

# Oscylacje neutrin - A.D.2002

**Agnieszka Zalewska**

konwersatorium PTF, 12.12.2002

W ciągu blisko pięciu lat, które upłynęły od przełomowego odkrycia oscylacji mionowych neutrin atmosferycznych w eksperymencie SuperKamiokande bardzo przybyło nowych wyników pomiarowych. Eksperymenty SuperKamiokande i K2K pogłębiły wiedzę na temat oscylacji  $\nu_\mu - \nu_\tau$ . Tegoroczne wyniki z eksperymentu SNO, dodatkowo poparte pomiarami z SuperKamiokande dały solidne podstawy doświadczalne hipotezie oscylacji elektronowych neutrin słonecznych. W 2002 roku rozpoczęły zbieranie danych reaktorowy eksperyment Kamland w Japonii i akceleratorowy eksperyment MiniBoone w USA. Niedługo powinien wystartować słoneczny eksperyment Borexino, a następnie dwa akceleratorowe programy z długą bazą pomiarową: NuMi w USA i CNGS w Europie. W dalszej perspektywie są superwiązki i fabryki neutrin. Referat będzie próbą podsumowania wyników z ostatnich lat i ukazania kierunków na przyszłość.

---

# Streszczenie

---

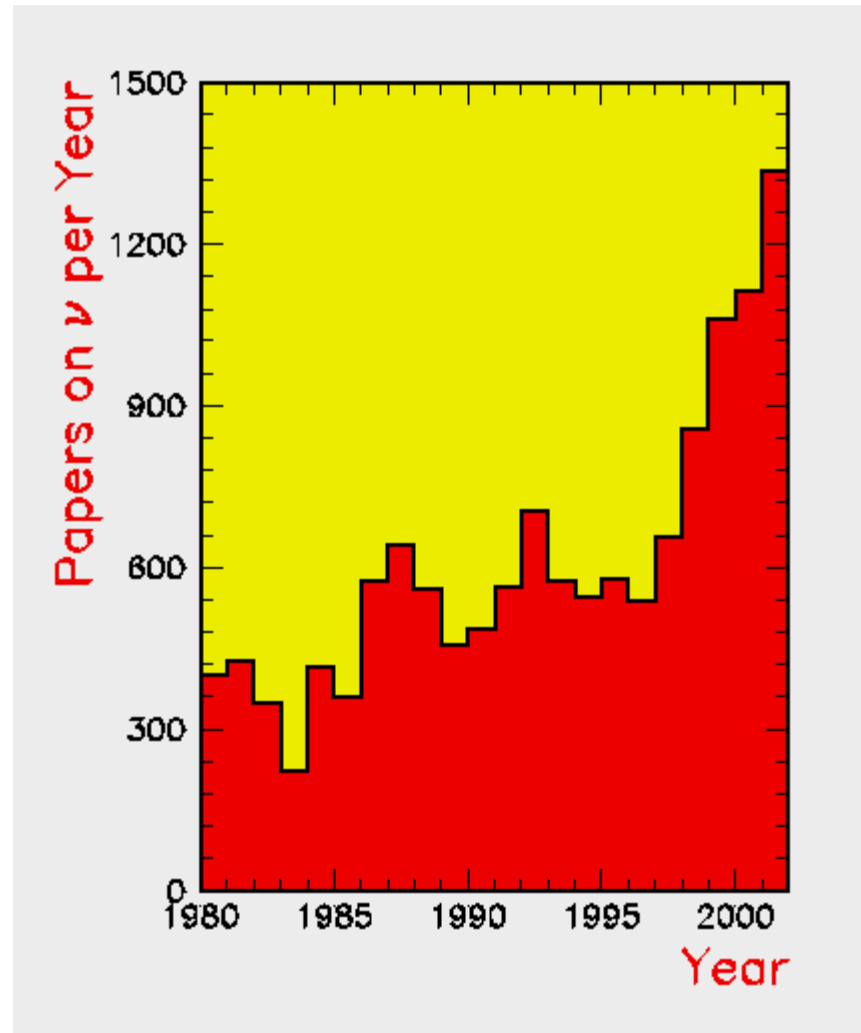
- **Oscylacje neutrin atmosferycznych**
  - pomiary SuperKamiokande, K2K
  - projekty NuMi i CNGS
- **Oscylacje neutrin słonecznych**
  - wyniki SNO
  - co wniosło SuperKamiokande
- **Efekt LSND - eksperyment MiniBoone**
- **Pierwsze wyniki reaktorowego eksperymentu KamLAND**
- **Dalsza przyszłość: super-wiązki, fabryki neutrin**

# Jedno jest pewne

To jest fascynująca dziedzina badań

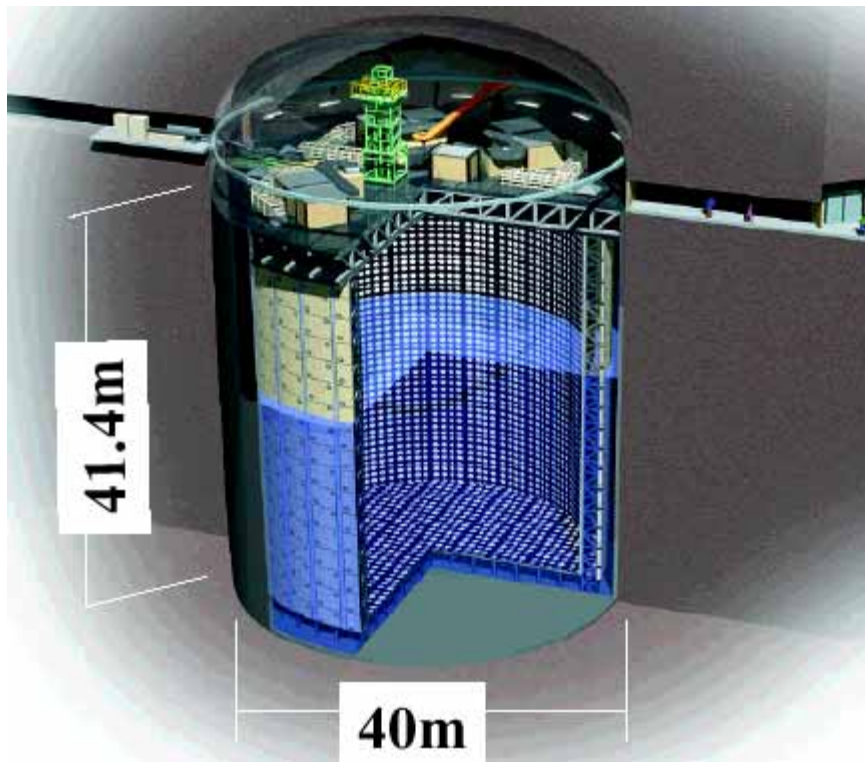
Oscylacje neutrin  
oznacza $\acute$ ają niezerow $\acute$ ą  
mas $\acute$ ę neutrin

Konsekwencje  
teoretyczne tego  
faktu mog $\acute$ ą by $\acute$ c  
ogromne

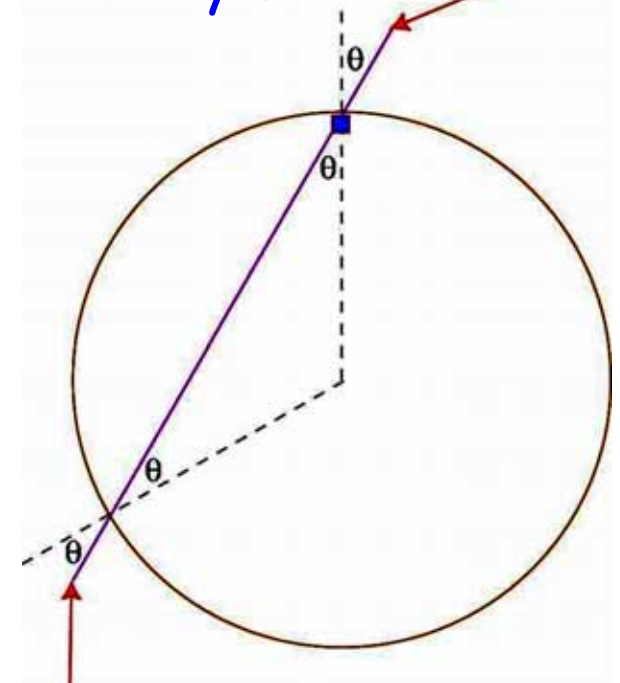


# Oscylacje neutrin atmosferycznych

1998 - obserwacja oscylacji neutrin atmosferycznych w eksperymencie Superkamiokande,  $\nu_{\mu} \leftrightarrow \nu_{\tau}$



Pomiar kierunku i energii mionów i elektronów z oddziaływań neutrin



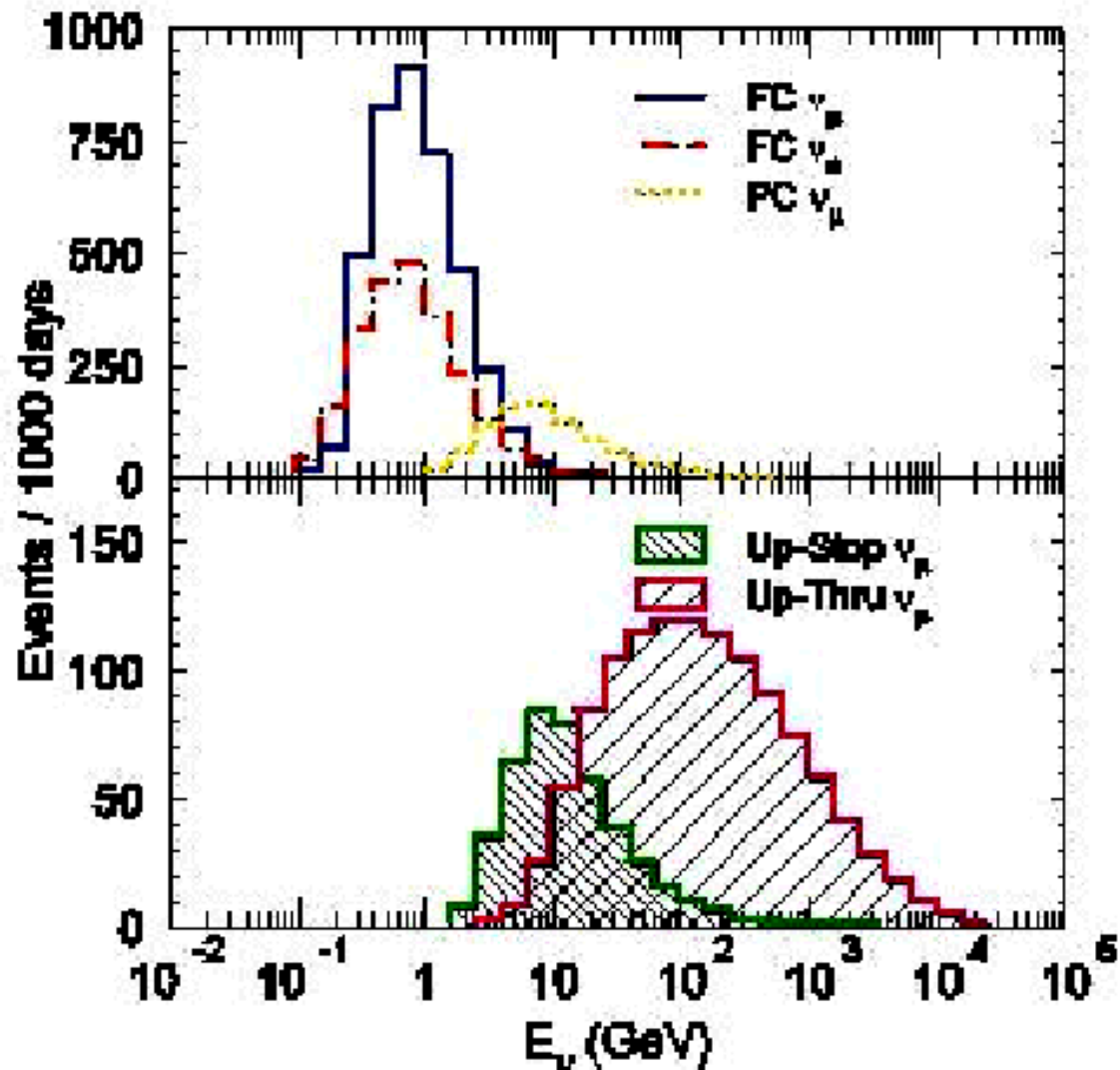
# Oscylacje neutrin atmosferycznych

SuperK - analiza w oparciu o pełne dane sprzed awarii,  
kategorie analizowanych przypadków

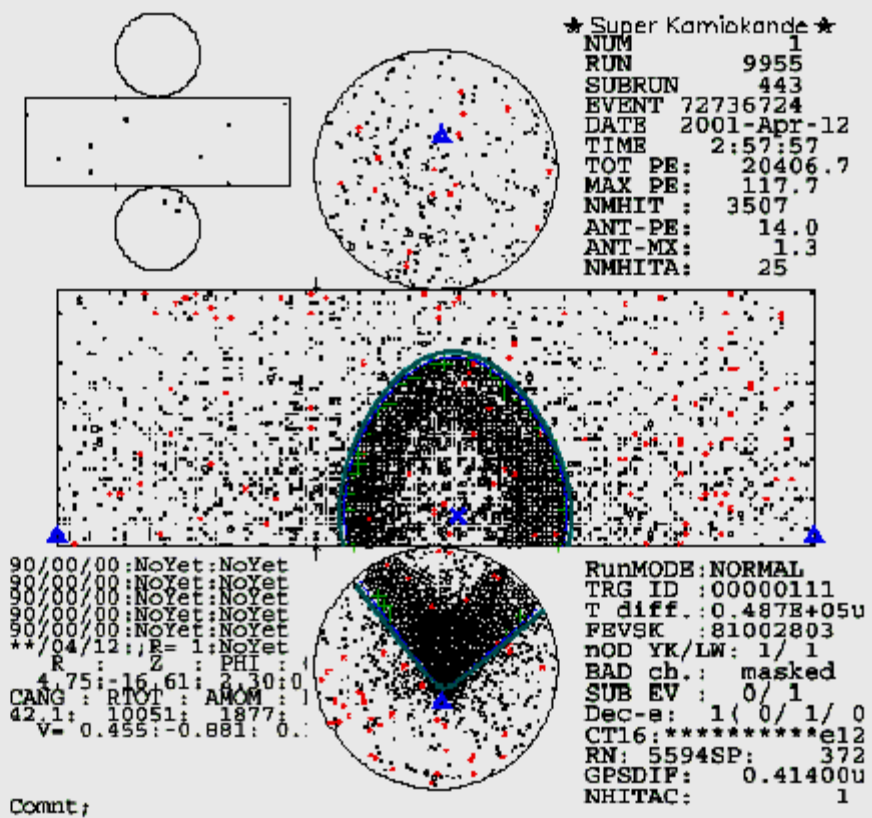
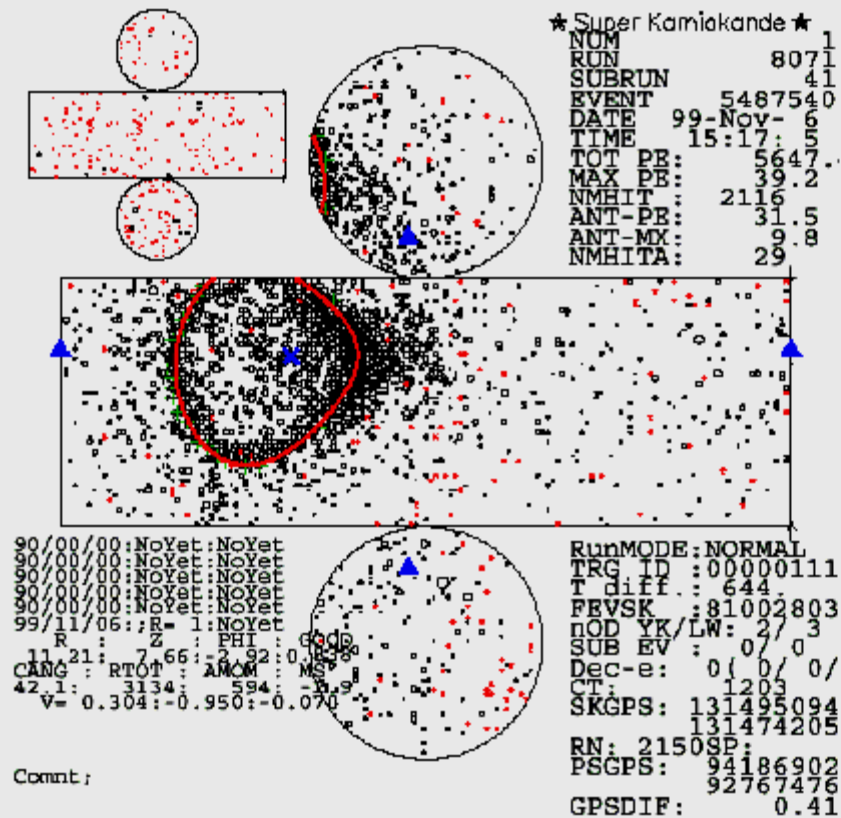


w pełni zawarte      częściowo zawarte  
oraz analiza przypadków z wieloma  
cząstkami w stanie końcowym  
łącznie około 14000 przypadków

# SuperK - rozkłady energii neutrin



# SuperK - e i $\mu$ . w stanie końcowym





# SuperK - rozkłady kąta zenitalnego

Pełne dane, najlepszy fit daje  
 $\Delta m^2 = 2.5 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ ,  $\sin 2\theta = 1.0$ ,

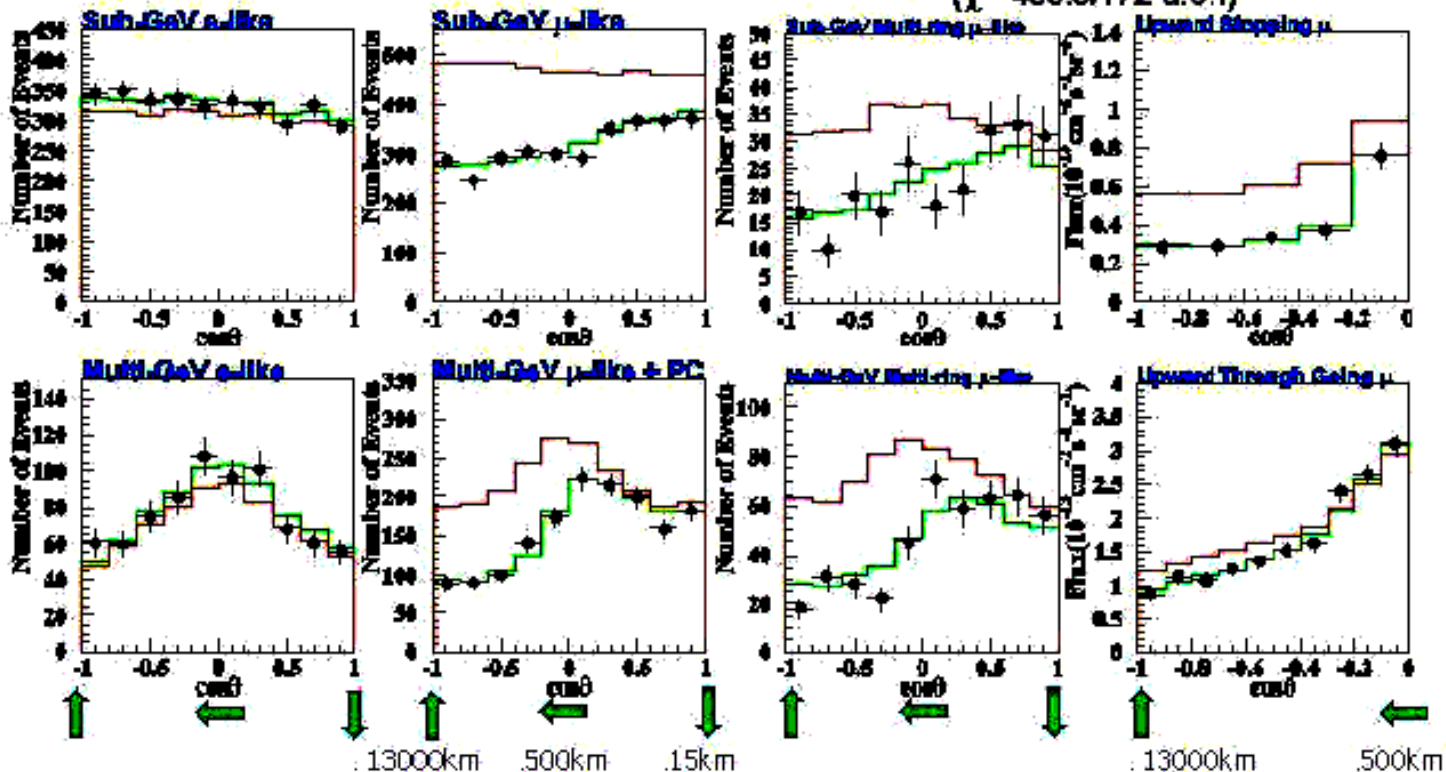
$\chi^2 = 163.2/170$  d.o.f.  
 $\chi^2_{\min} = 163.2/170$  d.o.f)

(FC+PC+ $\bar{\nu}_\mu - \mu$ )

$\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$   
**2-flavor oscillations**

Null oscillation

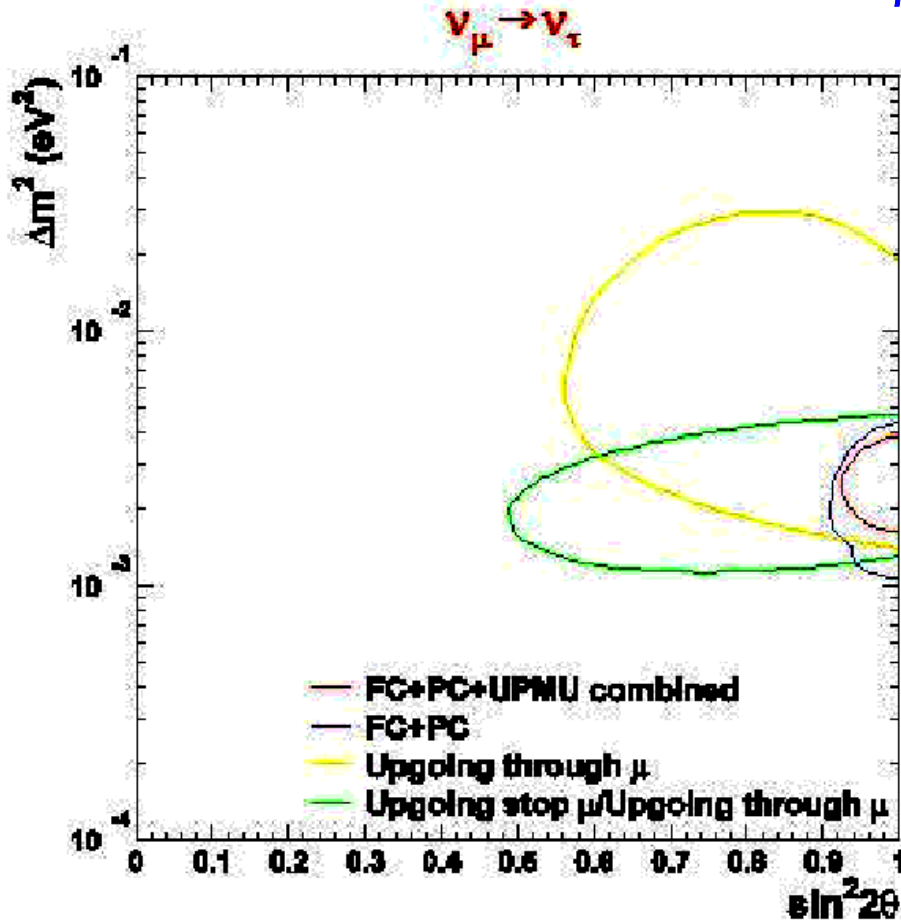
( $\chi^2 = 456.5/172$  d.o.f)





# SuperK - oscylacje $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2\theta \sin^2(1.27 \Delta m^2 L/E)$$



## $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ oscillations

**Best fit ( $\Delta m^2 = 2.5 \times 10^{-3}$ ,  $\sin^2 2\theta = 1.0$ )**

**$\chi^2_{\min} = 163.2/170$  d.o.f)**

**No oscillation**

**( $\chi^2 = 456.5/172$  d.o.f)**

**$\Delta m^2 = (1.6 \sim 3.9) \times 10^{-3} \text{eV}^2$**

**$\sin^2 2\theta > 0.92$  @ 90%CL**

---

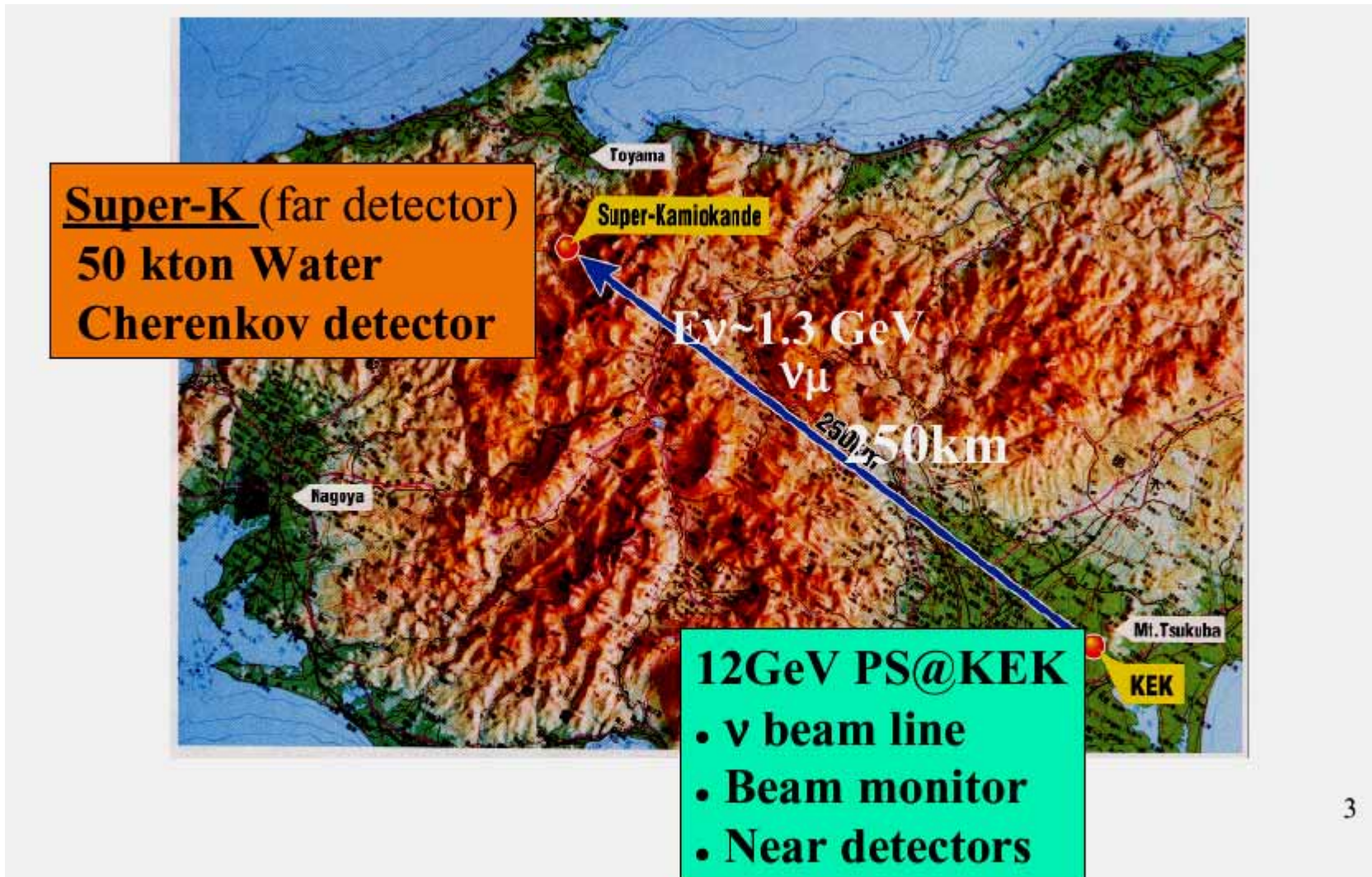
# SuperK - inne wyniki badań $\nu$ atmosferycznych

---

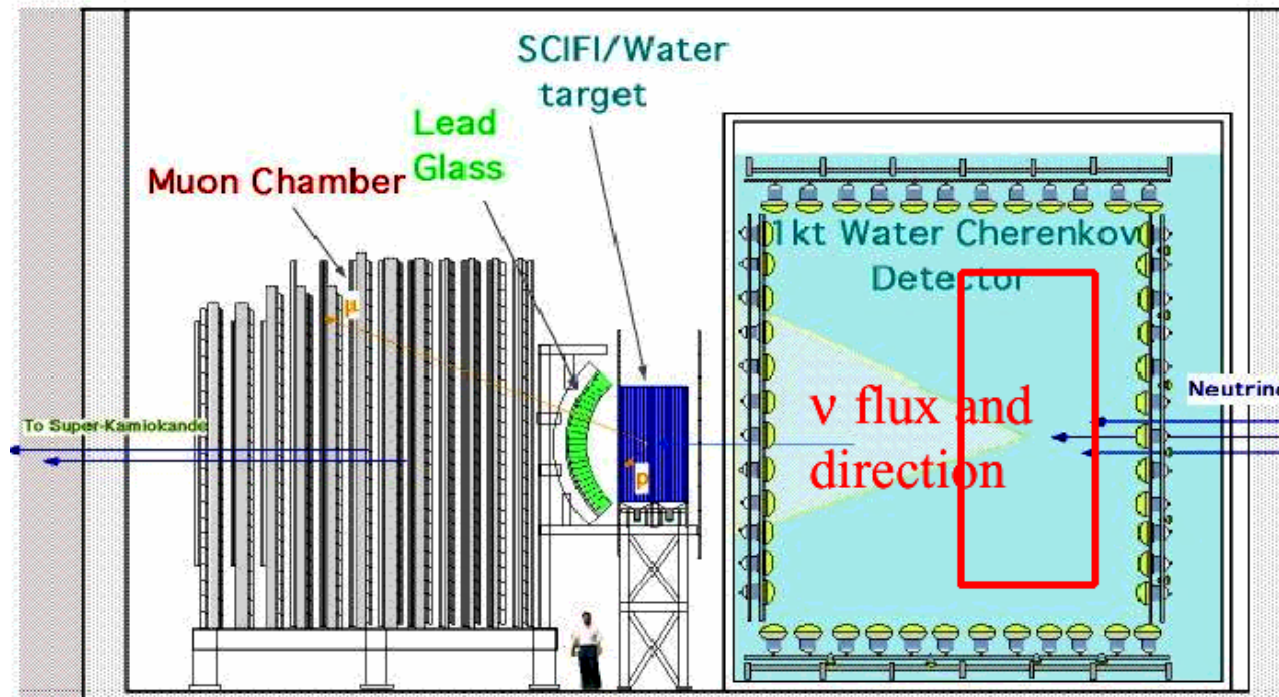
- ◆ W granicy dokładności SuperK nie obserwuje się oscylacji  $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$  - wynik potwierdzony przez CHOOZ
- ◆ Wybór przypadków odpowiadających oddziaływaniom  $\nu_\tau$  spośród wysokoenergetycznych przypadków wielocząstkowych - efekt na poziomie  $2\sigma$
- ◆ Oscylacje w neutrino sterylne mało prawdopodobne

# **Eksperyment K2K**

**pierwszy eksperyment akceleratorowy z długą bazą pomiarową**



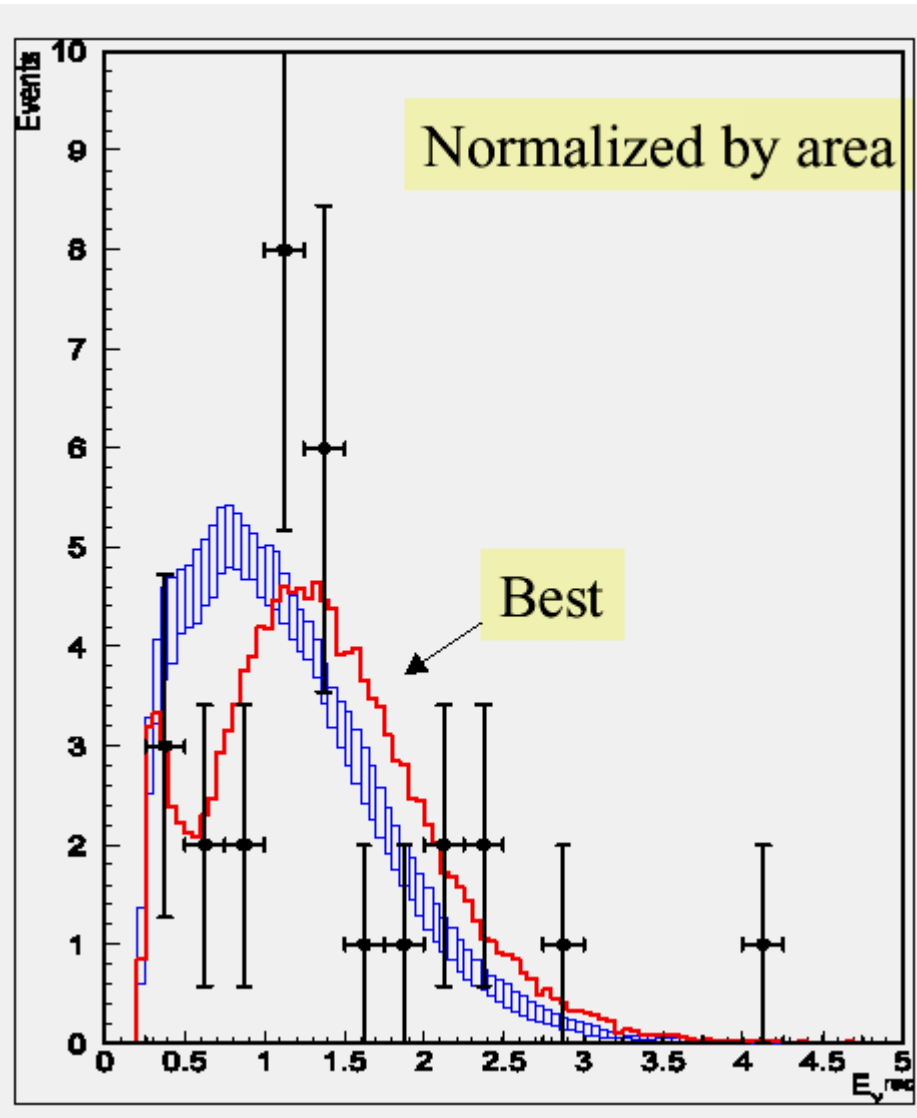
# Eksperyment K2K - zasada pomiaru



- Pomiar pędów i kierunków mionów w bliskim detektorze w KEK
- > strumień neutrin i rozkład energii neutrin w bliskim detektorze
  - > przewidywania strumienia i rozkładu energii w det. SuperK
- Pomiar oddziaływań neutrin w det. SuperK
- > wnioski na temat oscylacji na podstawie zanikanie strumienia i kształtu widma energii neutrin



# Eksperyment K2K - wyniki pomiarów



◆ Zanikanie strumienia neutrin:  
56 zaobserwowanych przypadków  
80.1+6.2-5.4 oczekiwanych

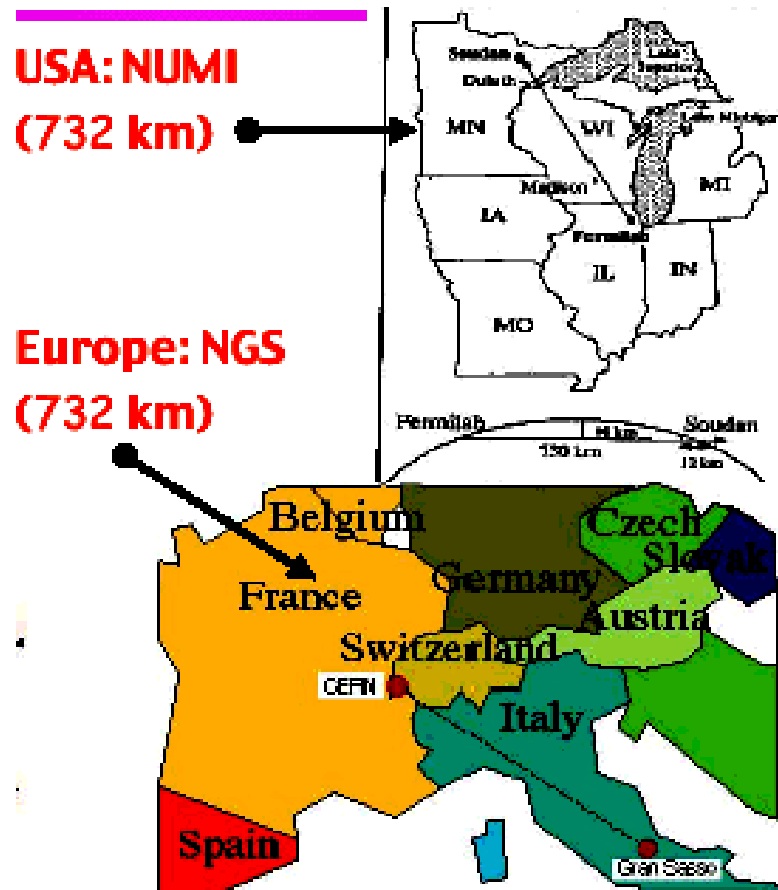
◆ Zmiana kształtu rozkładu  
energii neutrin zgodnie z  
oczekiwaniem dla oscylacji

◆ Parametry oscylacji w zgodzie  
z wynikami SuperK dla neutrin  
atmosferycznych

# Projekty eksperymentów z długą bazą

◆ NuMi - wiązka z FNAL do detektora MINOS w kopalni Soudan pod granicą kanadyjską, start w 2004 roku

◆ CNGS - wiązka z CERN-u do Gran Sasso do detektorów OPERA i ICARUS, start w 2006 roku

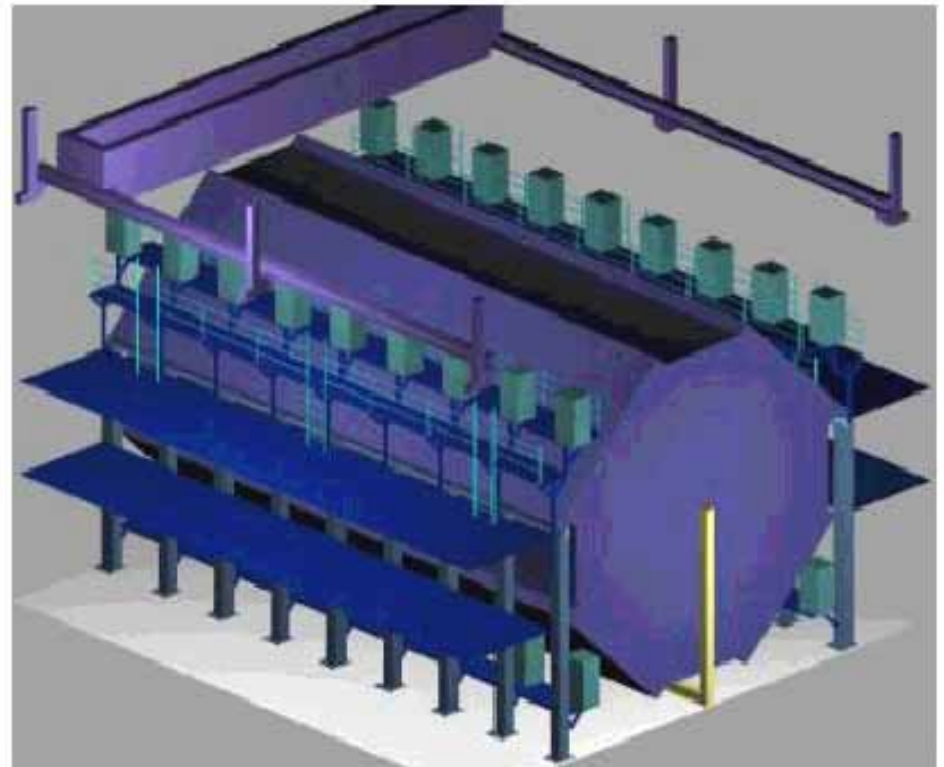


# Program NuMi

Ū niskoenergetyczna wiązka neutrin mionowych, celem jest lepszy pomiar parametrów oscylacji w oparciu o zanikanie wiązki i pomiar kształtu rozkładu energii, bliski detektor w FNAL

Detektor MINOS:  
kalorymetryczny,  
namagnesowane płyty z  
żelaza, przełożone  
scyntylatorami

Pomysł umieszczenia  
drugiego zestawu  
detektorów poza osią  
wiązki

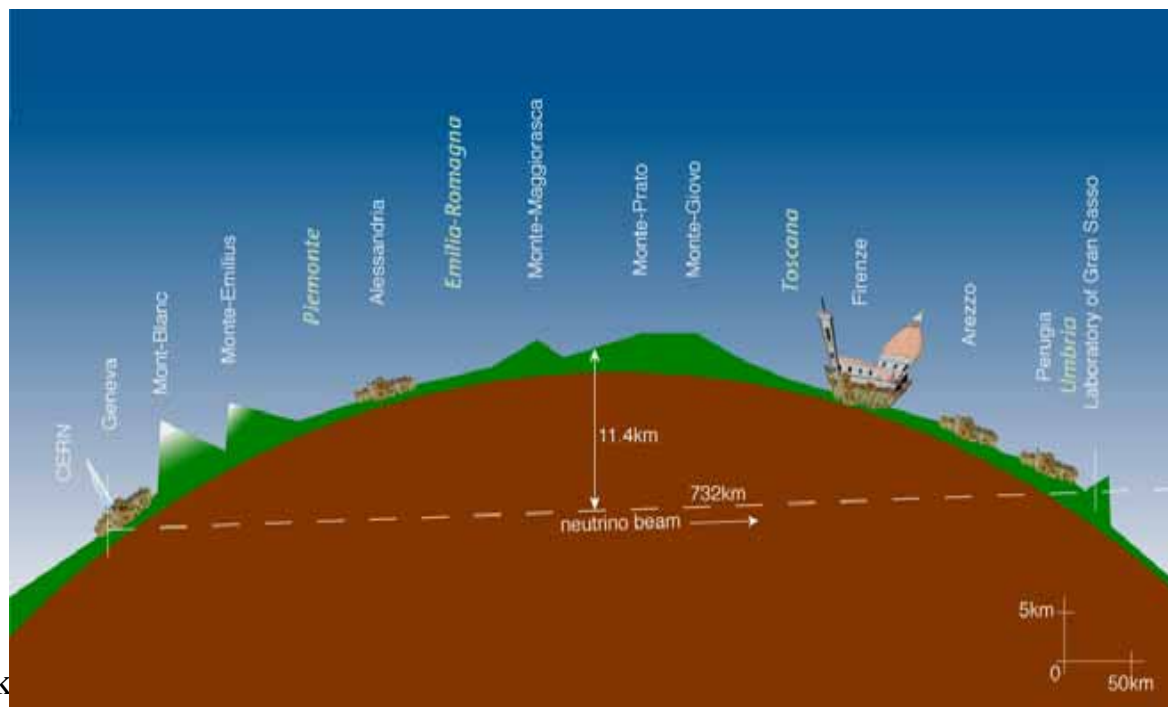




# Program CNGS

Ū CNGS – wiązka wysokoenergetycznych neutrin mionowych z CERN-u do Gran Sasso, program nastawiony na zaobserwowanie oddziaływań neutrin taonowych (i elektronowych) pochodzących z oscylacji neutrin mionowych, start w 2006 roku

$\nu_{\mu}$



$\nu_{\tau}$

$\nu_e$

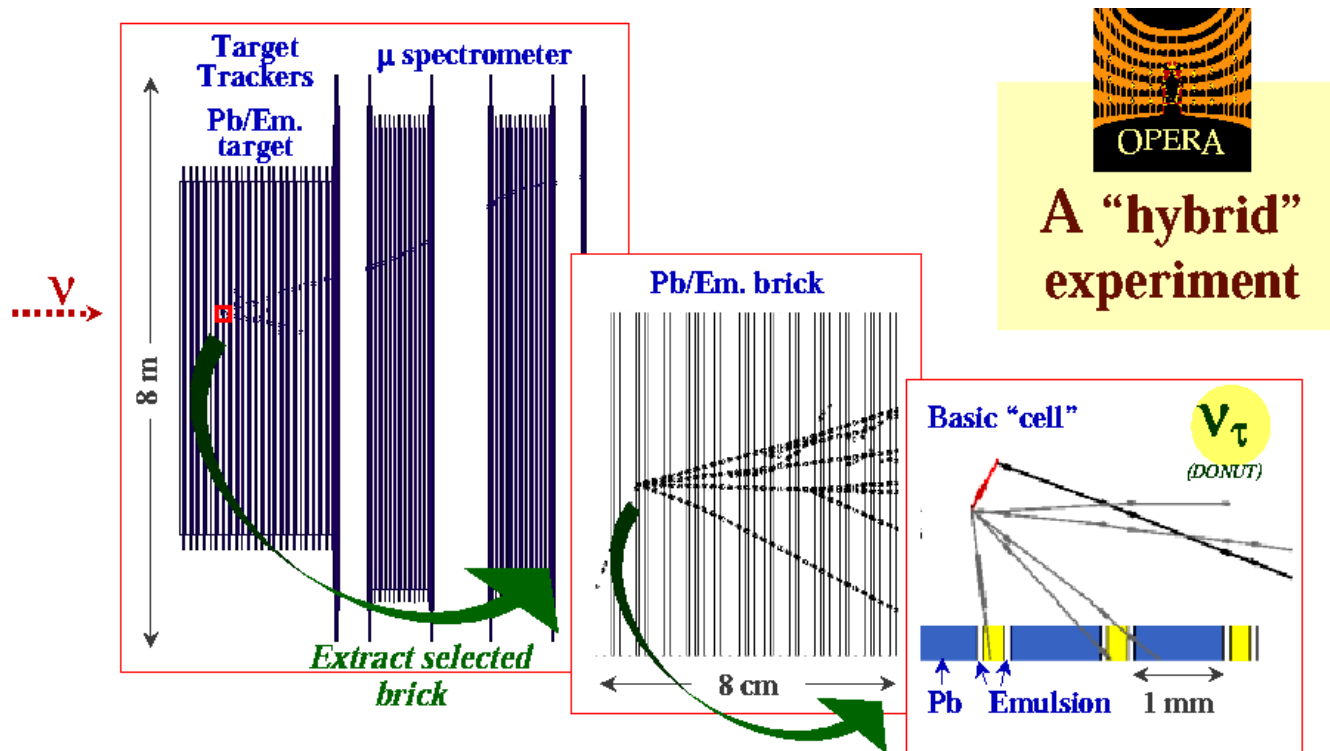
# Wiązka neutrin z CERN-u do Gran Sasso

CERN

Gran Sasso



# Eksperyment OPERA



## Electronic detectors

- select  $\nu$  interaction brick
- $\mu$  ID, charge and p

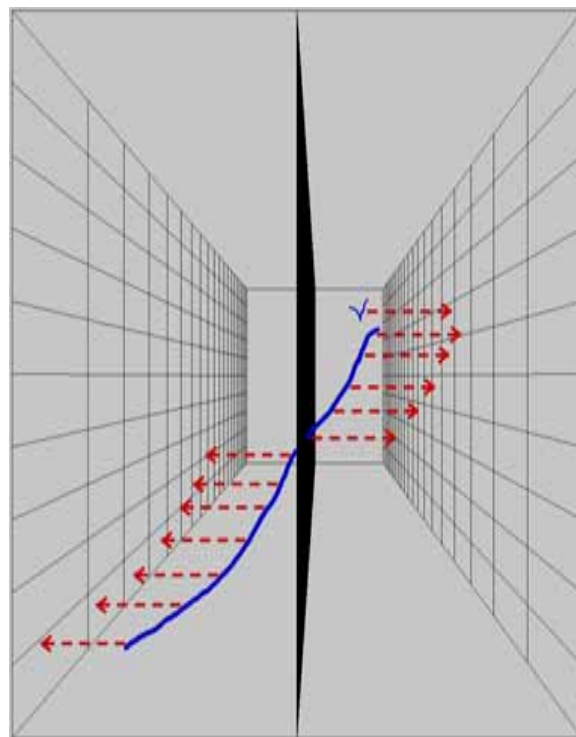
## Emulsion scanning

- vertex search
- decay search
- e/ $\gamma$  ID, kinematics

# ICARUS - wielkie komory TPC wypełnione ciekłym argonem

Ů Wykorzystywane zjawisko jonizacji w ciekłym argonie wzdłuż torów cząstek naładowanych, trójwymiarowy obraz przypadku oddziaływania w oparciu o pomiar sygnałów na drutach (dwie współrzędne) i o pomiar czasu dryfu (trzecia współrzędna).

Ů Uniwersalny detektor dla fizyki neutrin, pozwalający na równoczesne rejestrowanie oddziaływań neutrin słonecznych, atmosferycznych i neutrin z wiązki



# ICARUS

Number of independent containers = 2

Single container Internal Dimensions: Length = 19.6 m , Width = 3.9 m , Height = 4.2 m

Total (cold) Internal Volume = 534 m<sup>3</sup>

Sensitive LAr mass = 476 ton

Number of wires chambers = 4

Readout planes / chamber = 3 at 0° , ± 60° from horizontal

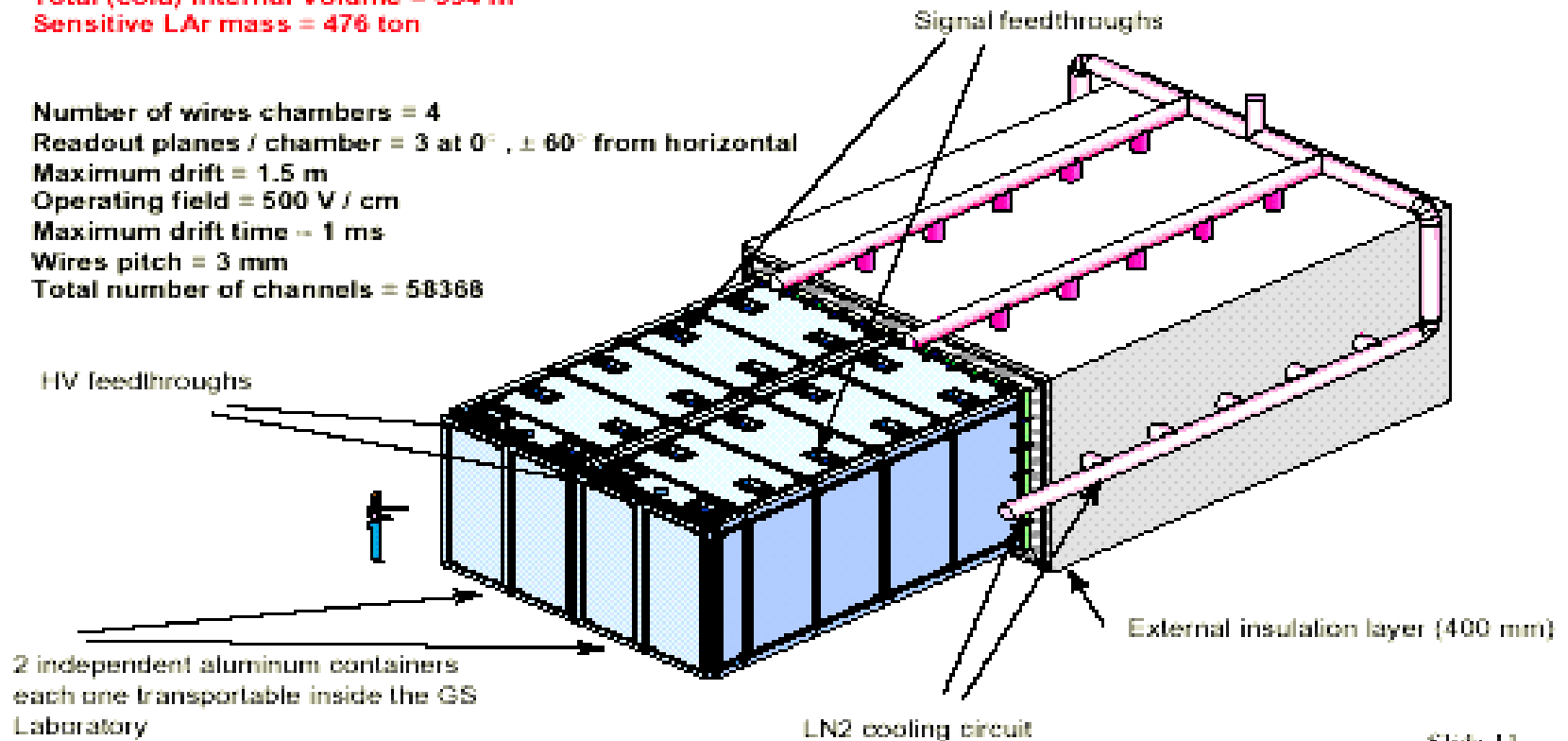
Maximum drift = 1.5 m

Operating field = 500 V / cm

Maximum drift time = 1 ms

Wires pitch = 3 mm

Total number of channels = 58368



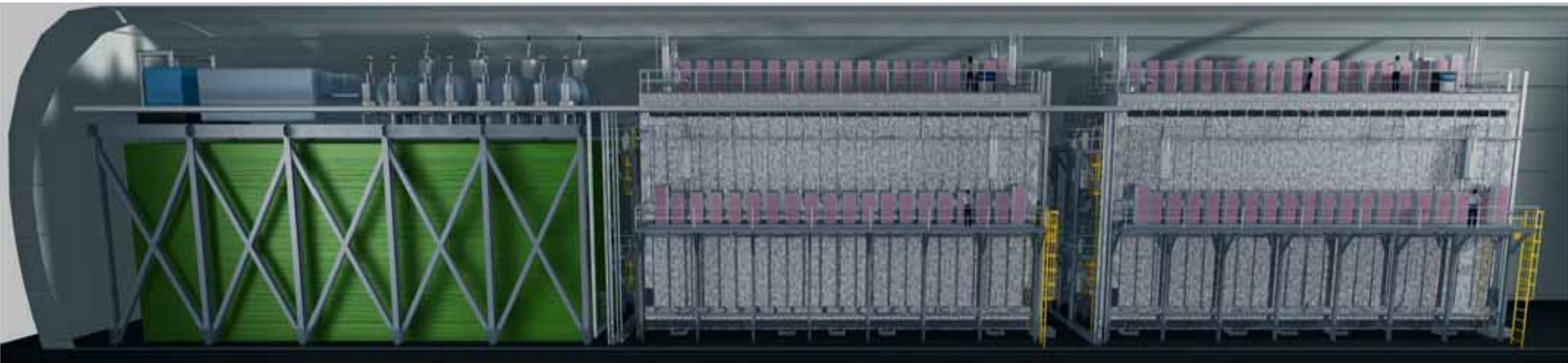
Slide 11

---

# ICARUS

---

Detektor ICARUS w 2006 roku



Całkowita masa ciekłego argonu - 3 ktony, długość - 70 metrów



# Oscylacje neutrin słonecznych

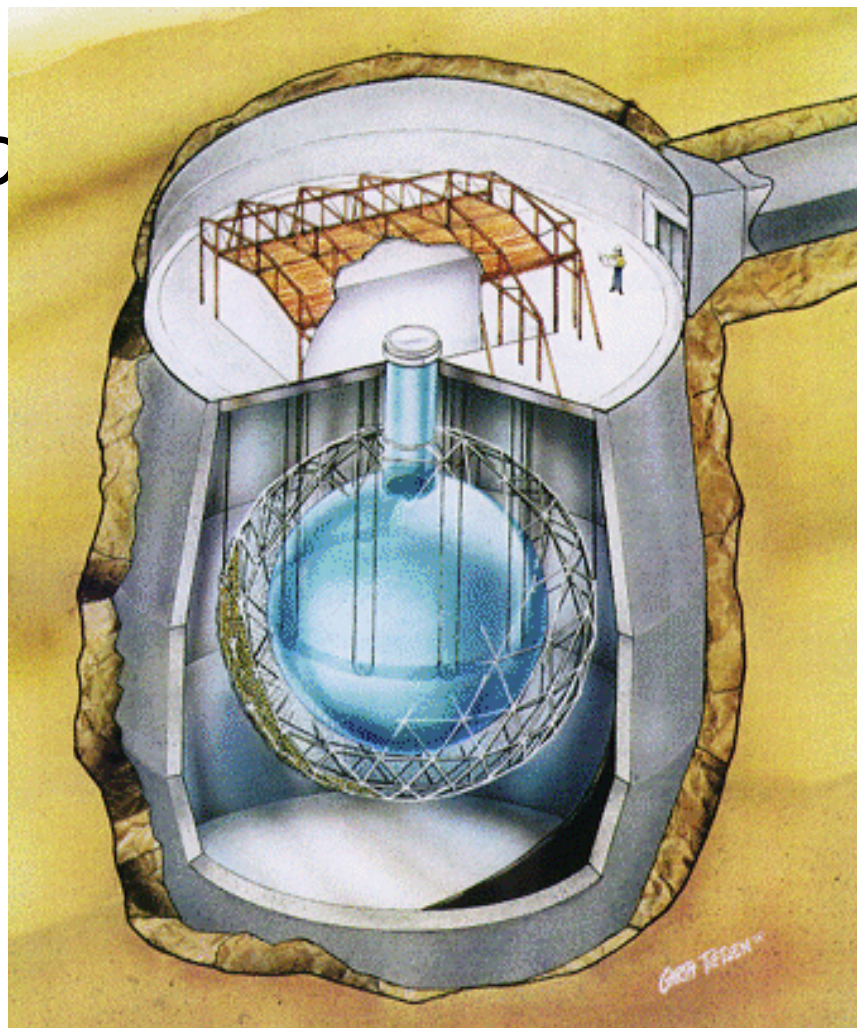
2001-2002

Obserwacja oscylacji neutrin  
 $\nu_e \leftrightarrow \nu_{\mu, \tau}$  w eksperymencie SNO  
w Kanadzie,

[nucl-ex/0106015 v.2](#)

[nucl-ex/0204009 v.2](#)

1000 ton  $D_2O$ , 9456  
fotopowielaczy, 7 kton  $H_2O$ ,  
2000 m. pod ziemią, detekcja  
promieniowania Czerenkowa,  
próg energetyczny 5 MeV,  
ok. 3000 przyp. z 11.99-05.01





# Neutrino słoneczne w modelu SSM i we wcześniejszych pomiarach

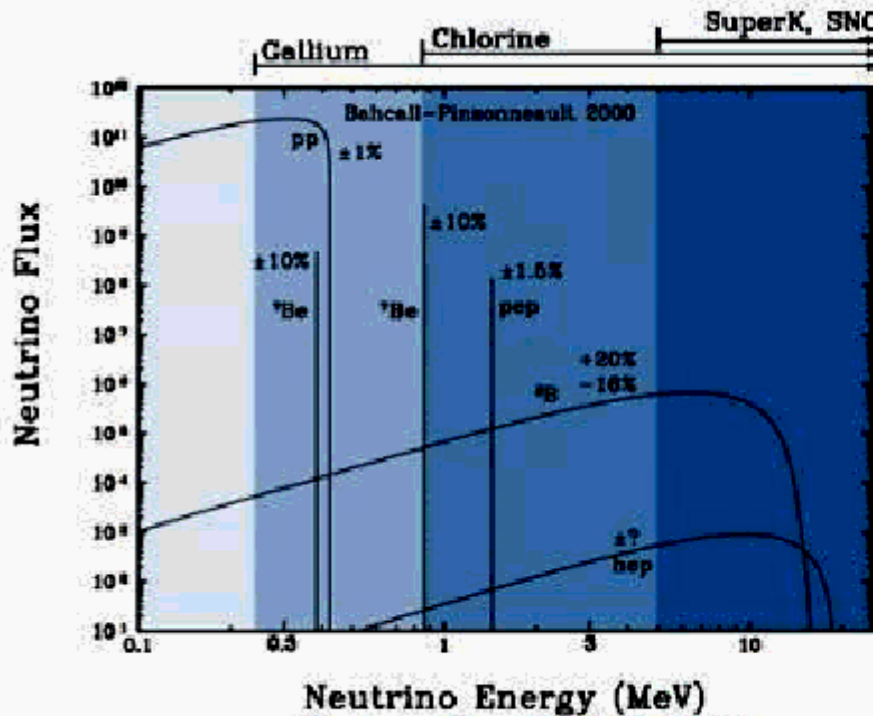


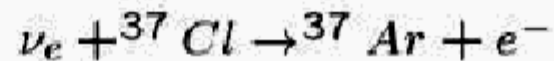
Figure by J. Bahcall

SAGE+GALLEX/GNO



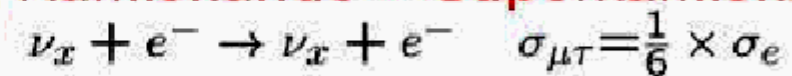
Flux = 0.58 SSM

Homestake



Flux = 0.33 SSM

Kamiokande + Superkamiokande



Flux = 0.46 SSM

# Procesy mierzone w eksperymencie SNO

CC



tylko  $\nu_e$   
dobry pomiar energii  $\nu_e$ ,  
mała czułość na kierunek  
 $1 - 1/3 \cos\theta$

NC



wszystkie rodzaje neutrin,  
ten sam przekrój czynny,  
pomiar całkowitego  
strumienia neutrin  
borowych

ES



mała liczba przypadków,  
głównie czuły na  $\nu_e$   
duża czułość na kierunek  
reakcja mierzona w SuperK

# SNO - poszukiwanie odpowiedzi na pytania:

$$\frac{\Phi_{cc}}{\Phi_{es}} = \frac{\nu_e}{\nu_e + 0.154(\nu_\mu + \nu_\tau)} = 1?$$

$$\frac{\Phi_{cc}}{\Phi_{nc}} = \frac{\nu_e}{\nu_e + \nu_\mu + \nu_\tau} = 1?$$

$$\Phi_{\text{day}} = \Phi_{\text{night}} \quad ?$$

# SNO - pomiary strumienia:

$$\Phi_{\text{CC}}(\nu_e) = 1.76^{+0.06}_{-0.05} \text{ (stat.) }^{+0.09}_{-0.09} \text{ (syst.) } \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

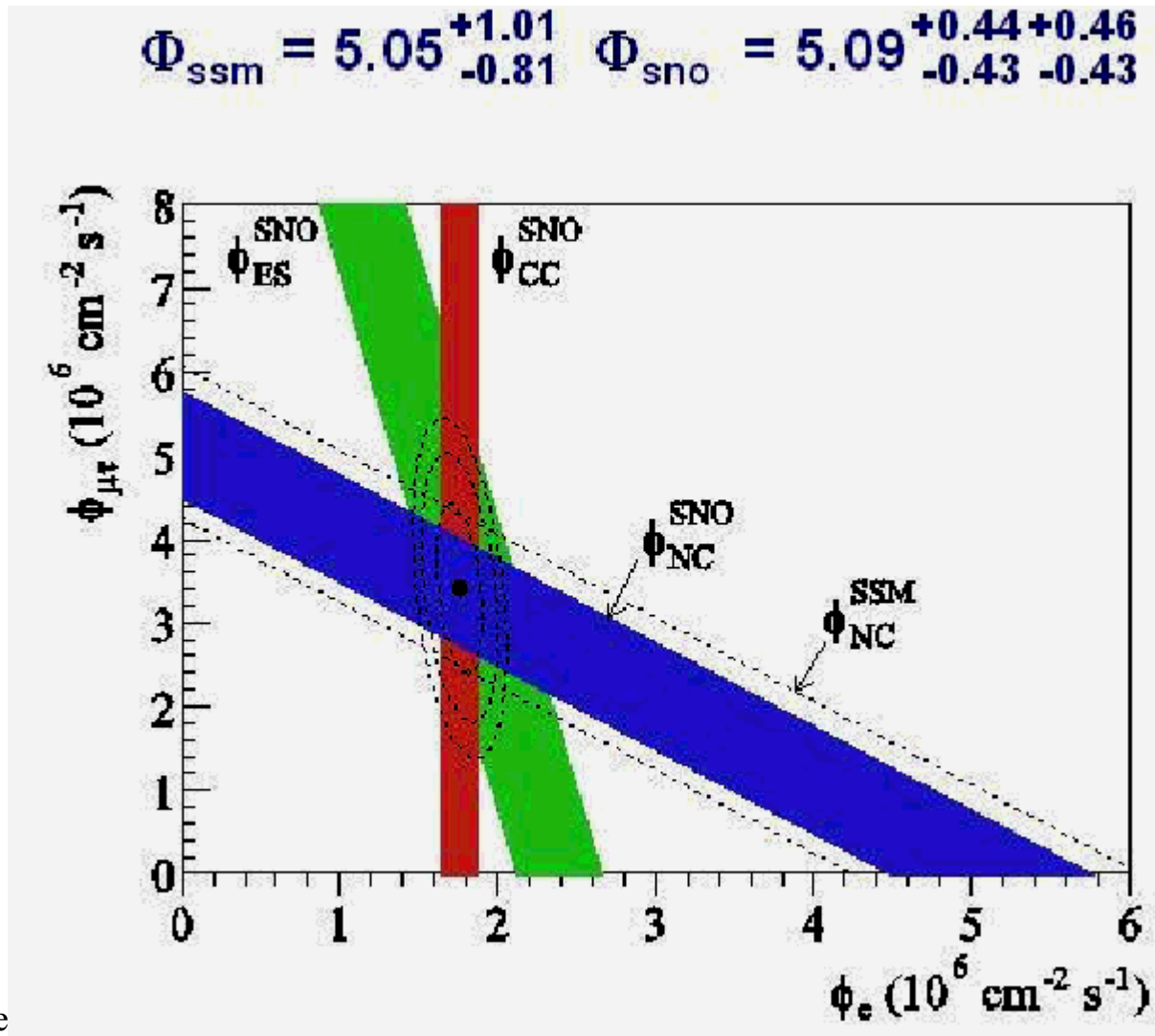
$$\Phi_{\text{ES}}(\nu_x) = 2.39^{+0.24}_{-0.23} \text{ (stat.) }^{+0.12}_{-0.12} \text{ (syst.) } \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

$$\Phi_{\text{NC}}(\nu_x) = 5.09^{+0.44}_{-0.43} \text{ (stat.) }^{+0.46}_{-0.43} \text{ (syst.) } \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

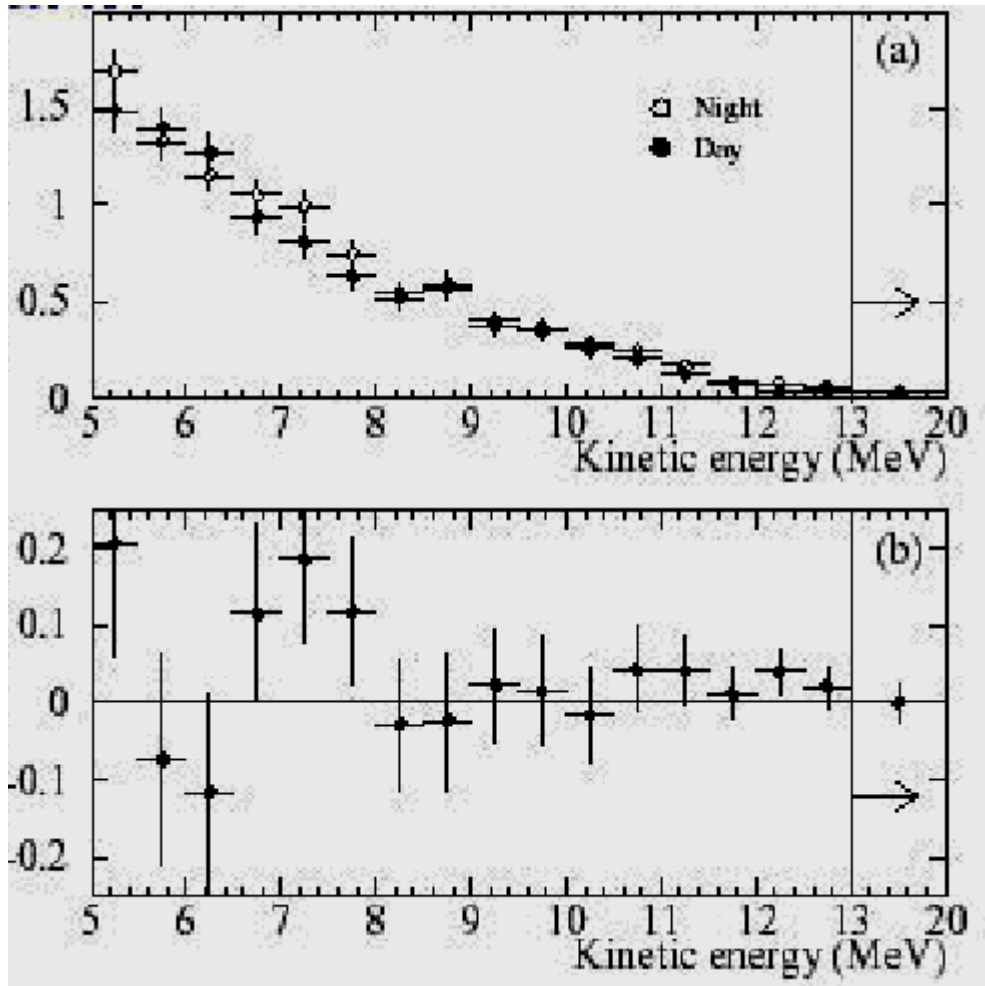
$$\Phi_e = 1.76^{+0.05}_{-0.05} \text{ (stat.) }^{+0.09}_{-0.09} \text{ (syst.) } \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

$$\Phi_{\mu\tau} = 3.41^{+0.45}_{-0.45} \text{ (stat.) }^{+0.48}_{-0.45} \text{ (syst.) } \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

# SNO - pomiary strumienia



# SNO - pomiary asymetrii dzień/noc



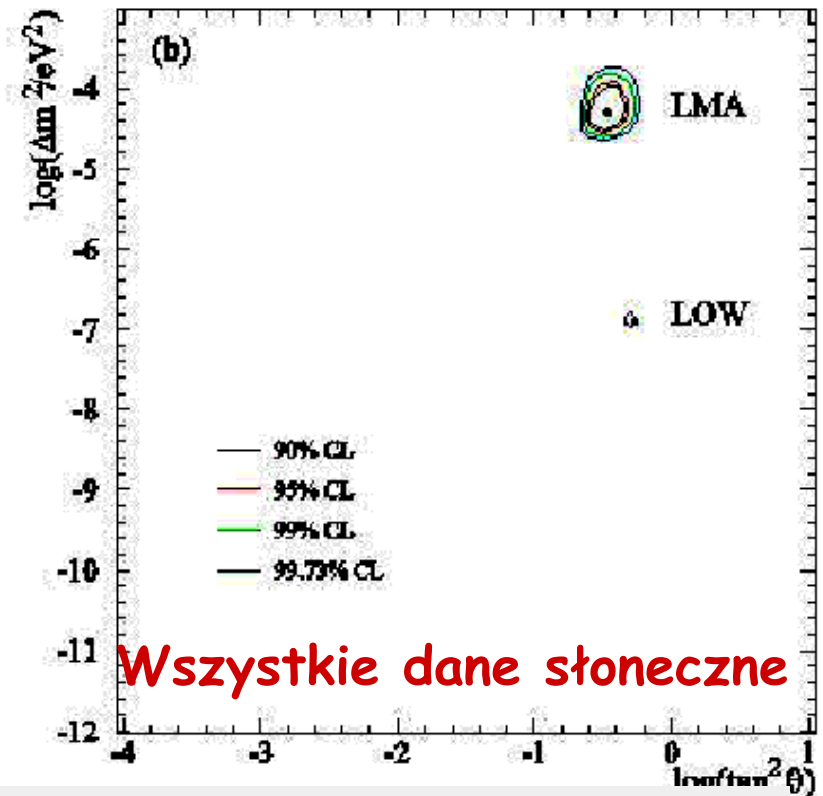
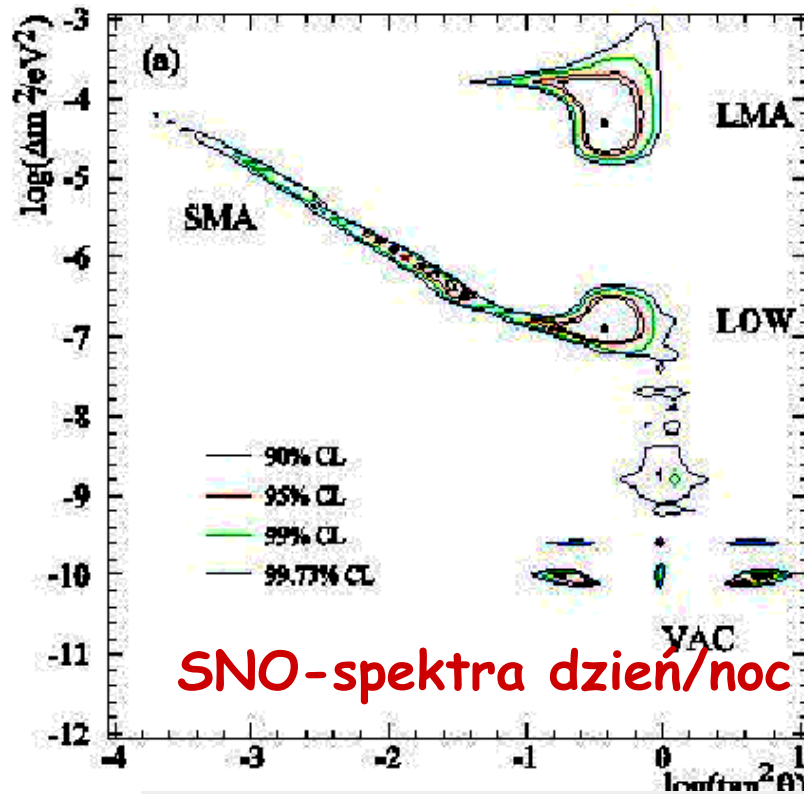
$$A_X = \frac{2 * (\Phi_{N,X} - \Phi_{D,X})}{(\Phi_{N,X} + \Phi_{D,X})}$$

$$A_e = 12.8 \pm 6.2^{+1.5}_{-1.4}$$

$$A_{tot} = -24.2 \pm 16.1^{+2.4}_{-2.5}$$

Bardzo ważny pomiar dla eksperymentu Borexino!

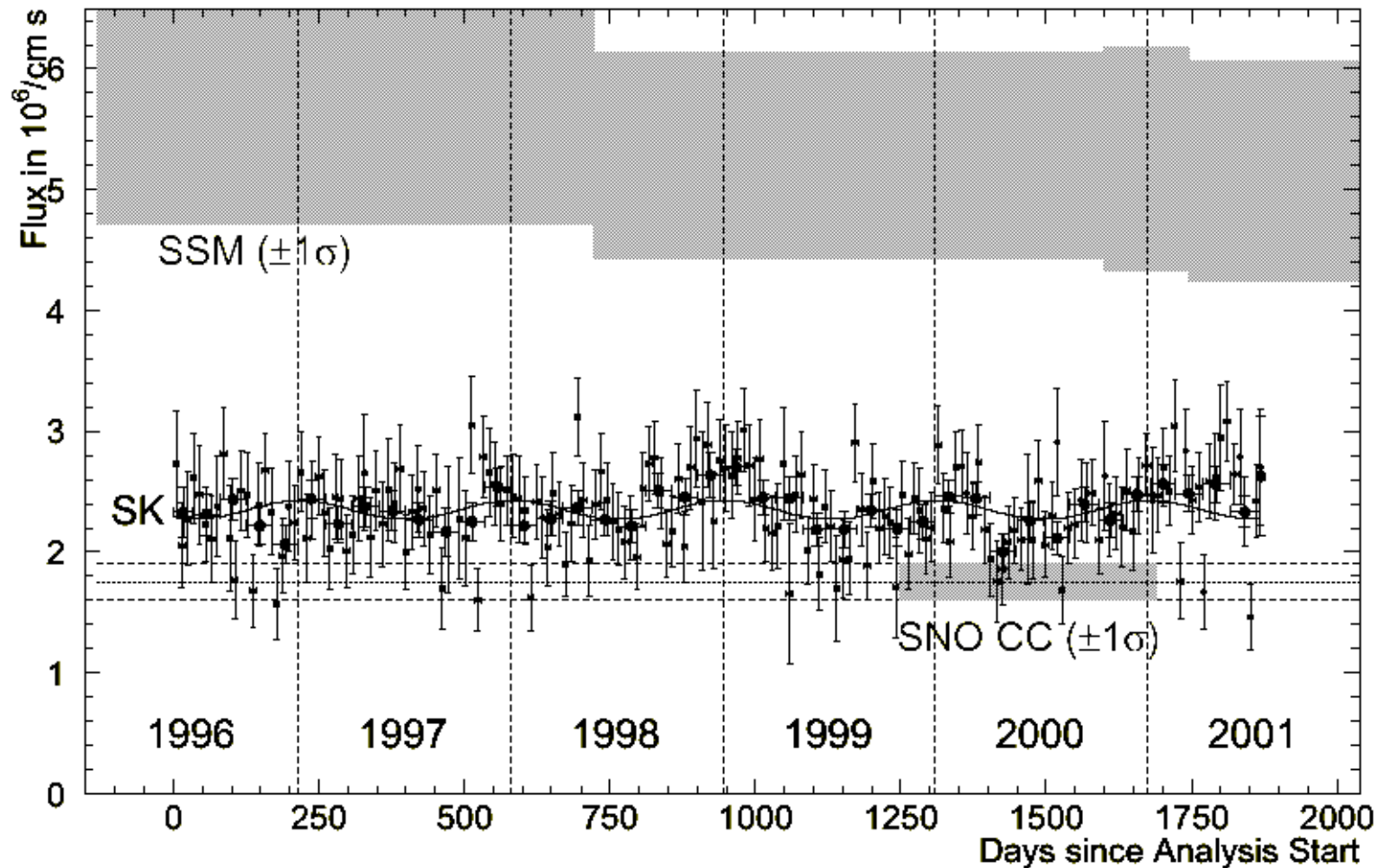
# Wyniki fitu do danych słonecznych



region	$\chi^2/\text{dof}$	$\phi_B/\text{SSM}$	$A_e$	$\Delta m^2 \text{ (eV}^2\text{)}$	$\tan^2\theta$	CL
LMA	57.0/72	1.16	6.4%	$5.0 \times 10^{-5}$	0.34	---
LOW	67.7/72	0.98	5.9%	$1.3 \times 10^{-7}$	0.55	99.5%

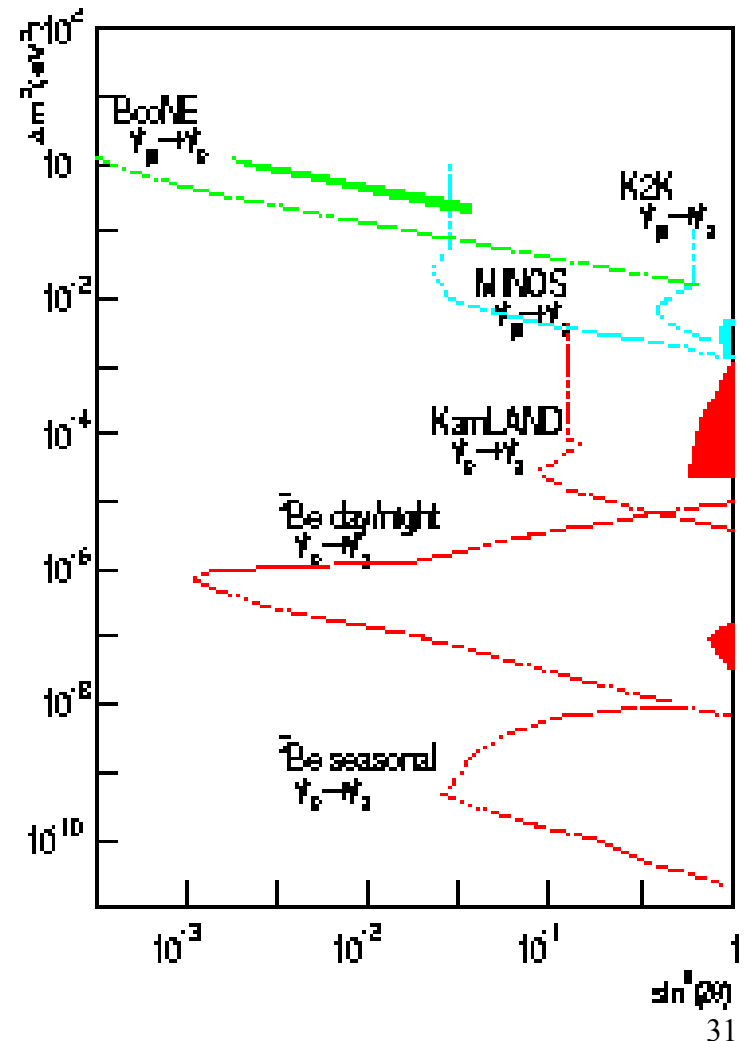


# SuperKamiokande - zależność strumienia od pory roku

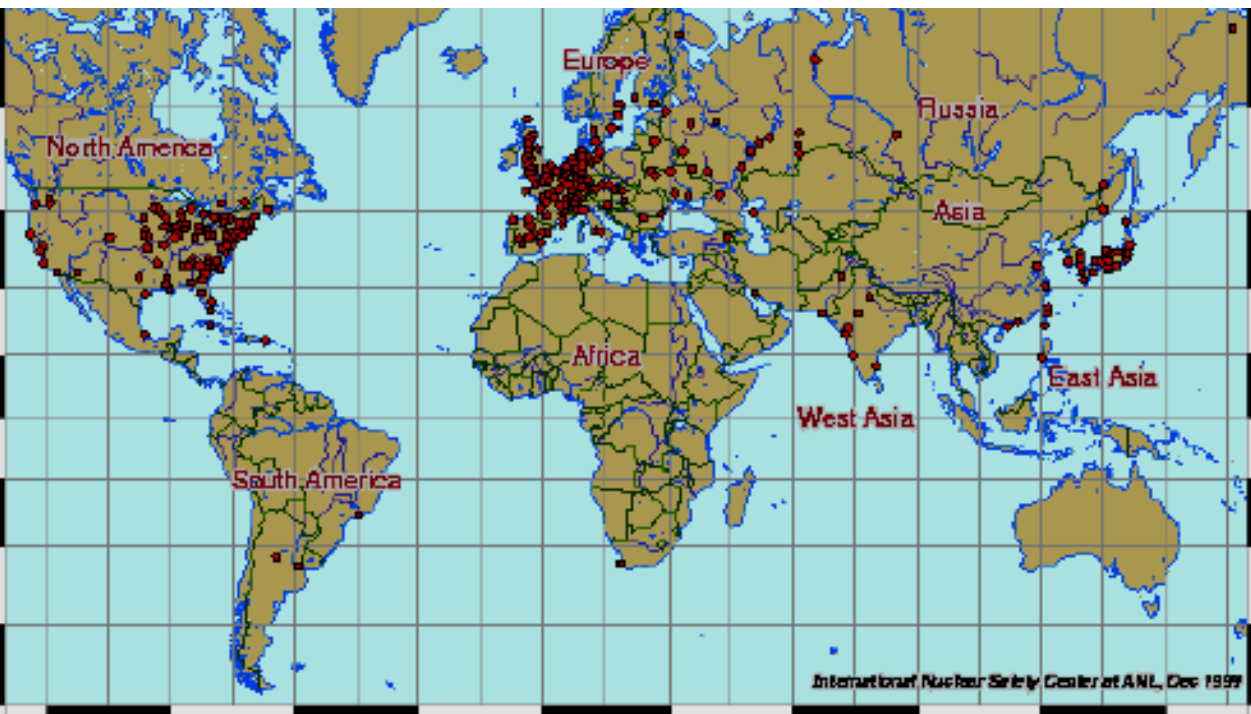


# Efekt LSND - dodatkowy obszar oscylacji

Sprawdzany w eksperymencie MiniBoone' który rozpoczął zbieranie danych latem



# Antyneutrino z reaktorów



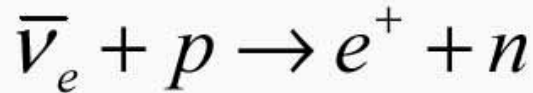
Duża siłownia  
jądrowa daje  
 $6 \times 10^{20}$  anty- $\nu$ /sek  
i 3 GW mocy  
cieplnej

Można je wykorzystać do  
badań oscylacji, np.  
eksperyment Palo Verde

A.Zalewska, konsersatorium PTF,  
12.12.2002



# Antyneutrino z reaktorów

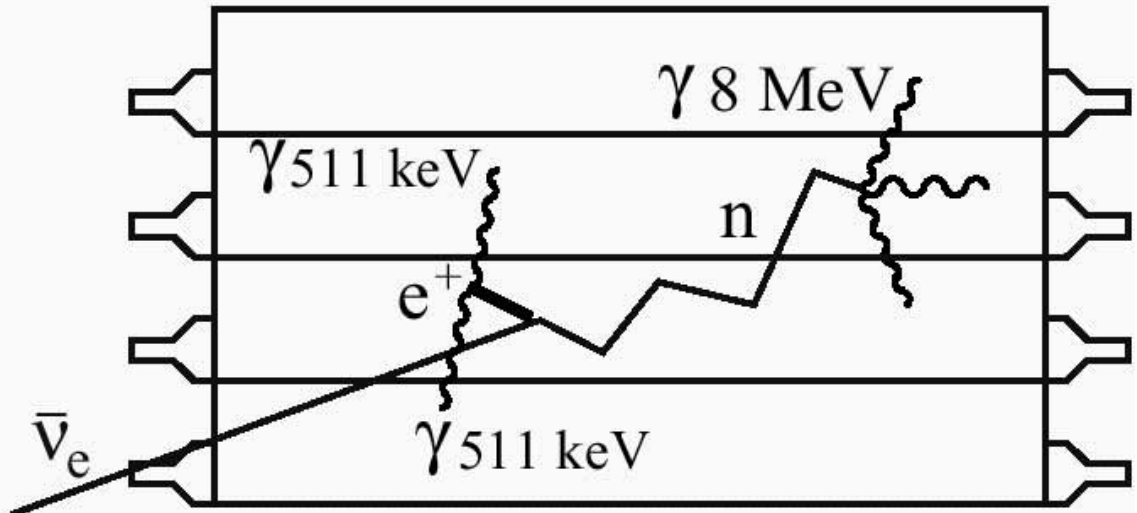


- Large(r) cross-section
- Specific signature

•  $e^+$  kinetic energy (<8 MeV)

• 2 annihilation  $\gamma$ s (0.5 MeV)

• neutron capture (2 to 8 MeV)



neutrino energy measured from positron energy

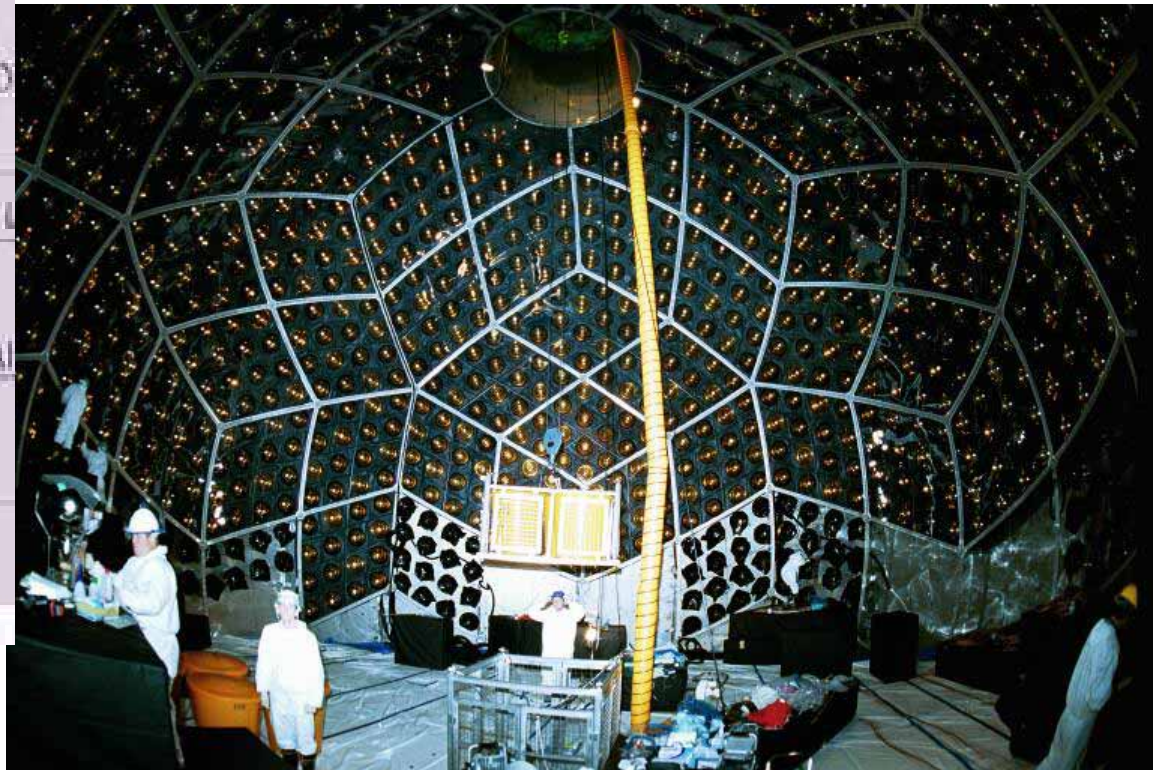
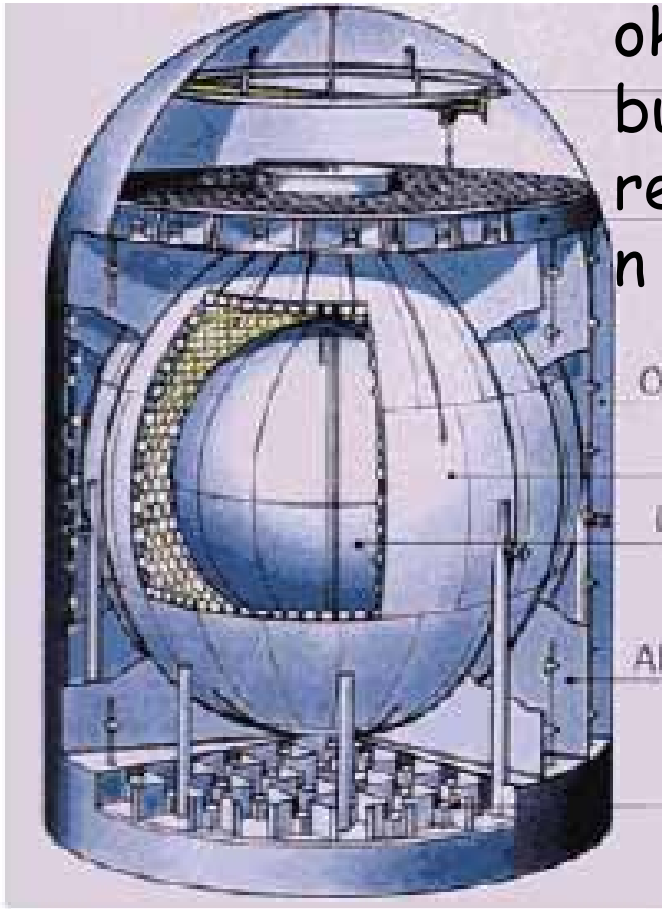


$$E_{\bar{\nu}} \cong E_{e^+} + (M_n - M_p) + m_{e^+}$$

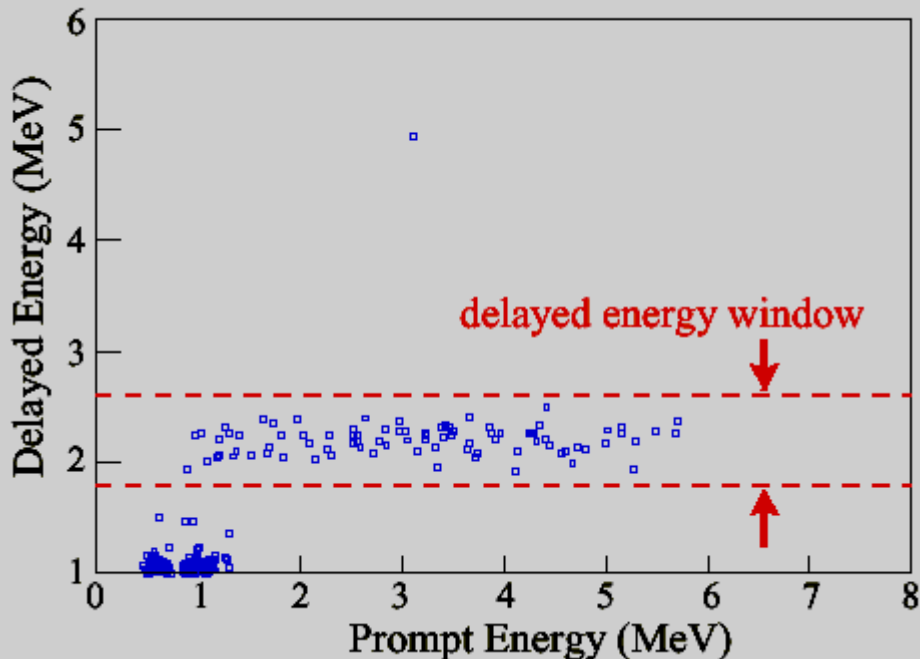


# Eksperyment reaktorowy KamLand

detektor - 1 ktona ciekłego scyntylatora,  
ok. 2000 fotopowielaczy, obszar  
buforowy - olej, det. veto - woda  
rejestracja  $e^+$  i  $\gamma$  (2.2 MeV) z wychwytu  
n na protonie, ruszył w styczniu 2002



# Eksperyment reaktorowy KamLand



54 przypadki zaobserwowane  
wobec  $86.8 \pm 5.6$   
oczekiwanych

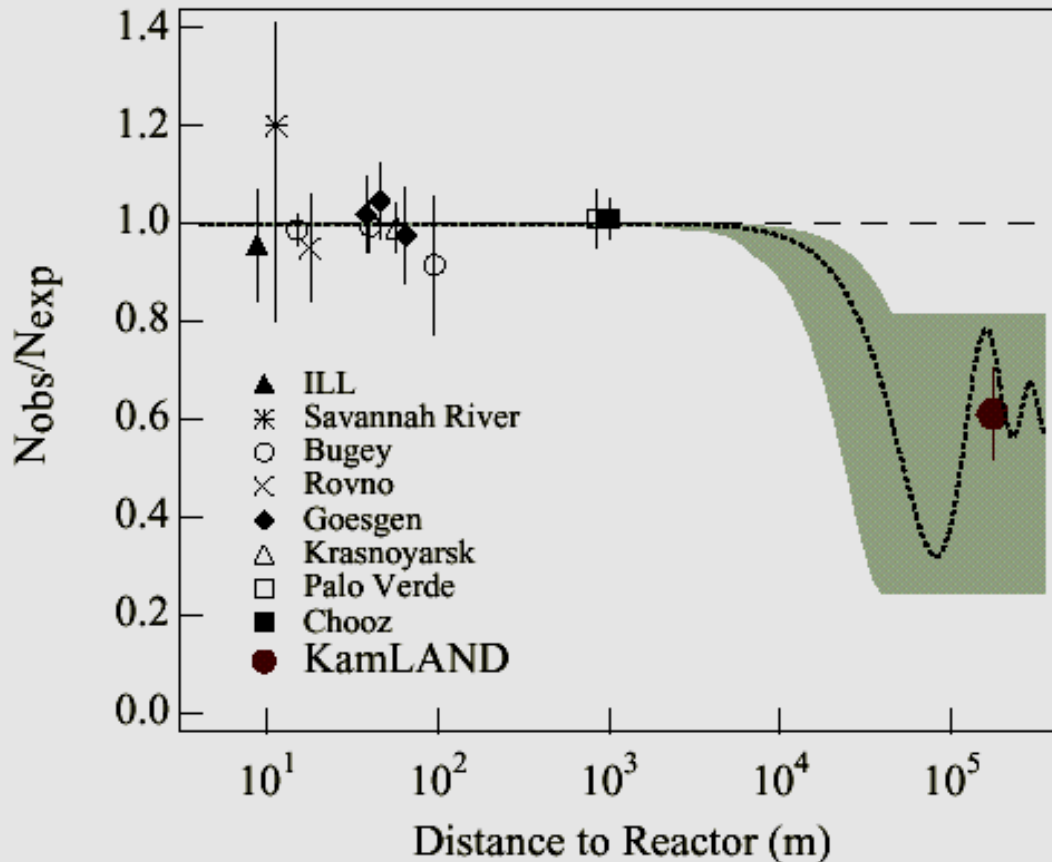
A.Zalewska, konwersatorium PTF,  
12.12.2002

Detektor „patrzy” na ok.  
30 reaktorów w Japonii i  
Korei, typowa odległość  
180 km,

Strumień antyneutrino jest  
proporcjonalny do  
całkowitej mocy siłowni -->  
ciągłe monitorowanie ich  
pracy

Obserwacja sygnału z  
anihilacji pozytonu w  
opóźnionej koincydencji z  
fotonem od wychwytu n na  
protonie

# KamLand - obserwacja oscylacji



## Oslabienie strumienia

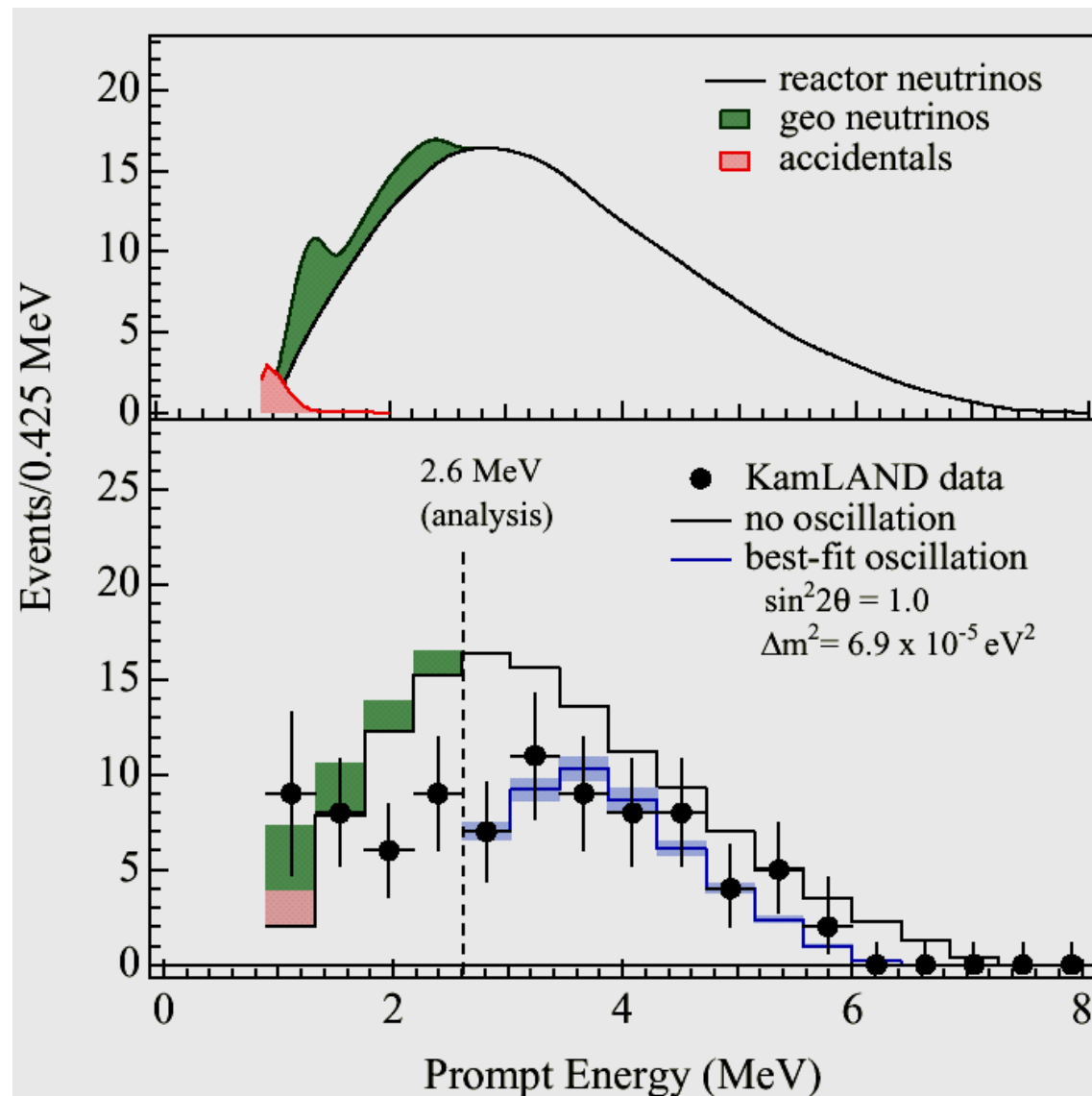
Wynik ogłoszony 12-go grudnia na konferencji astrofizycznej we Florencji

Na szaro zaznaczony obszar 95% CL dla rozwiązania LMA  
 $\sin^2 2\theta = 0.833$ ,  
 $\Delta m^2 = 5.5 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$

$$\frac{N_{obs} - N_{BG}}{N_{expected}} = 0.611 \pm 0.085(\text{stat}) \pm 0.041(\text{syst})$$

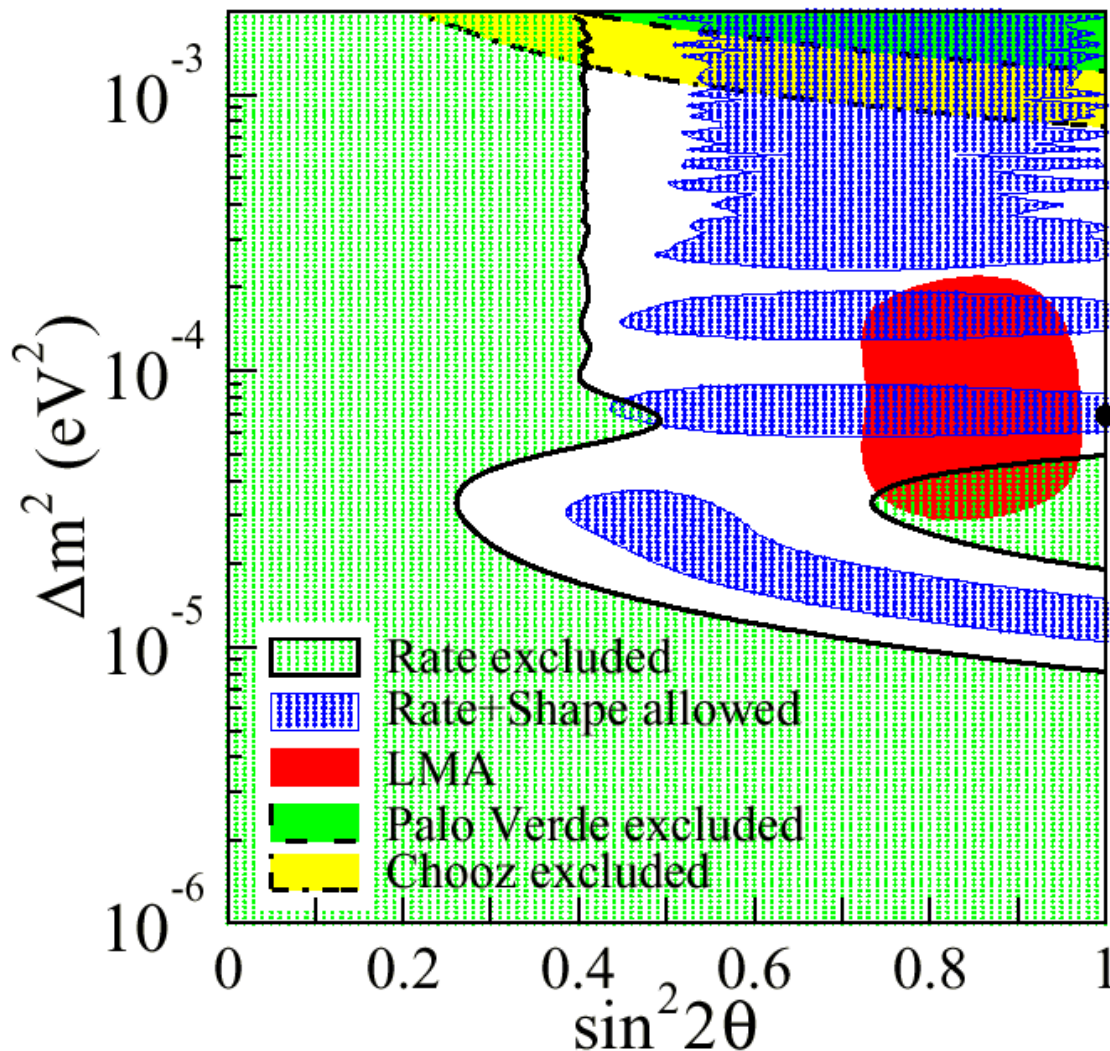


# KamLand - obserwacja oscylacji



Widmo energii neutrin  
- modyfikacja na skutek  
oscylacji

# KamLand - parametry oscylacji



Najlepszy fit do  
danych KamLANDu dla  
 $\Delta m^2 = 6.9 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$   
 $\sin^2 2\theta = 1.0$

---

# Dalsza przyszłość

---

Liczba oddziaływań neutrin z oscylacji zarejestrowanych w eksperymencie zależy od wydajności źródła neutrin, długości bazy pomiarowej i wielkości detektora.

Przyszłe wydajne źródła neutrin:

- Superwiązki - intensywne wiązki neutrin z rozpadów mezonów  $\pi$  wytwarzane w oparciu o protonowe akceleratory dużej mocy (rzędu MW)
- Fabryki neutrin - wiązki neutrin z rozpadów leptonów  $\mu$ , utworzone w oparciu o miony przyspieszone do energii typowo kilkudziesięciu GeV

Rozważa się budowę znacznie większych detektorów

---

# Podsumowanie

---

- **Oscylacje neutrin atmosferycznych stwierdzone na poziomie ponad 15 odchyłeń standardowych, głównie w eksperymencie SuperKamiokande**

**Potwierdzone w akceleratorowym eksperymencie K2K**

- **Oscylacje neutrin słonecznych stwierdzone na poziomie ponad 5 odchyłeń standardowych, głównie w oparciu o pomiary w eksperymencie SNO**

**Pierwsze wyniki reaktorowego eksperymentu KamLAND potwierdzają oscylacje neutrin słonecznych**

- **Efekt LSND czyli oscylacji neutrin przy różnicy mas pojedynczych eV jest sprawdzany w eksperymencie MiniBoone**

- **Dalsza przyszłość: super-wiązki, fabryki neutrin, nowe detektory**