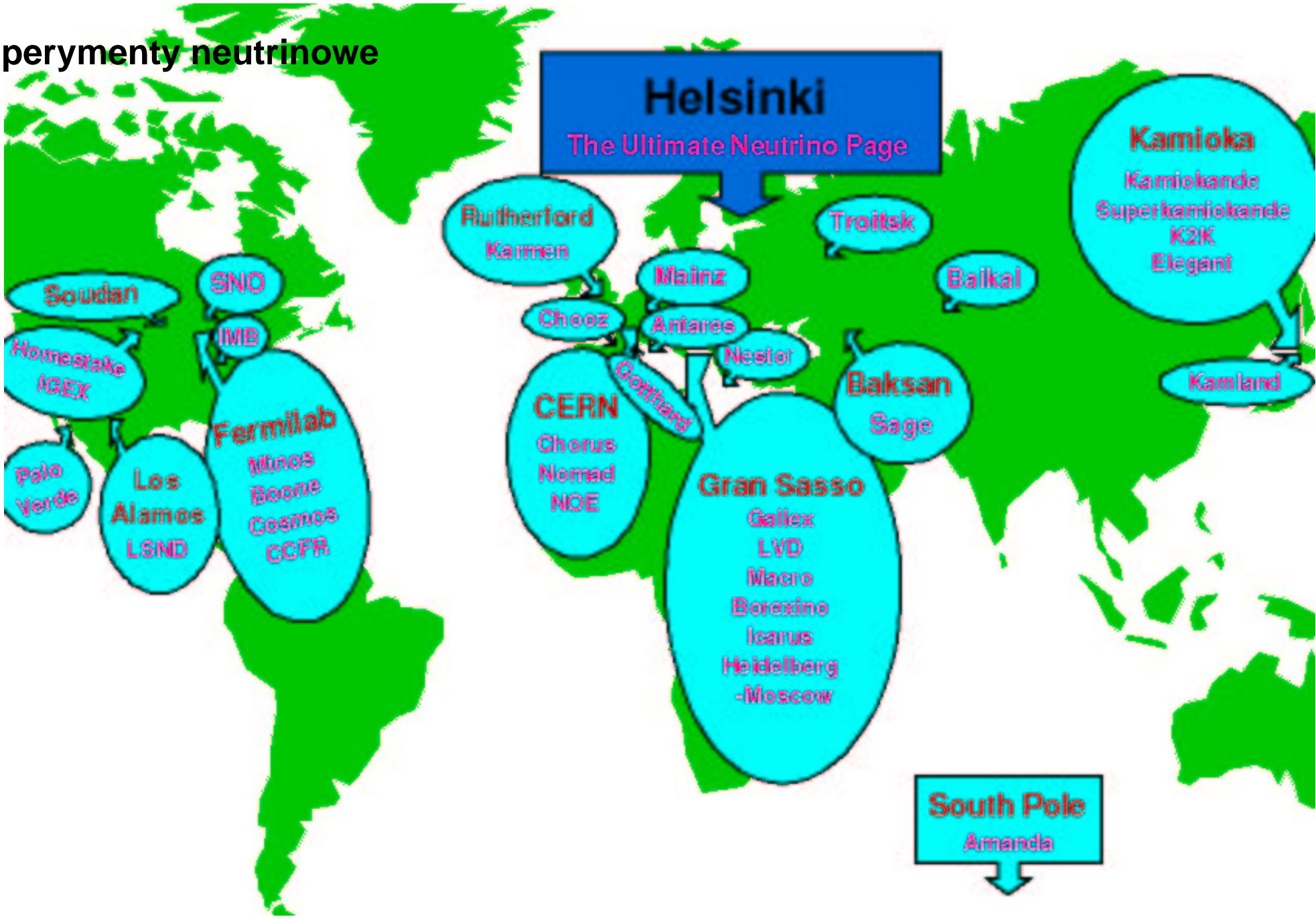
W ciągu ostatnich kilka lat dokonana się “rewolucja” w naszym spożeniu na neutrina.

Okazało się, że neutrina mają masę (niezbędny warunek oscylacji) i mieszają się łamiąc zachowanie liczby leptonowej.

Choć wszystkie wyniki można wciąż opisać w ramach Modelu Standardowego (wprowadzając odpowiednią liczbę nowych parametrów), może to być także sygnał jakiejś “nowej fizyki”...

Dlatego planowane i przygotowywane są kolejne, liczne i różnorodne doświadczenia związane z fizyką neutrin (słonecznych, atmosferycznych, reaktorowych, akceleratorowych).

# Eksperymenty neutrinowe



# Nowe eksperymenty

## AMANDA

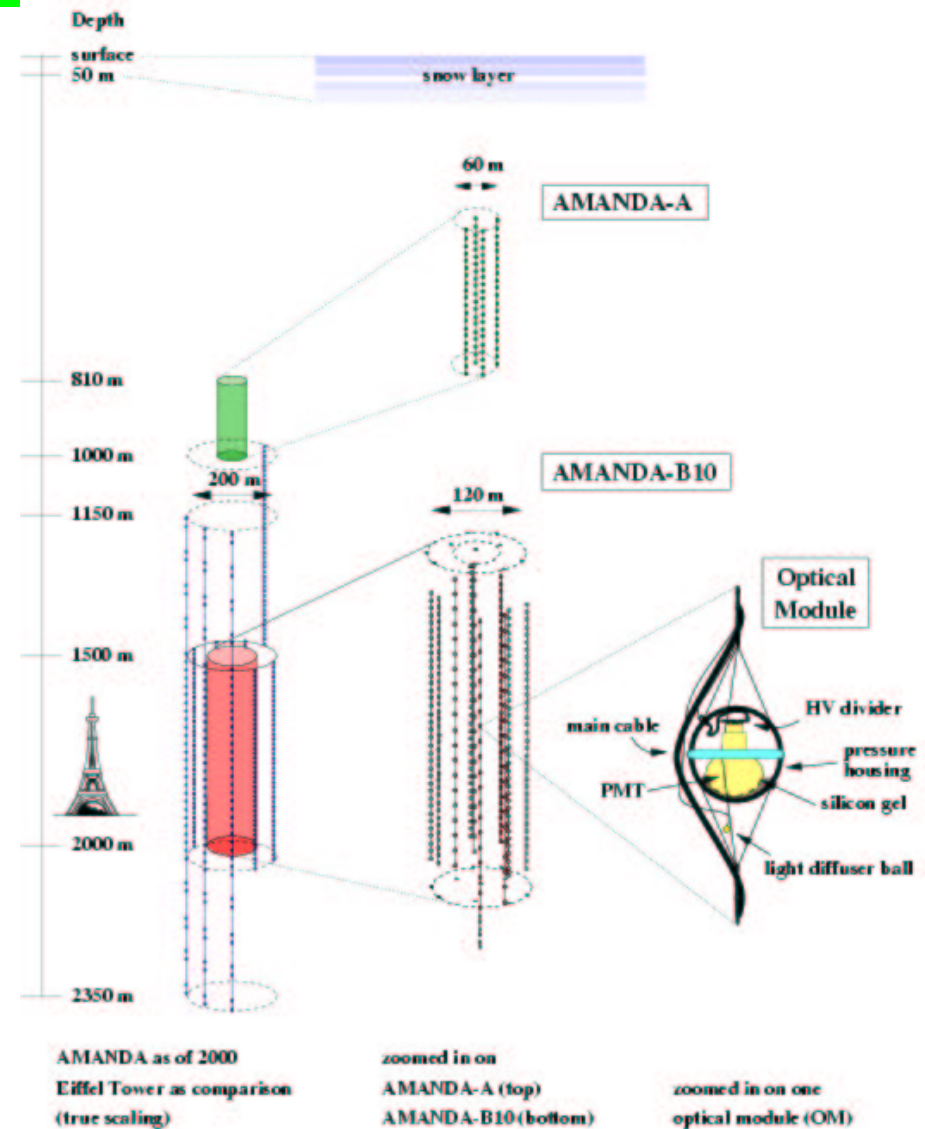
(Antarctic Muon And Neutrino Detector Array)

677 modułów na 19 “strunach”,  
1500–2000 m pod lodem (biegun południowy)

promieniowanie Czerenkowa mierzone przez  
skierowane do dołu fotopowielacze

Obszar aktywny: ok. 40 mln. ton lodu (!)

Rejestracja mionów o energiach  $\geq 50$  GeV.



# Nowe eksperymenty

Amanda

Miony pochodzące z oddziaływań wysokoenergetycznych neutrin (lecą od dołu):

