

Fizyka neutrin - wykład 6,7

Agnieszka Zalewska

16.04.2008, 23.04.2008

- „Zagadka” neutrin słonecznych - za mały strumień słonecznych ν_e w eksperymencie Davisa
- Eksperymenty „galowe” i SuperK potwierdzają wyniki Davisa
- Eksperyment SNO wyjaśnia zagadkę poprzez oscylacje neutrin słonecznych
- Eksperyment KamLAND potwierdza oscylacje w oparciu o reaktorowe anty- ν_e
- Parametry oscylacji neutrin atmosferycznych (akceleratorowych) i słonecznych (reaktorowych)



Neutrino słoneczne - strumień

Principal reactions of the proton-proton chain in the Sun

Number	Reaction	Percentage of solar terminations*	Maximum neutrino energy, MeV
1 (PP reaction)	$p + p \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu$ or	99.75	0.420
2 (PEP reaction)	$p + e^- + p \rightarrow {}^2\text{H} + \nu$	0.3	1.44 (monoenergetic)
3	${}^2\text{H} + p \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$	100	
4	${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p$ or	85	
5	${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$	15	
6	${}^7\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu$	—	0.861 (90%), 0.383 (10%) (both monoenergetic)
7	${}^7\text{Li} + p \rightarrow 2 {}^4\text{He}$ or	—	
8	${}^7\text{Be} + p \rightarrow {}^8\text{B} + \gamma$	0.02	
9	${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be}^* + e^+ + \nu$	—	14
10	${}^8\text{Be}^* \rightarrow 2 {}^4\text{He}$	—	

*Percentage of solar terminations of the proton-proton chain in which this reaction occurs

Większość neutrin słonecznych pochodzi z reakcji: $4p \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e + 2\gamma$

Zmierzona świetlność fotonowa wynosi: $3.9 \times 10^{26} \text{ J s}^{-1}$

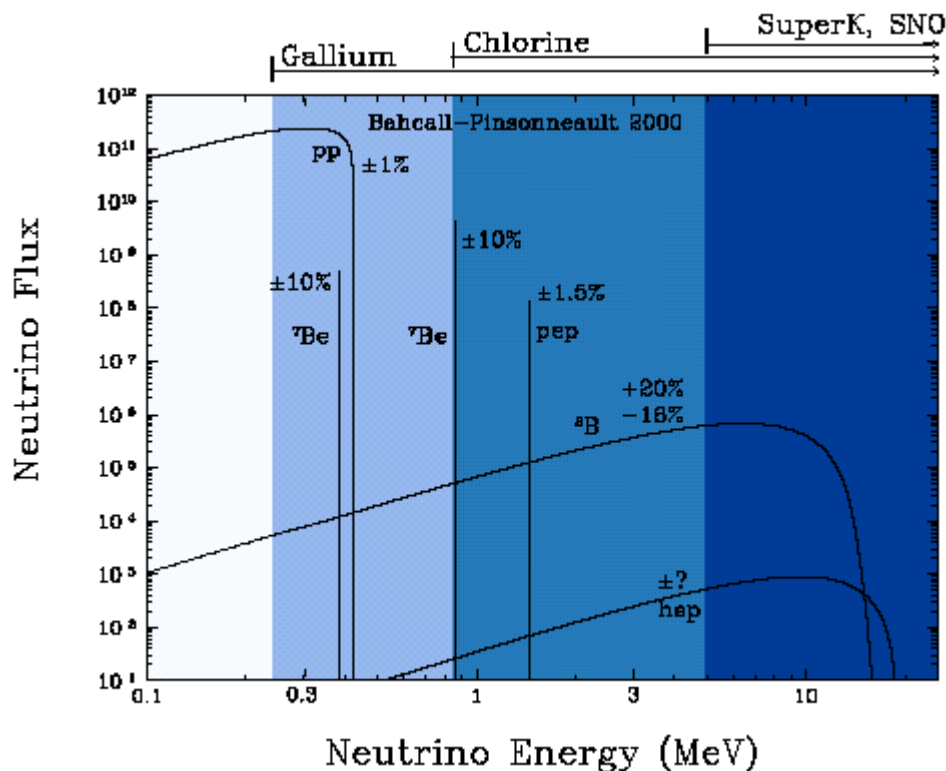
Energia/neutrino = $26.7 \text{ MeV} = 4.3 \times 10^{-12} \text{ J}$

Liczba reakcji: $3.9 \times 10^{26} \text{ J s}^{-1} / 4.3 \times 10^{-12} \text{ J} = 9.1 \times 10^{37} \text{ s}^{-1}$

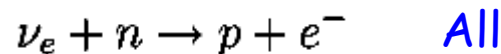
Odległość słońce-ziemia = $1.5 \times 10^{13} \text{ cm}$

Strumień neutrin = $N_\nu / 4\pi R^2 = 2 \times 9.1 \times 10^{37} / 4\pi \times (1.5 \times 10^{13})^2 = 6.4 \times 10^{10} \text{ } \nu_e \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$

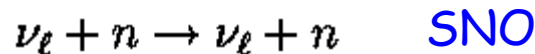
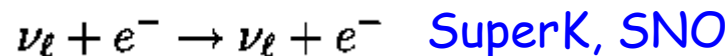
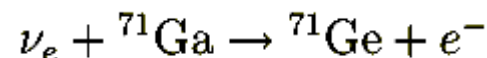
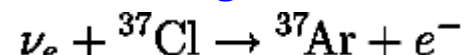
Neutrina słoneczne - podstawowe informacje



W Słońcu produkowane są tylko ν_e
Eksperymenty mierzą reakcje:



W szczególności:

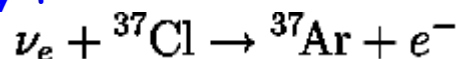


- Efekty masowe przy przejściu przez Słońce mogą być bardzo ważne
- Punktem odniesienia pomiarów są przewidywania modelu Słońca $R = N_{obs}/N_{MC}$
- Odległość Ziemia-Słońce waha się w granicach 7% w ciągu roku
- W nocy w drodze do detektora neutrino przechodzą całą grubość Ziemi, a w dzień - nie -> efekty masowe, objawiające się asymetrią dzień-noc, mogą dostarczyć dodatkowej informacji o parametrach oscylacji.

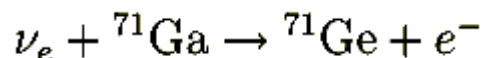
Neutrina słoneczne - metody detekcji

⇒ Eksperymenty radiochemiczne - tylko zliczenia jąder po reakcji:

„chlorowy”:



„galowy”:



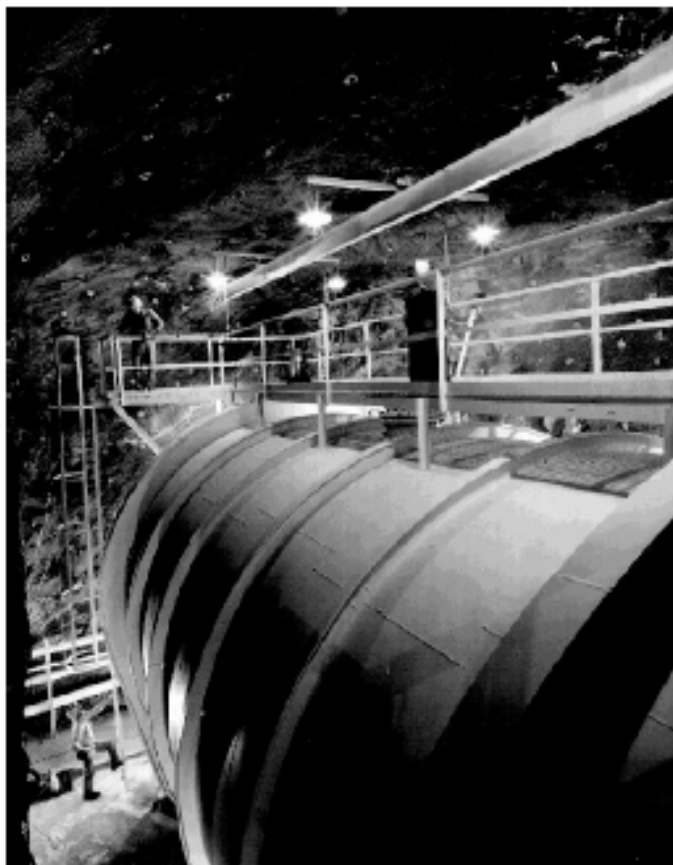
⇒ Pomiar scyntytacji (eksperyment KamLAND) - informacja o czasie poszczególnych etapów reakcji

⇒ Pomiar promieniowania Czerenkowa (eksperymenty SuperKamiokande, SNO) - informacja o czasie zdarzenia i o kierunku

Jednostka pomiarowa: 1 Solar Neutrino Unit [SNU] = 1 oddziaływanie neutrino/(sekunda $\times 10^{36}$ jąder tarczy)

typowo potrzeba kilkuset ton tarczy, aby zaszło 1 oddziaływanie/dzień

„Chlorowy” eksperyment Davisa



Pionierski eksperyment
radiochemiczny

30 lat pomiarów 1969-1999,
Nagroda Nobla w 2002 roku

Zbiornik w starej kopalni złota
Homestake w stanie Południowa
Dakota

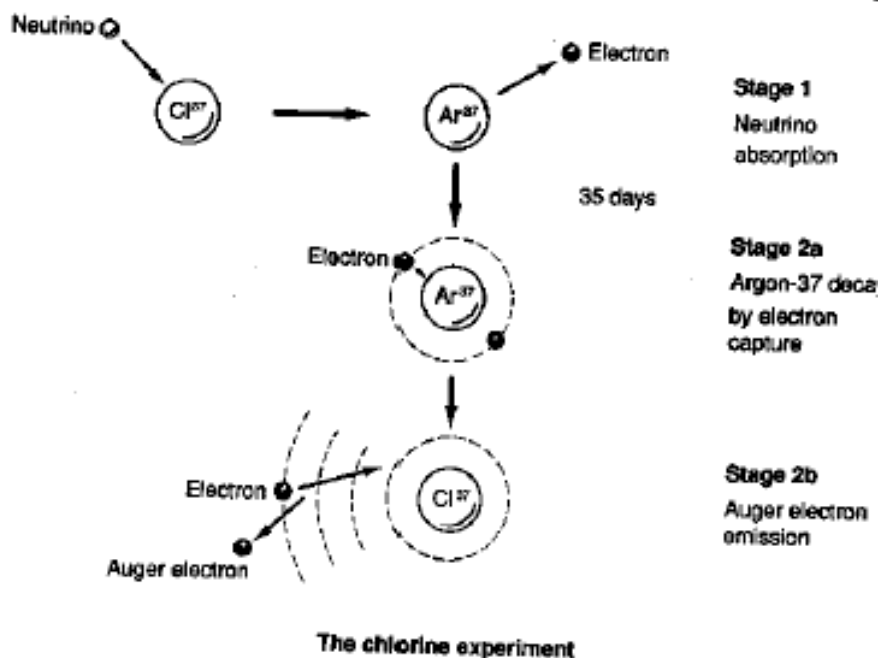
380000 l (615 ton) detergentu
 C_2Cl_4

24% jąder Cl stanowi ^{37}Cl

Badana reakcja:



Eksperyment Davisa - zasada pomiaru



Należało policzyć atomy ^{37}Ar powstałe w procesie absorpcji neutrin



Próg energetyczny: 813 keV

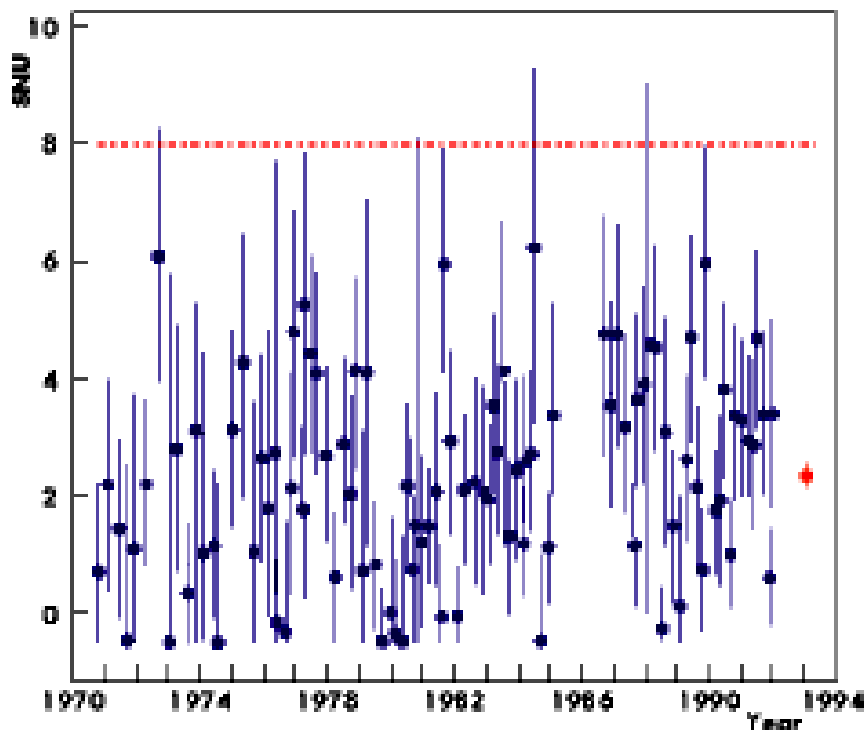
Jądro ^{37}Ar jest nietrwałe i w wyniku wychwytu elektronu z powłoki K przechodzi z powrotem w jądro ^{37}Cl .

Powoduje to przejście elektronu z wyższej powłoki na powłokę K, czemu towarzyszy emisja fotonu, który z kolei powoduje wybite elektronu Augera z zewnętrznej powłoki atomowej.



Pomiar polegał na usuwaniu z C_2Cl_4 atomów ^{37}Ar (co 2-3 miesiące zbiornik przedmuchiwany był He), gromadzeniu ich i zliczaniu elektronów Augera powstałych w procesie przemiany jądra Ar w jądro Cl.

Eksperyment Davisa - wyniki pomiarów



Eksperyment Davisa był czuły na neutrino borowe i berylowe (próg energetyczny: 813 keV)

Model słoneczny przewidywał 7.9 ± 0.9 SNU (1.5 atomów ^{37}Ar /dzień)

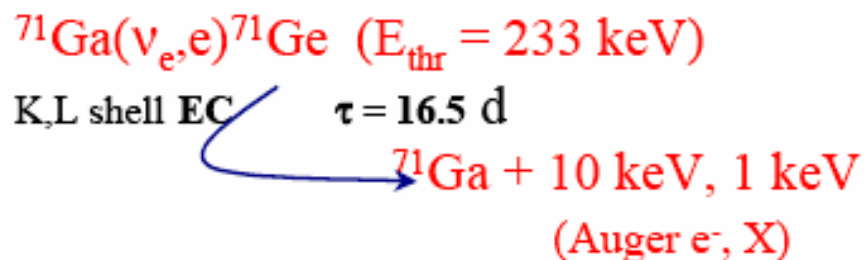
Pomiar dawał 2.56 ± 0.23 SNU (0.48 atomów ^{37}Ar /dzień) czyli obserwowano 1/3 przewidywanego strumienia.

Pytania:

Czy Davis na pewno dobrze kontroluje pomiar?

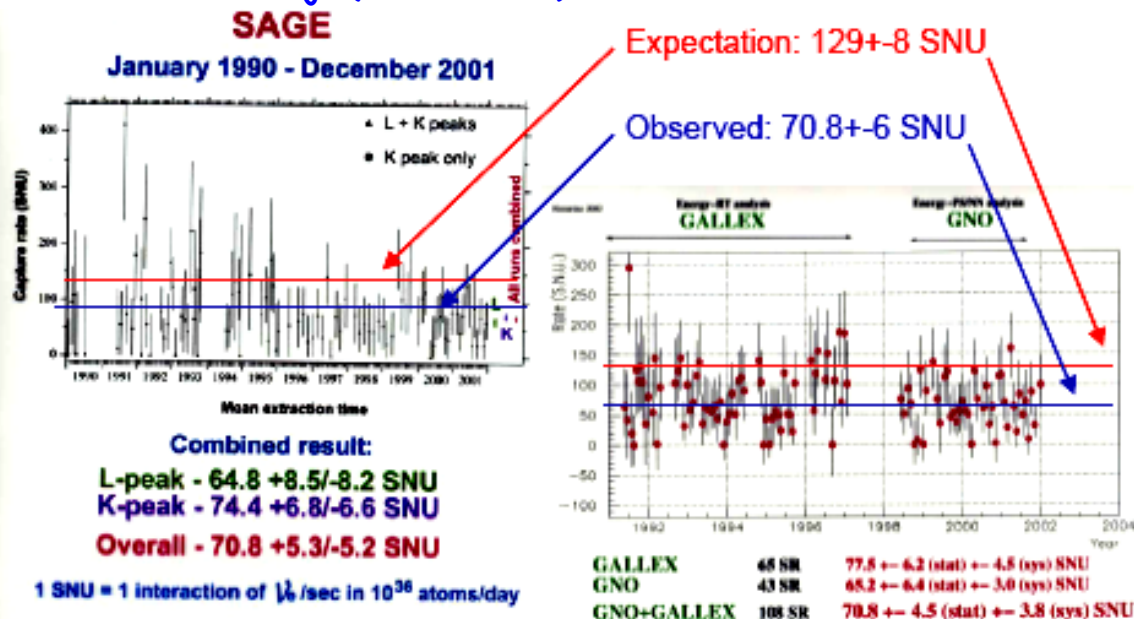
Czy Standardowy Model Słońca daje poprawne przewidywania?

Eksperymenty „galowe” - Gallex/GNO i SAGE



- Podobna zasada, jak w eksperymencie chlorowym, ale niższy próg energetyczny, więc dostępny większy strumień neutrin słonecznych
- Gallex (następnie GNO) - eksperyment prowadzony w Gran Sasso we Włoszech (30.3 tony Ga, SAGE - eksperyment w Baksanie w Rosji (57 ton Ga)

Potwierdzona obserwacja Davisa, ale mniejszy niedobór neutrin

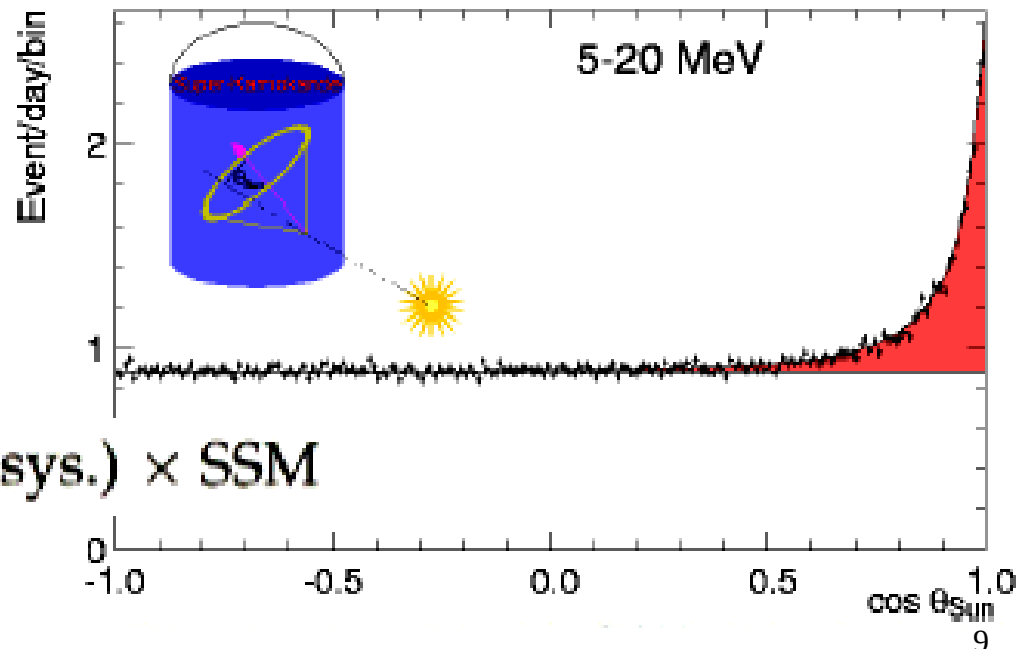


Neutrina słoneczne w eksperymencie SuperKamiokande

- Woda zawiera p, O i e^-
- Dla neutrin słonecznych (max energia 15 MeV) niemożliwe jest oddziaływanie z p ze względu na zachowanie liczb kwantowych (z p oddziałuje antyneutrino), niemożliwe jest oddziaływanie z O (za mała energia) $\rightarrow$ pozostaje rozpraszanie neutrin na elektronach atomowych $\nu_e (\nu_\mu, \nu_\tau) + e^- \rightarrow \nu_e (\nu_\mu, \nu_\tau) + e^-$
- Proces ten charakteryzuje przekrój czynny ~ 7 -krotnie większy dla ν_e niż dla ν_μ, ν_τ , kierunek rozproszonego elektronu bardzo dobrze naśladuje kierunek neutrina, zebrano 22400 przypadków o energii $> 5\text{MeV}$

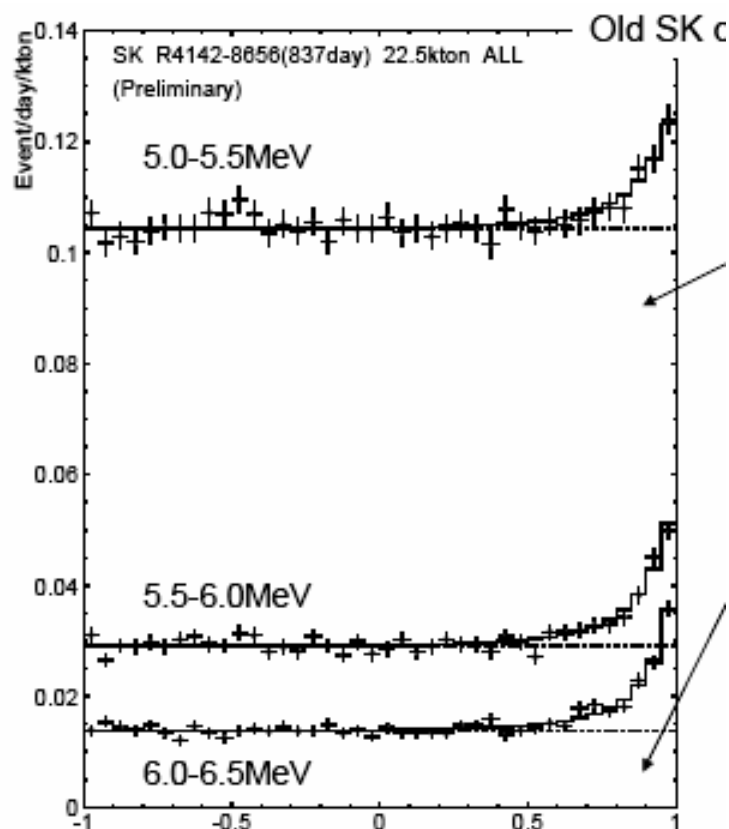
Kolejne potwierdzenie
obserwacji Davisa -
zarejestrowano 46.5%
oczekiwanego
strumienia neutrin

$$0.465 \pm 0.005(\text{stat.})^{+0.016}_{-0.015}(\text{sys.}) \times \text{SSM}$$



Neutrina słoneczne w eksperymencie SuperK - kalibracja energii, tło

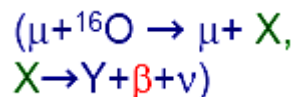
- Precyzyjna kalibracja absolutnej skali energii, energetycznej zdolności rozdzielczej iątowej zdolności rozdzielczej przy pomocy wiązki (5-16 MeV) z elektronowego liniaka
- Niezależna kalibracja w oparciu o reakcje $D+T \rightarrow He+n$ ($E_n=14.2$ MeV), $n+^{16}O \rightarrow p+^{16}N$ i pomiar elektronów z rozpadów β ^{16}N .



Tło: głównie Rn (rozpad β ^{214}Bi)

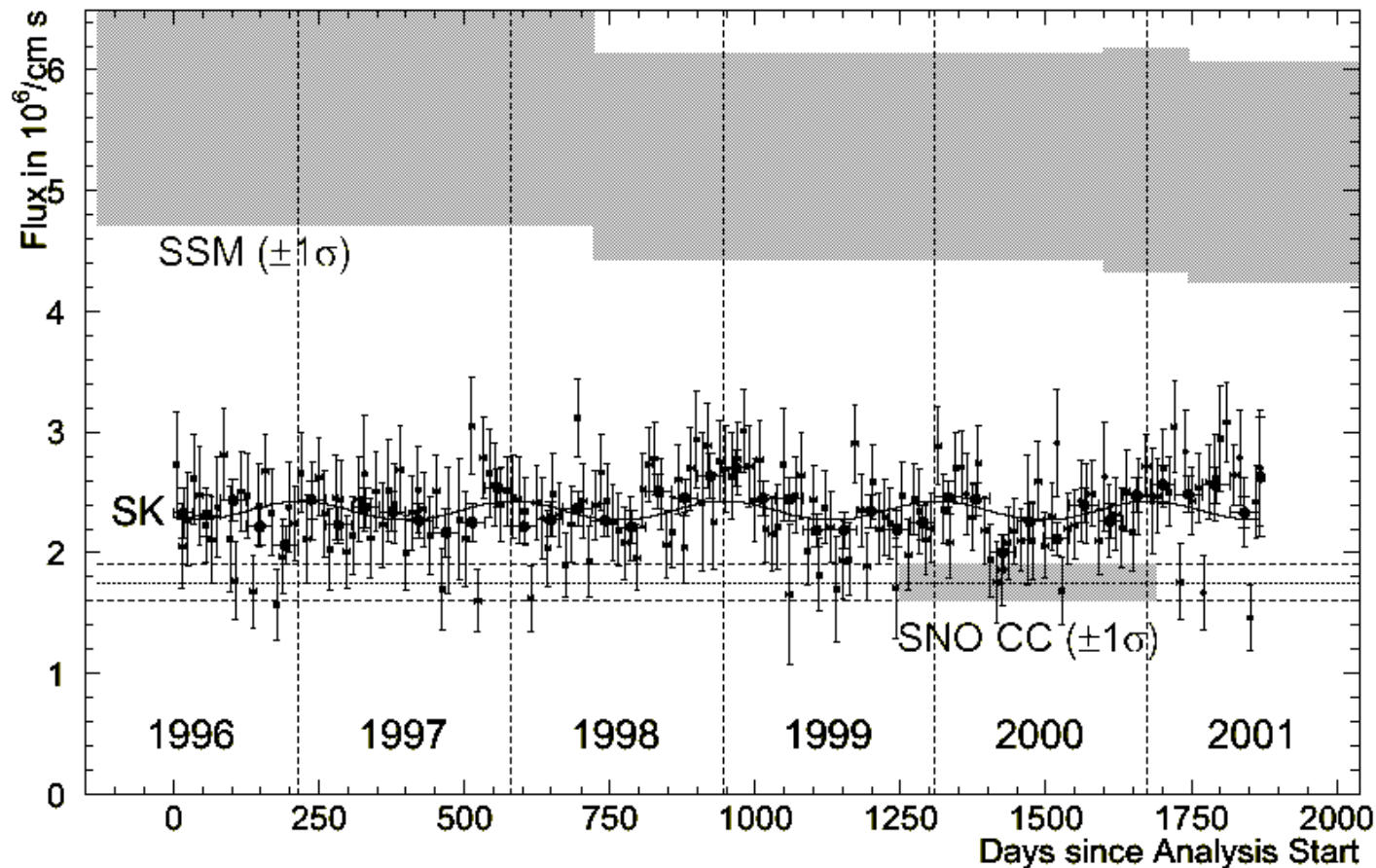
-> potrzebna bardzo czysta woda

Tło powyżej 6 MeV: głównie od oddziaływań mionów kosmicznych



-> wycinanie przypadków tła przez korelację czasową i przestrzenną z μ

SuperKamiokande - zależność strumienia neutronów słonecznych od pory roku



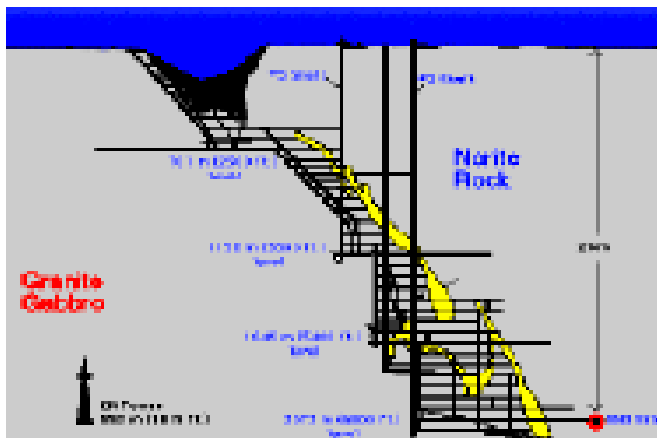
Nie zaobserwowano zmian większych niż oczekiwane z rocznej zmiany odległości między słońcem i ziemią

A.Zalewska, w.6, 16.4.2008

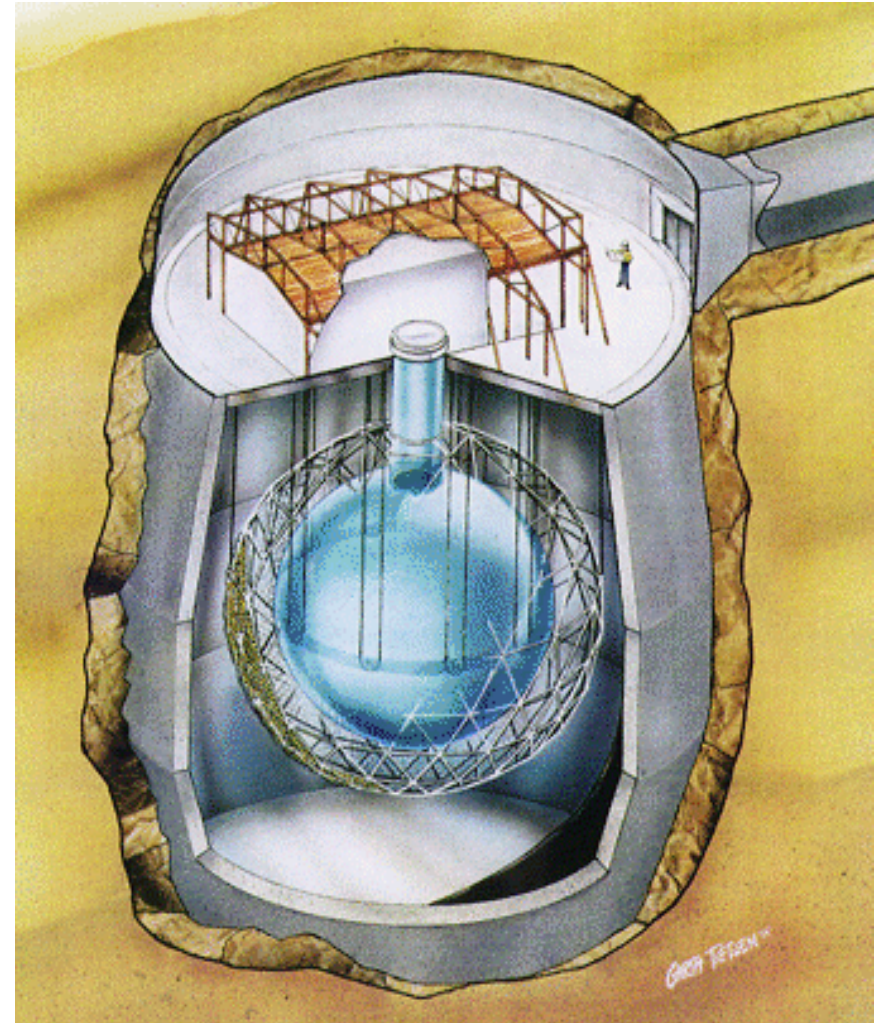
Oscylacje neutrin słonecznych - eksperyment SNO (Sudbury Neutrino Observatory)

Pierwsza publikacja w 2001 w oparciu o 3000 przypadków zebranych w okresie 11.99-05.01 - obserwacja oscylacji neutrin słonecznych

1000 ton D_2O , 9456 fotopowielaczy, 7 kton H_2O , 2000 m. pod ziemią, detekcja promieniowania Czerenkowa, próg energetyczny 5 MeV,



A.Zalewska, w.6, 16.4.2008

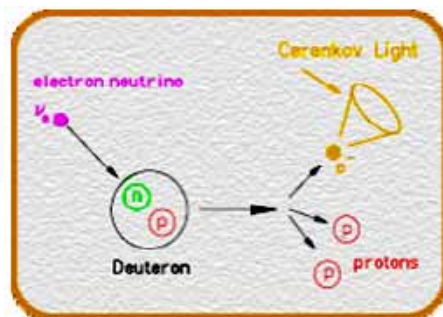


Detektor eksperymentu SNO



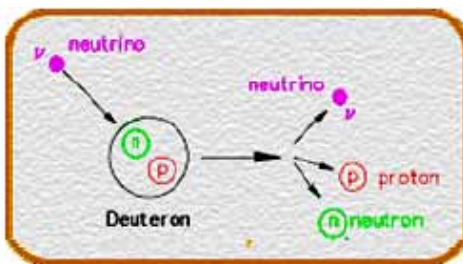
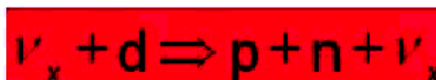
Procesy mierzone w eksperymencie SNO

CC



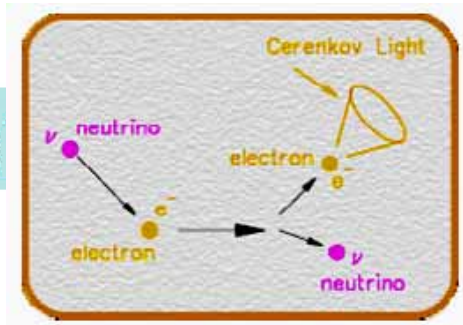
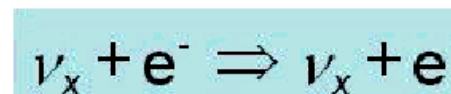
tylko ν_e
dobry pomiar energii ν_e , mała
czułość na kierunek $1-1/3\cos\theta$
 $E_{th}=1.4\text{MeV}$

NC



wszystkie rodzaje neutrin, ten
sam przekrój czynny, pomiar
całkowitego strumienia neutrin
borowych $E_{th}=2.2\text{MeV}$

ES



mała liczba przypadków, głównie
czuły na ν_e , duża czułość na
kierunek
reakcja mierzona w SuperK

SNO – poszukiwanie odpowiedzi na pytania:

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

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

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

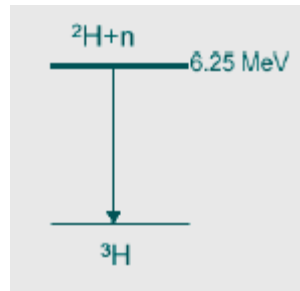
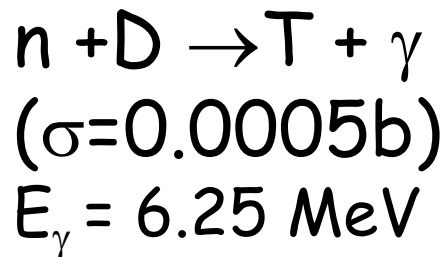
Pomiar procesu NC

Trzy etapy eksperymentu SNO - wszystkie zakończone,
koniec eksperymentu w 2006 roku

I - czysta D₂O

Czułość dla reakcji NC

$$\varepsilon_n \sim 24\%$$

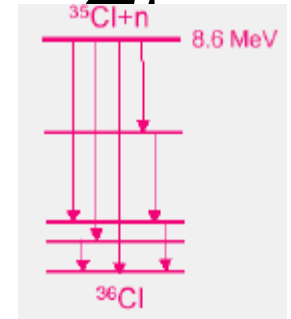
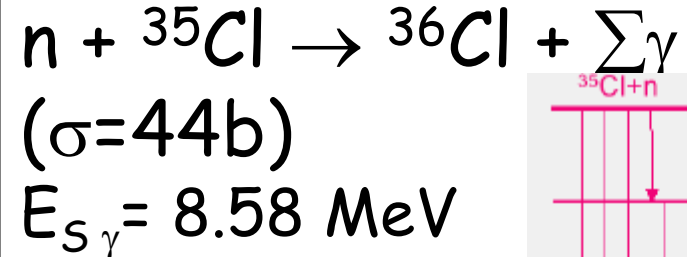


Rozdzielenie NC i CC przez
analizę rozkładów energii,
promienia i kierunku

II - dodane 2 tony soli

Podniesiona czułość NC

$$\varepsilon_n \sim 83\%$$



Rozdzielenie NC i CC przez
izotropię przypadku

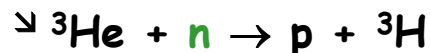
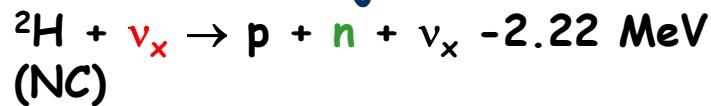
Pomiar procesu NC - trzeci etap eksperymentu SNO - dodane liczniki helowe

Liczniki ^3He zanurzone w D_2O

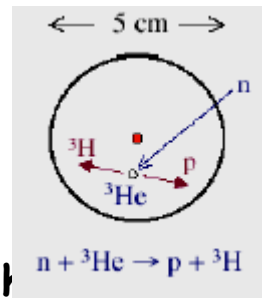
48 sznurów w odstępach 1-m

ok. 400 m - całkowita aktywna długość

Zasada detekcji



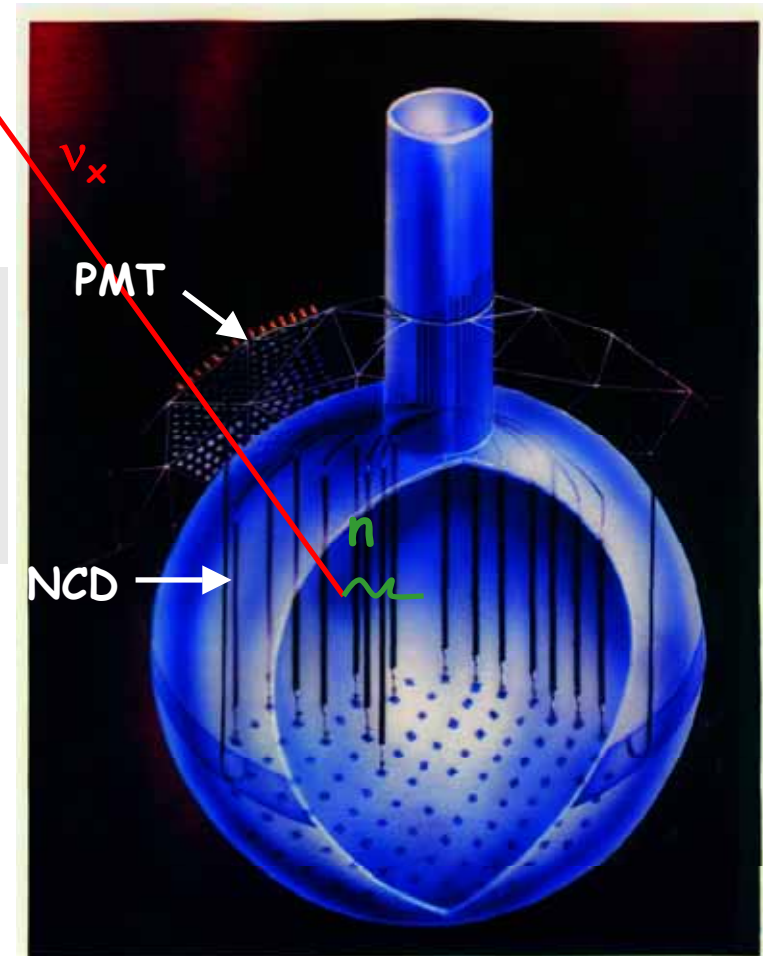
Pomiar depozytu energii w licznikach



Motywacja fizyczna

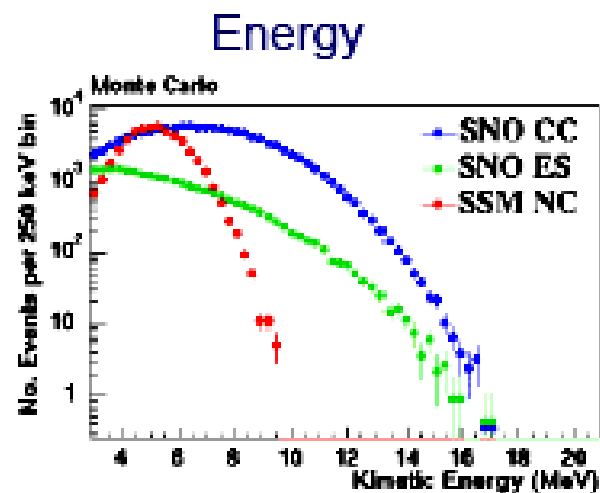
Pełne rozróżnienie przypadków NC i CC.

Inna systematyka niż w przypadku wychwytu neutronu na Cl



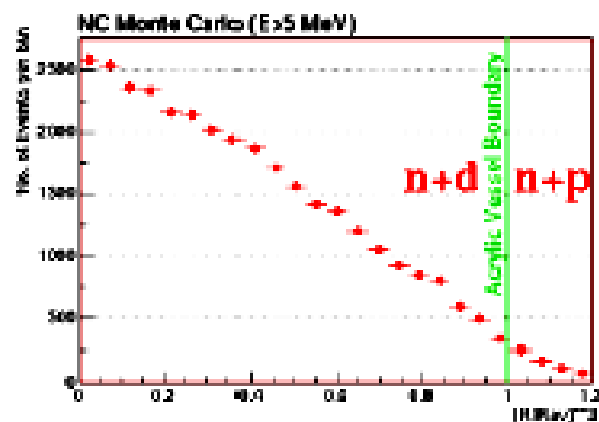
Etap I - rozróżnienie procesów - symulacja

Signal extraction:
Monte Carlo
Simulation
(pure D₂O phase)

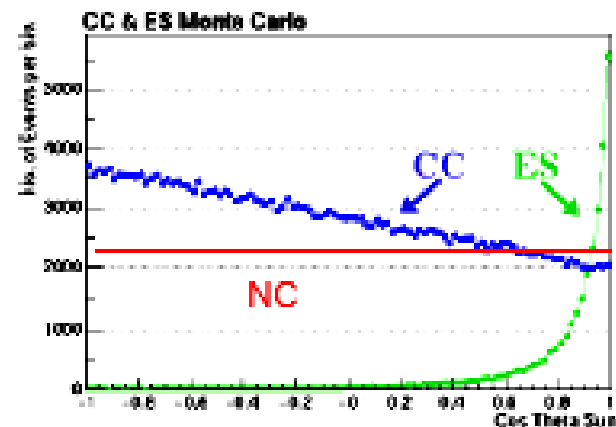


Radial Response

$n + d \rightarrow t + \gamma \dots \rightarrow e^-$ ($E_\gamma = 6.25$ MeV)



Direction from the Sun



Etap I - rozróżnienie procesów - pomiar

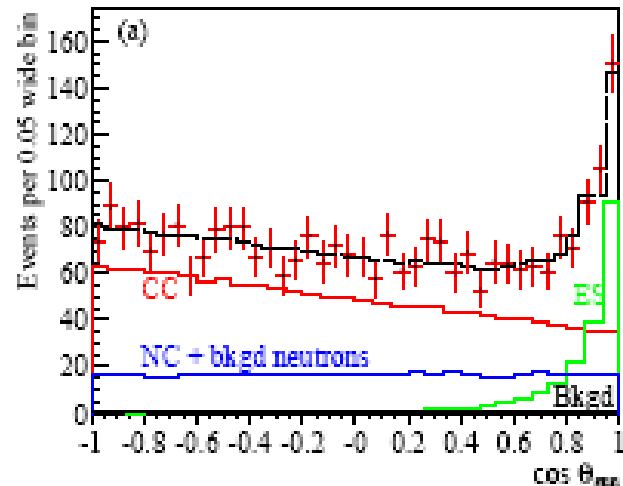
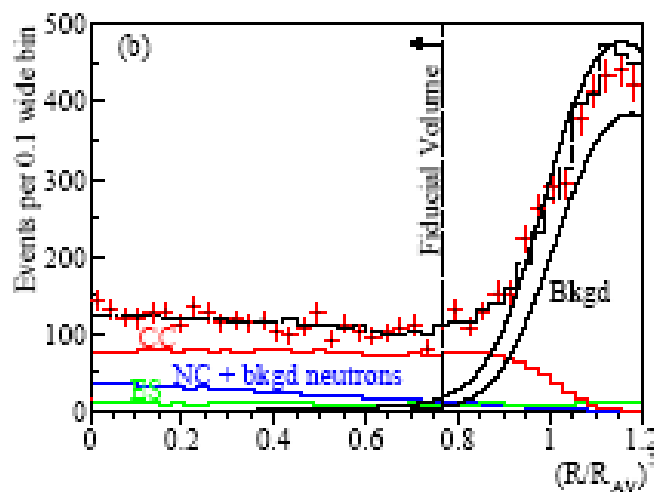
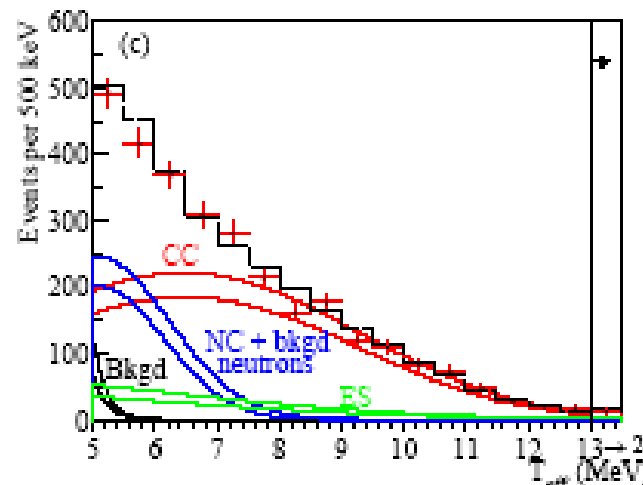
SNO Results
(pure D₂O)

#EVENTS

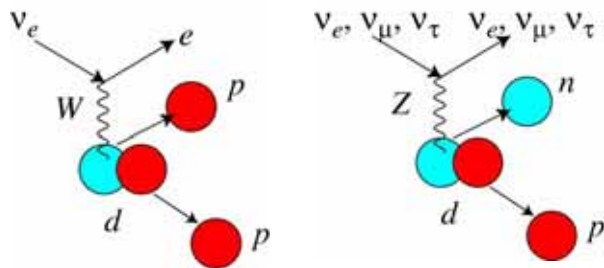
CC 1967.7^{+61.9}_{+60.9}

ES 263.6^{+26.4}_{+25.6}

NC 576.5^{+49.5}_{+48.9}

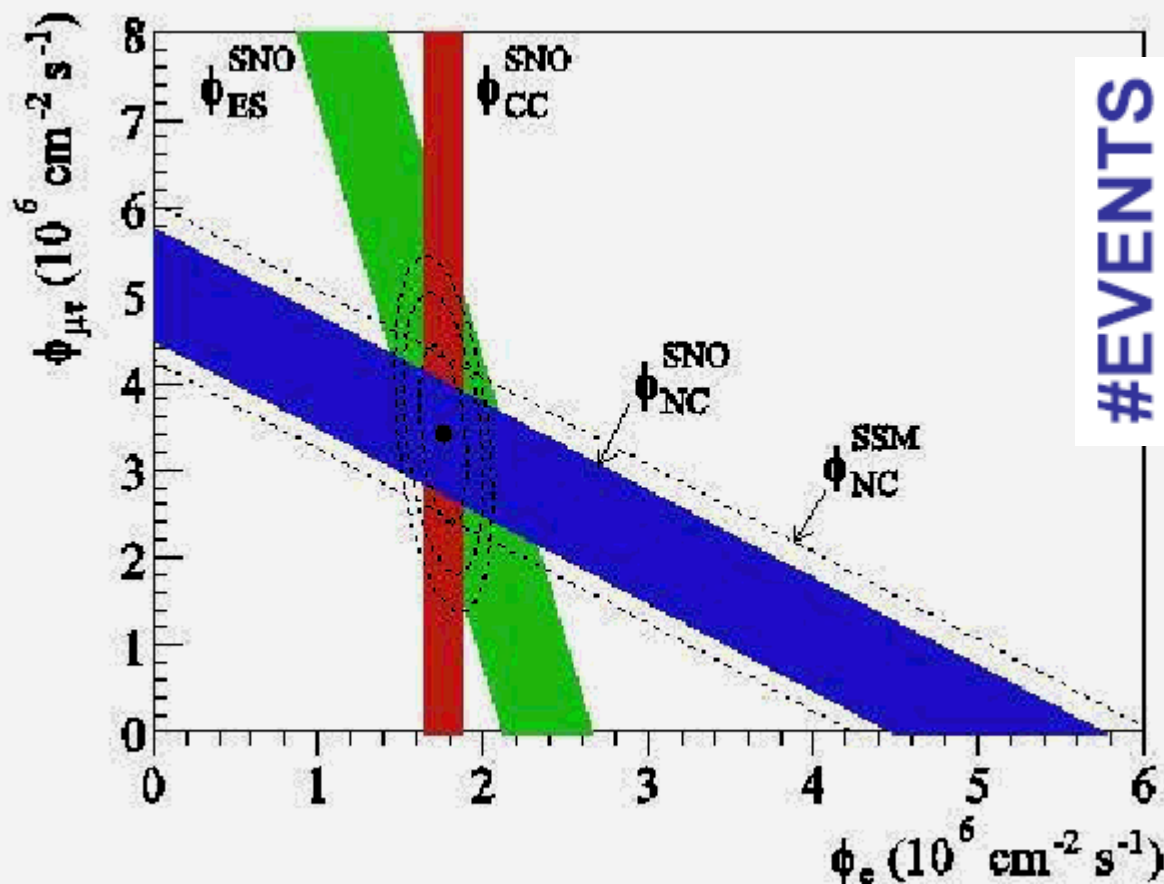


Wyniki SNO z 2002 roku (f.1) - analiza strumieni



$$\Phi_{CC} = 1.76 \pm 0.05 \pm 0.09 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$$

$$\Phi_{NC} = 5.09^{+0.44}_{-0.43} {}^{+0.46}_{-0.43} \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$$



#EVENTS

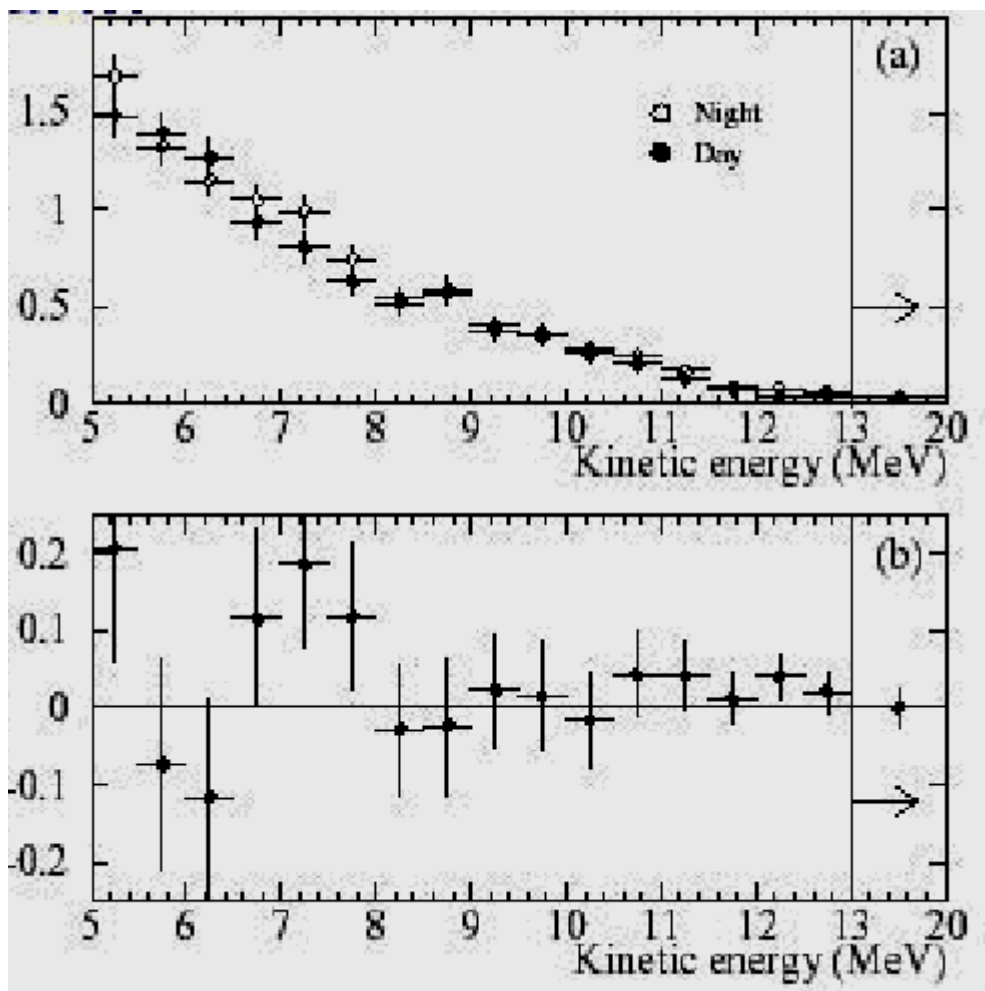
CC 1967.7^{+61.9}_{+60.9}

ES 263.6^{+26.4}_{+25.6}

NC 576.5^{+49.5}_{+48.9}

$$\Phi_{ssm} = 5.05^{+1.01}_{-0.81}$$

Wyniki SNO z 2002 roku - asymetria dzień-noc



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

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

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

To będzie bardzo ważny pomiar w eksperymencie Borexino i w ulepszonym eksperymencie KamLAND

2003 - wyniki SNO z fazy 2

Faza 2

- podwojona wydajność dla reakcji NC

$$\begin{aligned}\phi_{\text{CC}}^{\text{SNO}} &= 1.59^{+0.08}_{-0.07}(\text{stat})^{+0.06}_{-0.08}(\text{syst}) \\ \phi_{\text{ES}}^{\text{SNO}} &= 2.21^{+0.31}_{-0.26}(\text{stat}) \pm 0.10(\text{syst}) \\ \phi_{\text{NC}}^{\text{SNO}} &= 5.21 \pm 0.27(\text{stat}) \pm 0.38(\text{syst})\end{aligned}$$

Faza 1

$$\begin{aligned}\Phi_{\text{CC}}(\nu_e) &= 1.76^{+0.06}_{-0.05}(\text{stat.})^{+0.09}_{-0.09}(\text{syst.}) \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1} \\ \Phi_{\text{ES}}(\nu_x) &= 2.39^{+0.24}_{-0.23}(\text{stat.})^{+0.12}_{-0.12}(\text{syst.}) \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1} \\ \Phi_{\text{NC}}(\nu_x) &= 5.09^{+0.44}_{-0.43}(\text{stat.})^{+0.46}_{-0.43}(\text{syst.}) \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}\end{aligned}$$

nuclex/0309004

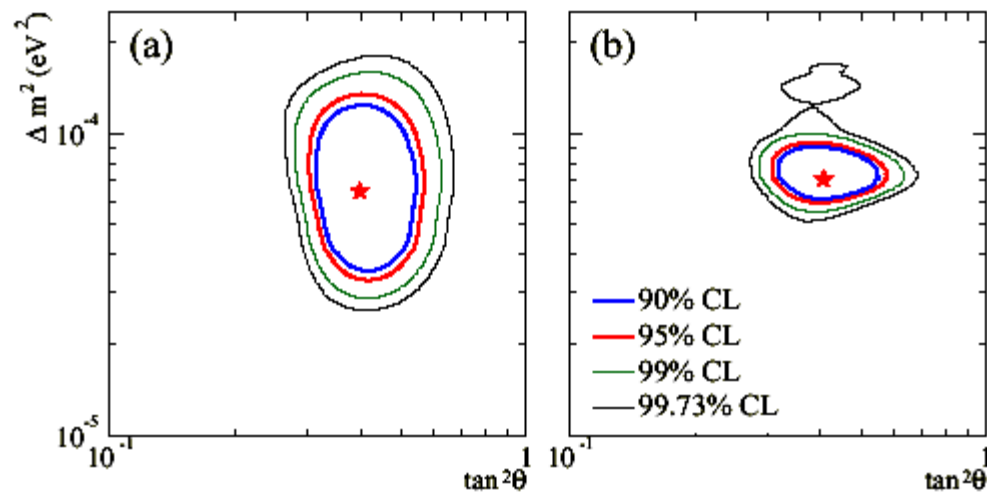


FIG. 5: Global neutrino oscillation contours. (a) Solar global: D₂O day and night spectra, salt CC, NC, ES fluxes, SK, Cl, Ga. The best-fit point is $\Delta m^2 = 6.5 \times 10^{-5}$, $\tan^2 \theta = 0.40$, $f_B = 1.04$, with $\chi^2/\text{d.o.f.} = 70.2/81$. (b) Solar global + KamLAND. The best-fit point is $\Delta m^2 = 7.1 \times 10^{-5}$, $\tan^2 \theta = 0.41$, $f_B = 1.02$. In both (a) and (b) the ^8B flux is free and the *hep* flux is fixed.

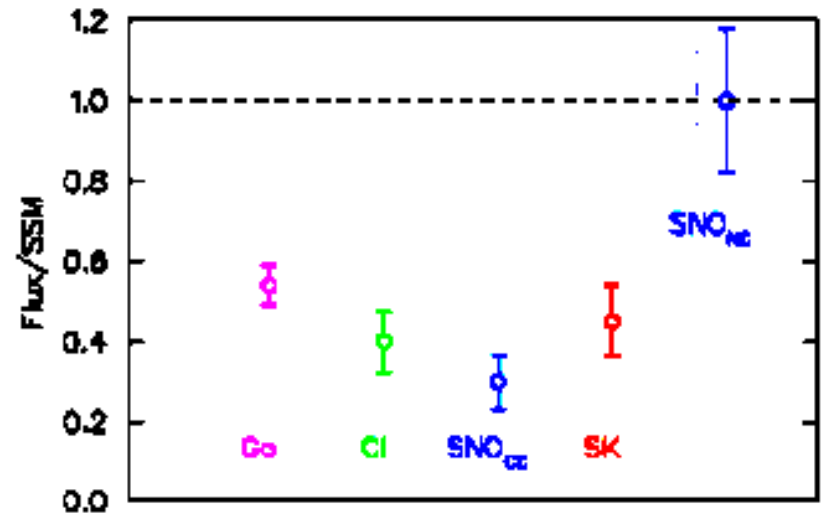
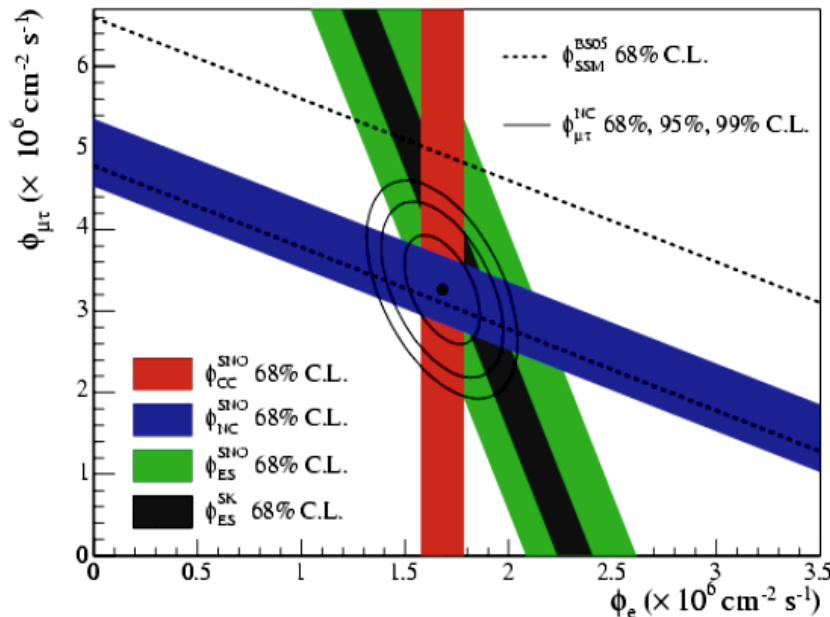
SNO - podsumowanie

2002

$$\Phi_{\text{ssm}} = 5.05^{+1.01}_{-0.81} \quad \Phi_{\text{sno}} = 5.09^{+0.44+0.46}_{-0.43-0.43}$$

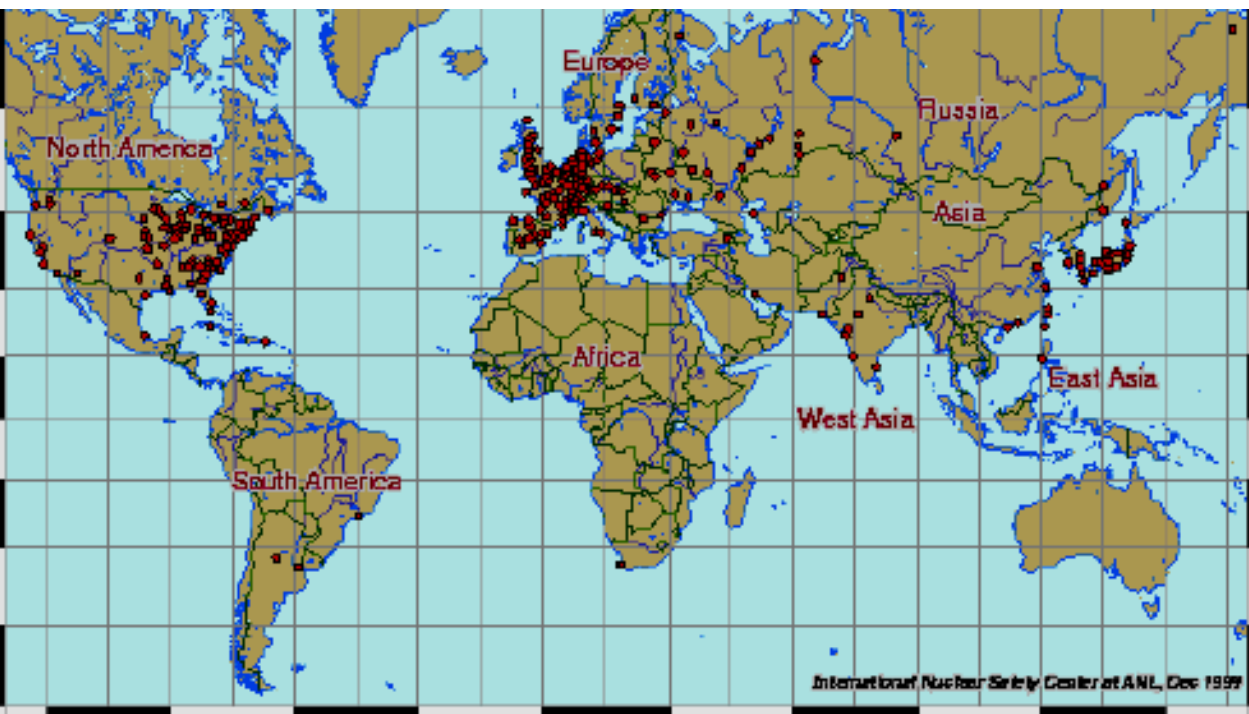
2005

Flavor content of solar flux.



Całkowity strumień neutrin zgodny z przewidywaniami Modelu Słońca, niedobór ν_e spowodowany ich przejściem w $\nu_{\mu,\tau}$ w drodze z wnętrza do powierzchni Słońca

Antyneutrino z reaktorów



Duża siłownia
jądrowa daje
 6×10^{20} anty- ν /sek
i 3 GW mocy
cieplnej

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

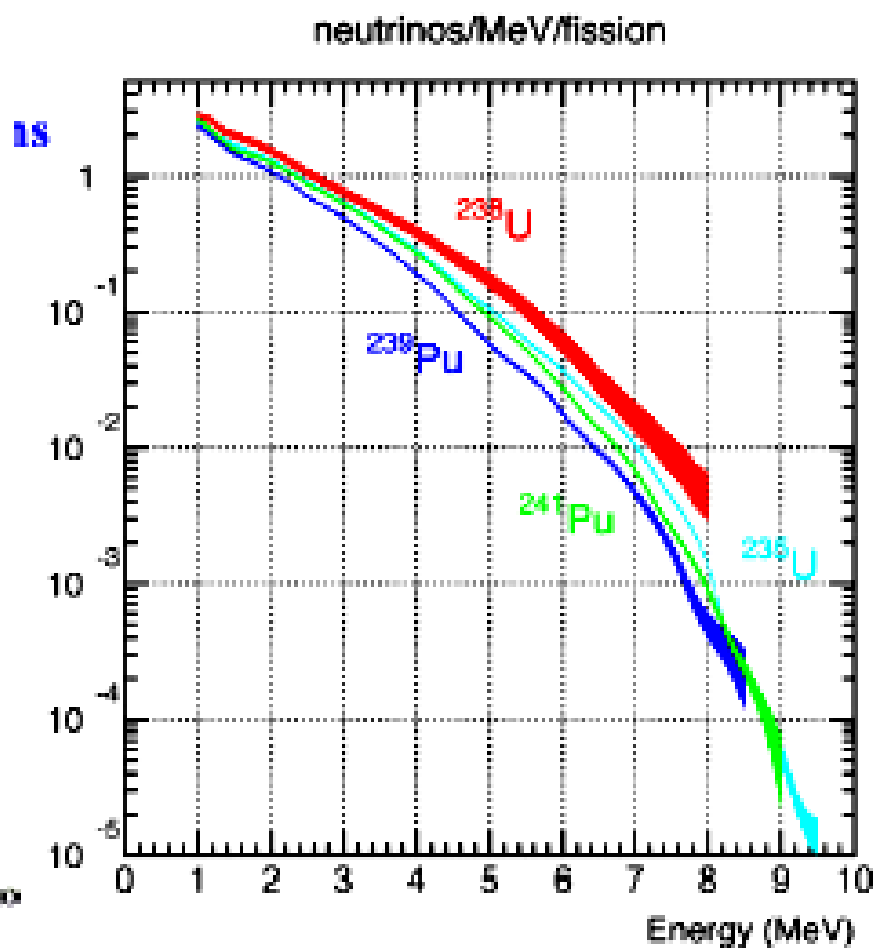
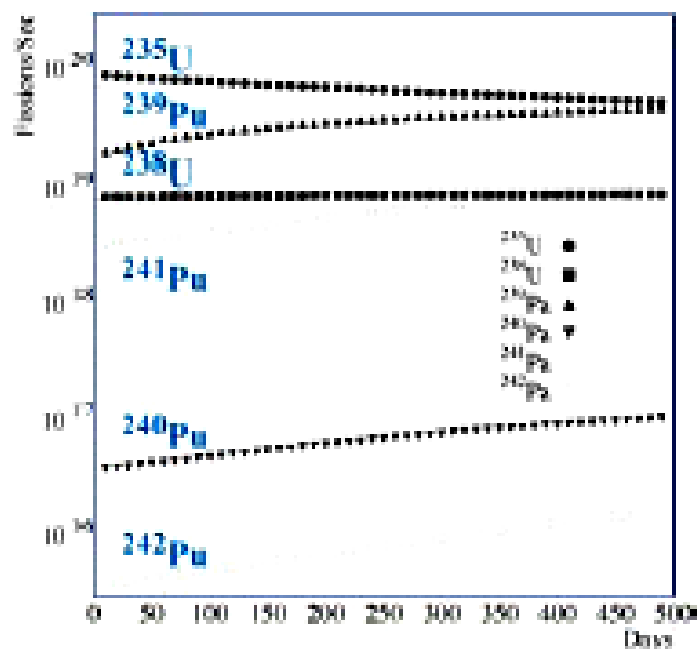
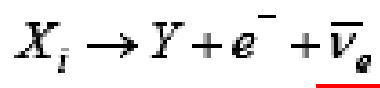
A.Zalewska, w.6, 16.4.2008



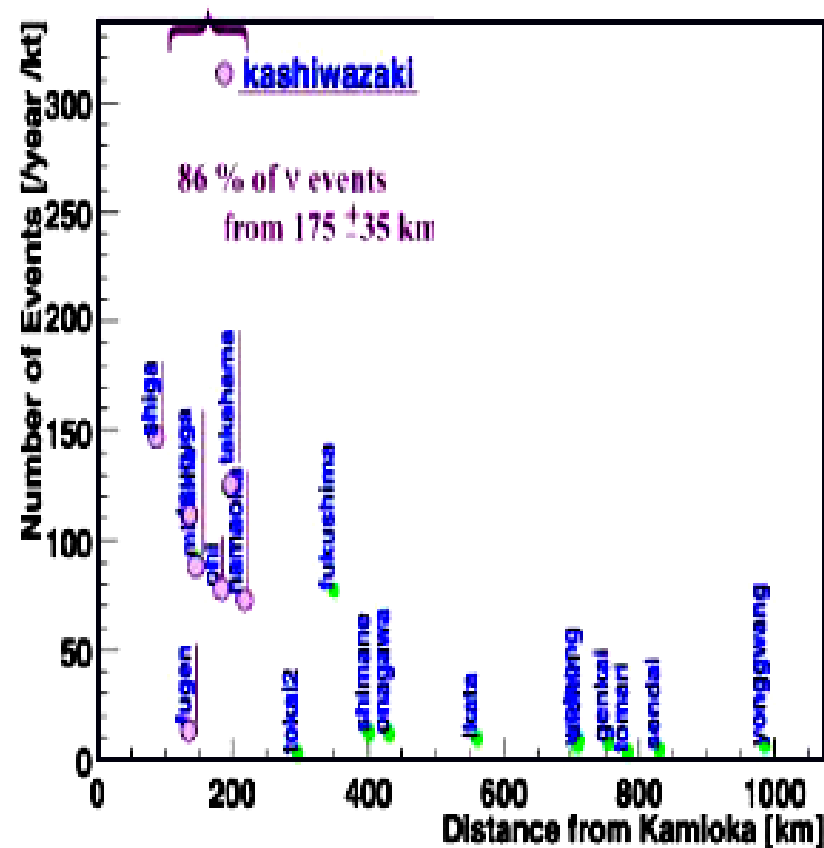
Produkcja antyneutrin w reaktorach



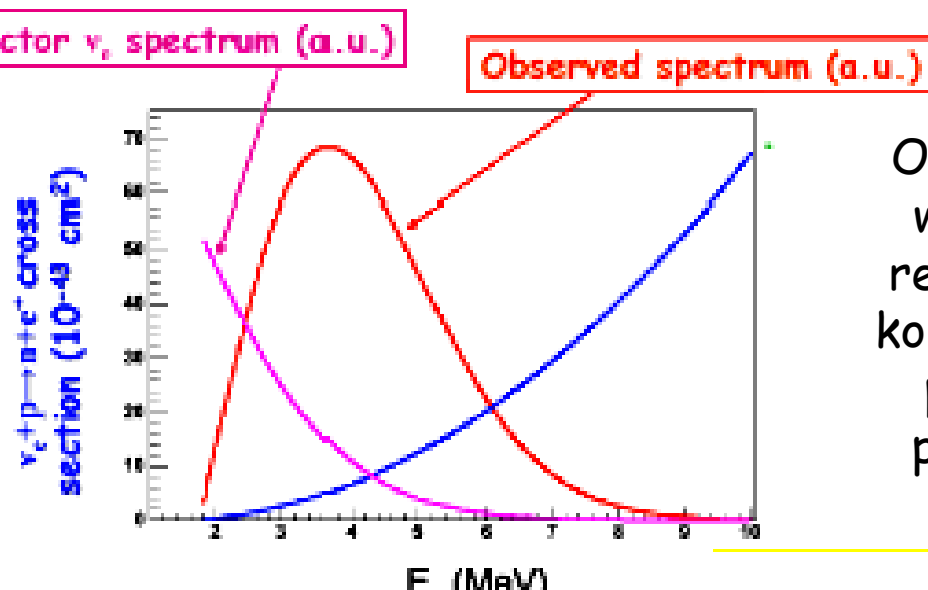
Neutron rich



Antyneutrino z reaktorów w eksperymencie KamLAND

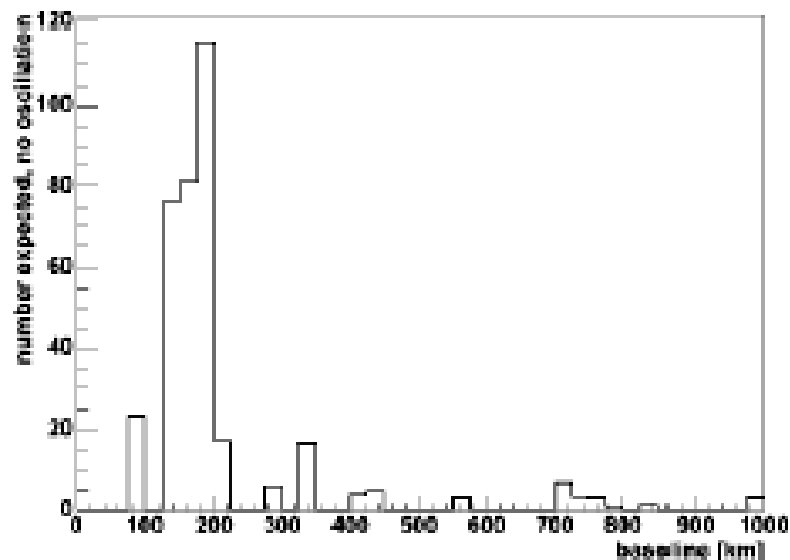


KamLAND - rozkład energii anty- ν_e i drogi L

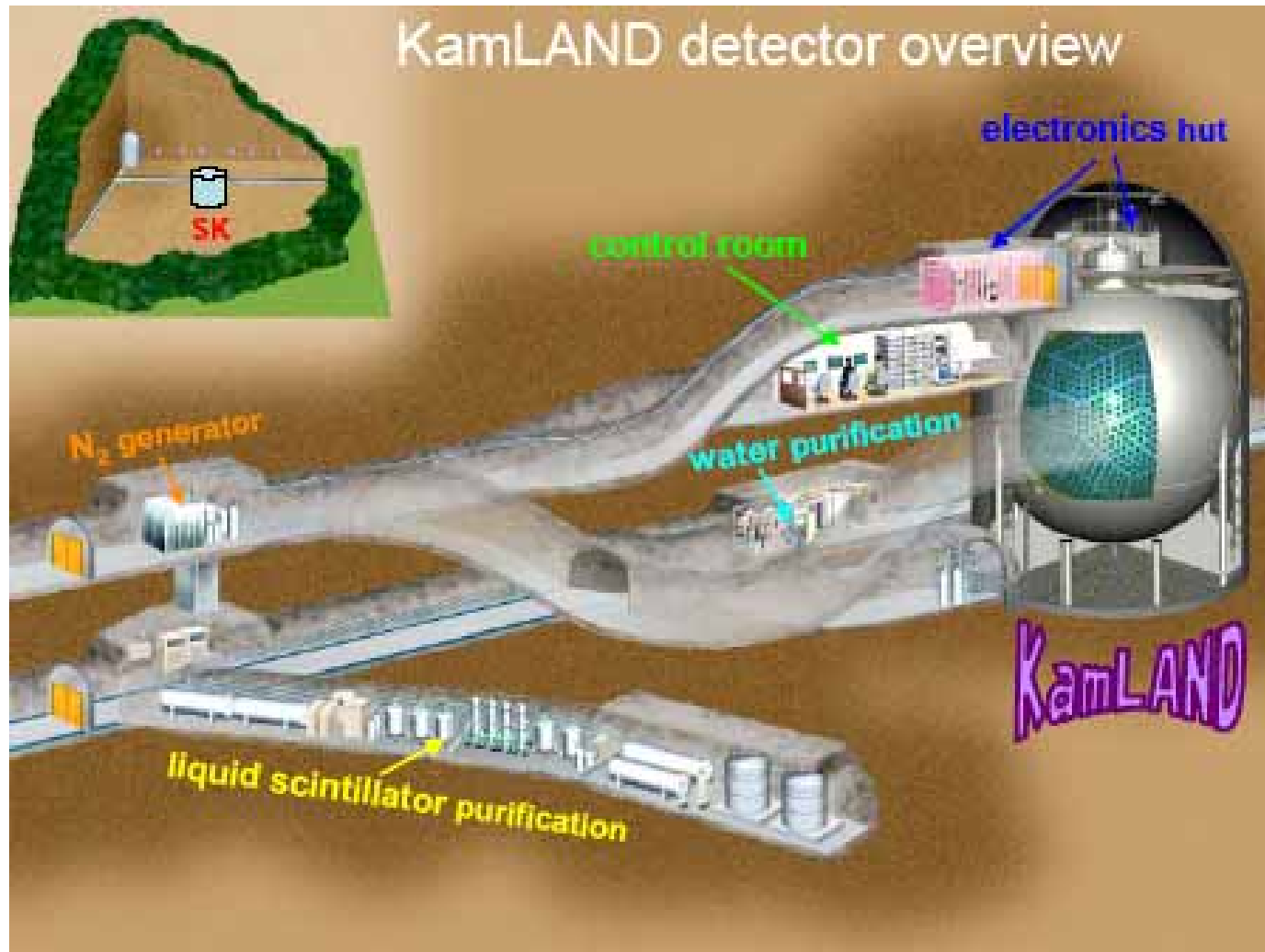


Obserwowane w detektorze widmo energii antyneutrino reaktorowych jest wynikiem konwolucji widma antyneutrino powstałych w reaktorze i przekroju czynnego na ich oddziaływanie

Rozkład wartości strumienia antyneutrino reaktorowych obserwowanych w eksperymencie KamLAND w funkcji odległości detektora od reaktorów

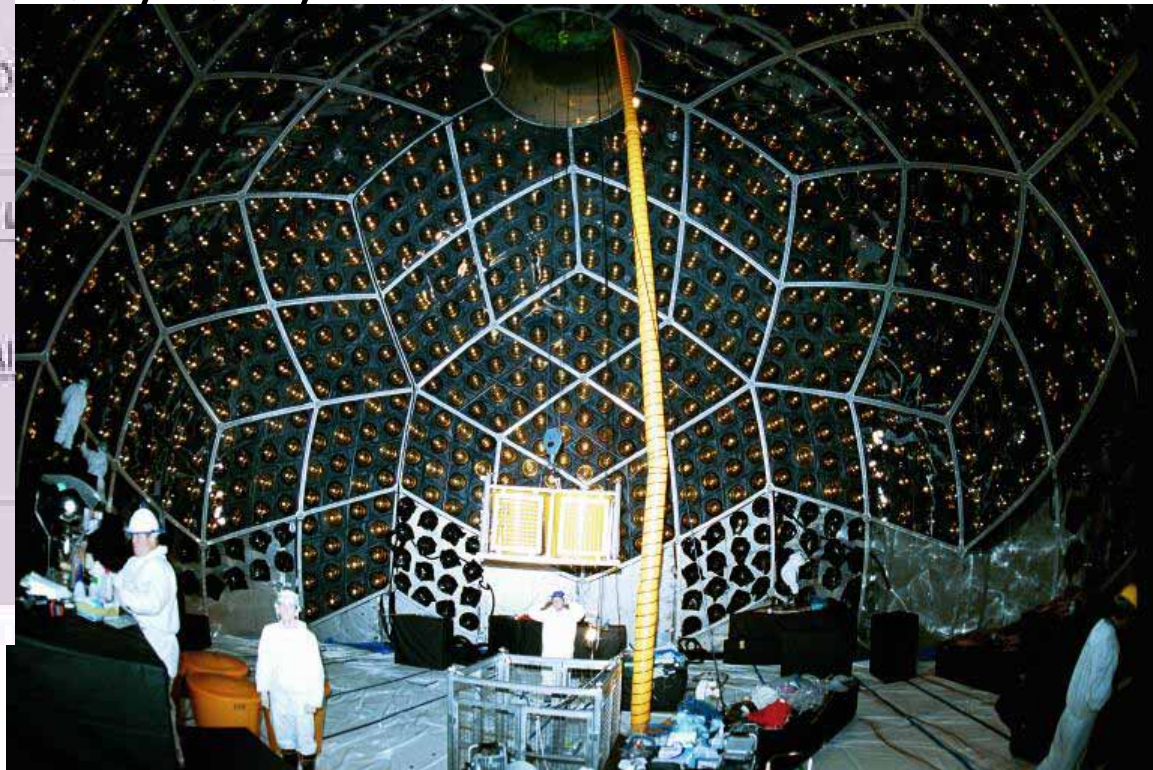
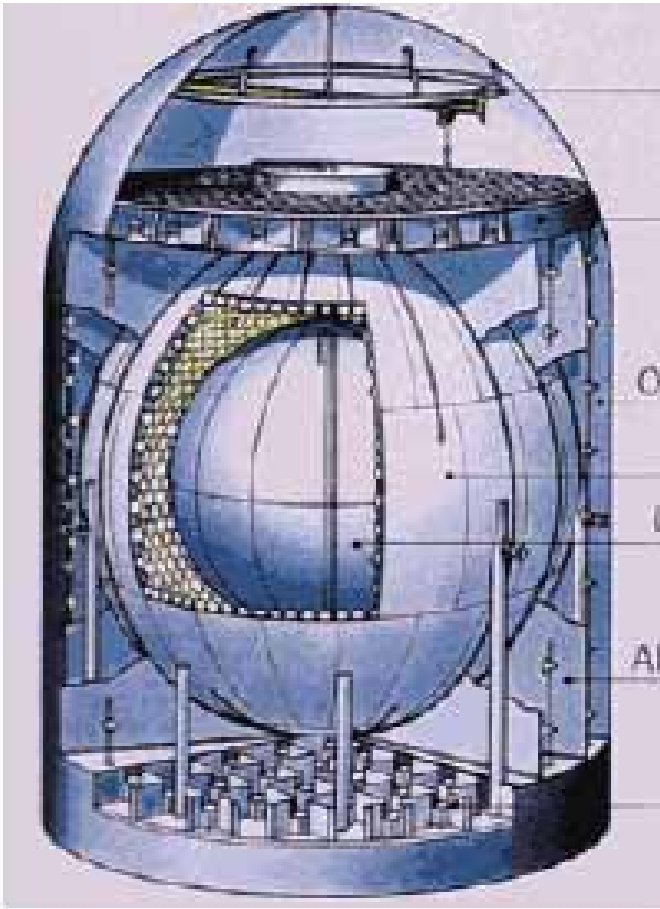


Eksperyment KamLAND



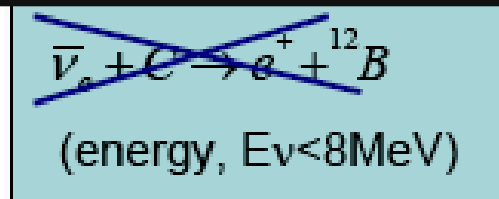
Detektor eksperymentu KamLAND

detektor - 1 ktona ciekłego scyntylatora, ok. 2000 fotopowielaczy, obszar buforowy - olej, det. veto - woda, rejestracja e^+ i γ (2.2 MeV) z wychwytu n na protonie, sygnał świetlny - 320 fotoelektronów/MeV, eksperyment ruszył w styczniu 2002



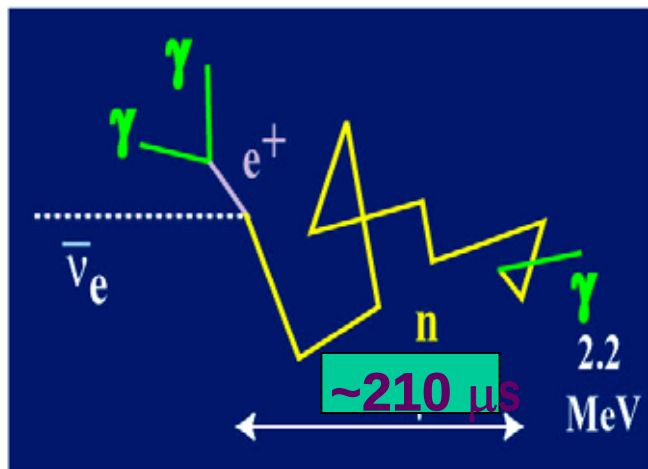
Detekcja antyneutrin reaktorowych w ciekłym scyntylatorze

A.Suzuki et al
Neutrino telescopes 2003



reaction process : inverse- β decay ($\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$)
 $+ p \rightarrow d + \gamma$

distinctive two-step signature



- prompt part : e^+

$\bar{\nu}_e$ energy measurement

$$E_\nu \sim (E_e + \Delta) / I + \frac{E_e}{M_p} + \frac{\Delta^2 - m_e^2}{M_p}$$

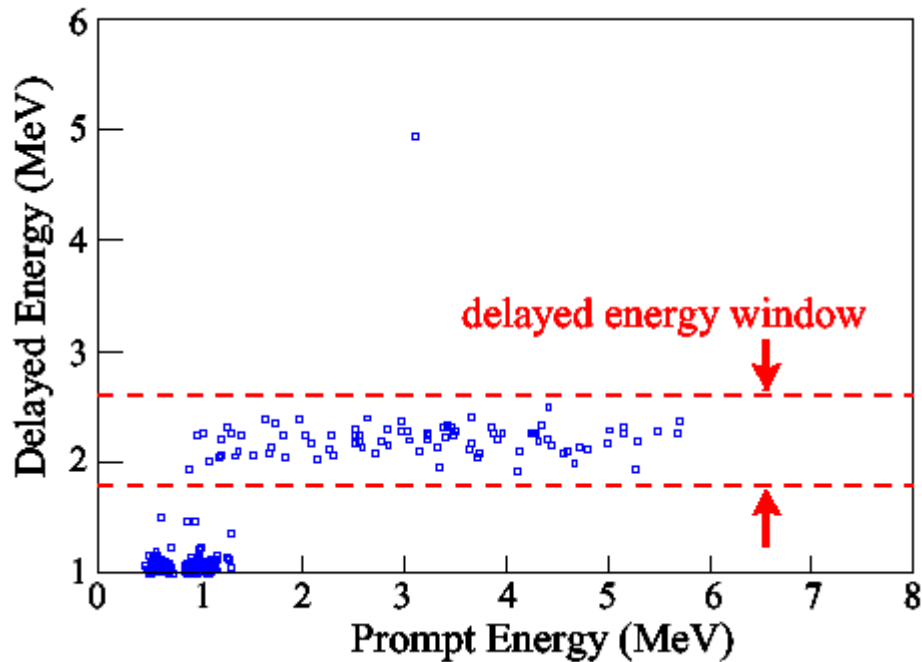
$$\Delta = M_n - M_p$$

- delayed part : γ (2.2 MeV)

- tagging : correlation of time, position and energy between prompt and delayed signal

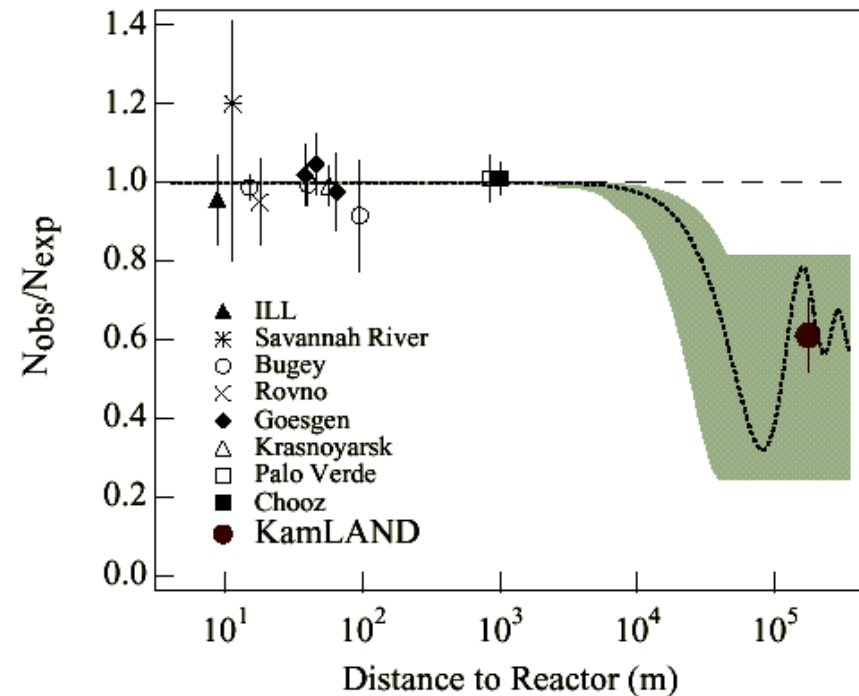
$$E_{th} = \frac{(M_n + m_e)^2 - M_p^2}{2M_p} = 1.806 \text{ MeV}$$

KamLand - pierwsze wyniki z grudnia 2002 r.



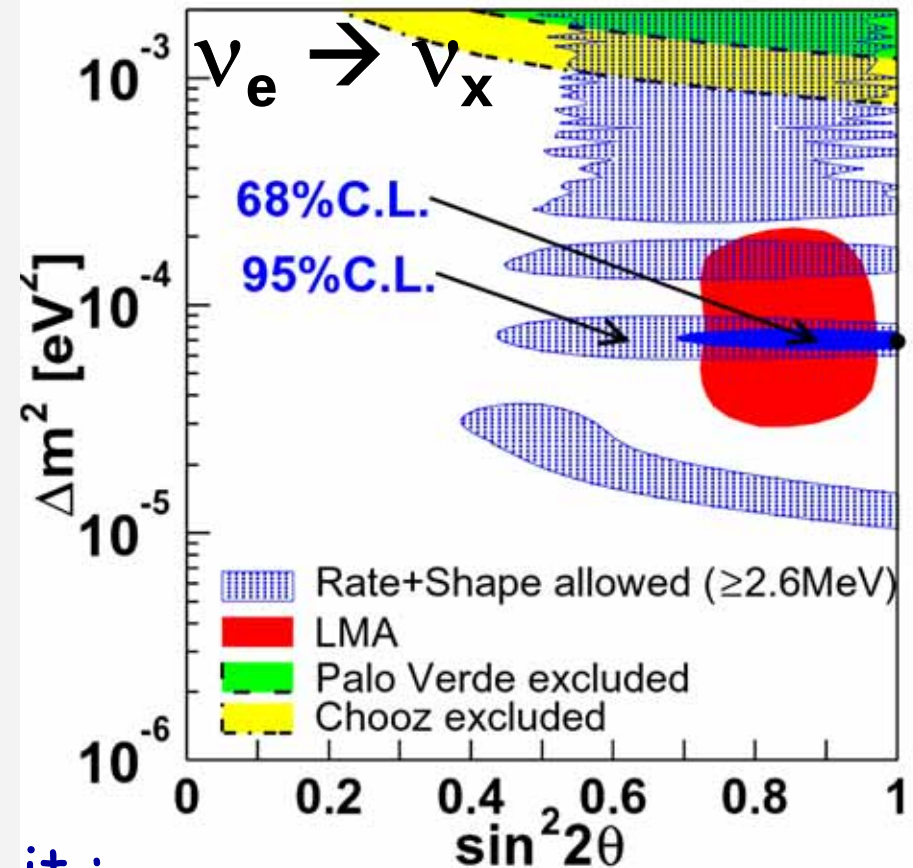
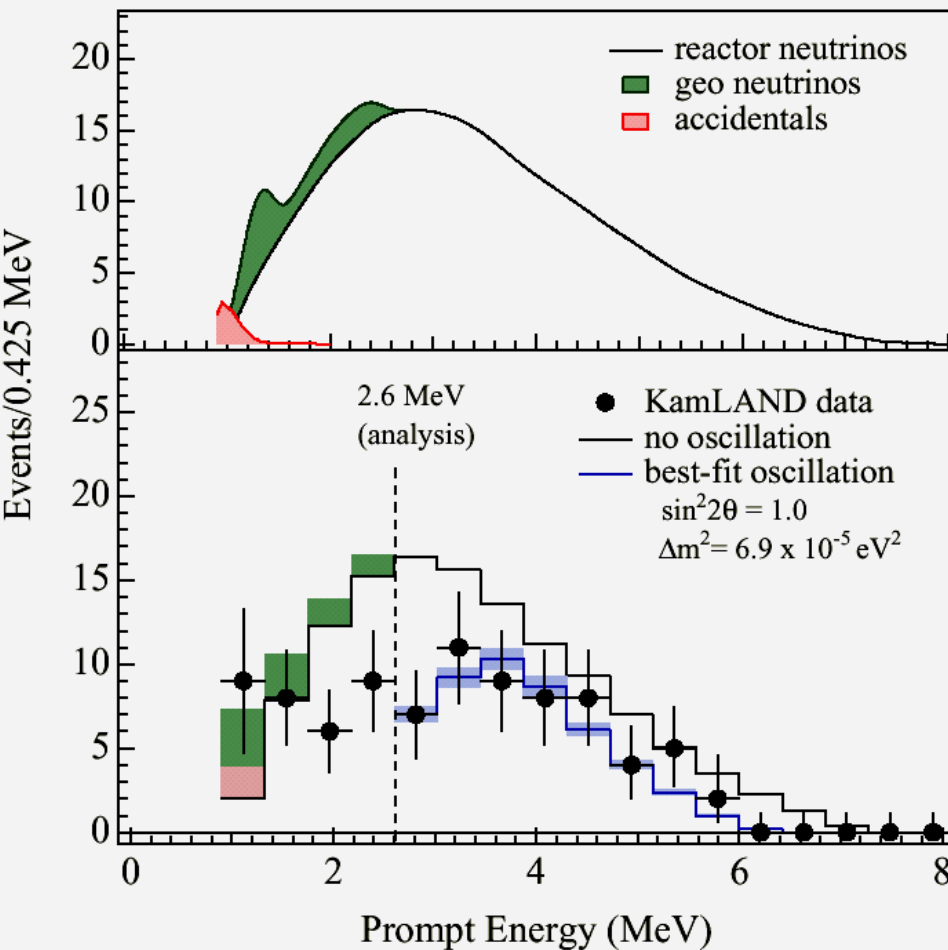
Szybki sygnał z anihilacji e^+ w koincydencji z późniejszym sygnałem z wychwytu neutronu

Zaobserwowano 54 przypadki, wobec 86.8 ± 5.6 oczekiwanych przy braku oscylacji



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

KamLAND - analiza oscylacji w oparciu o strumień i widmo energii



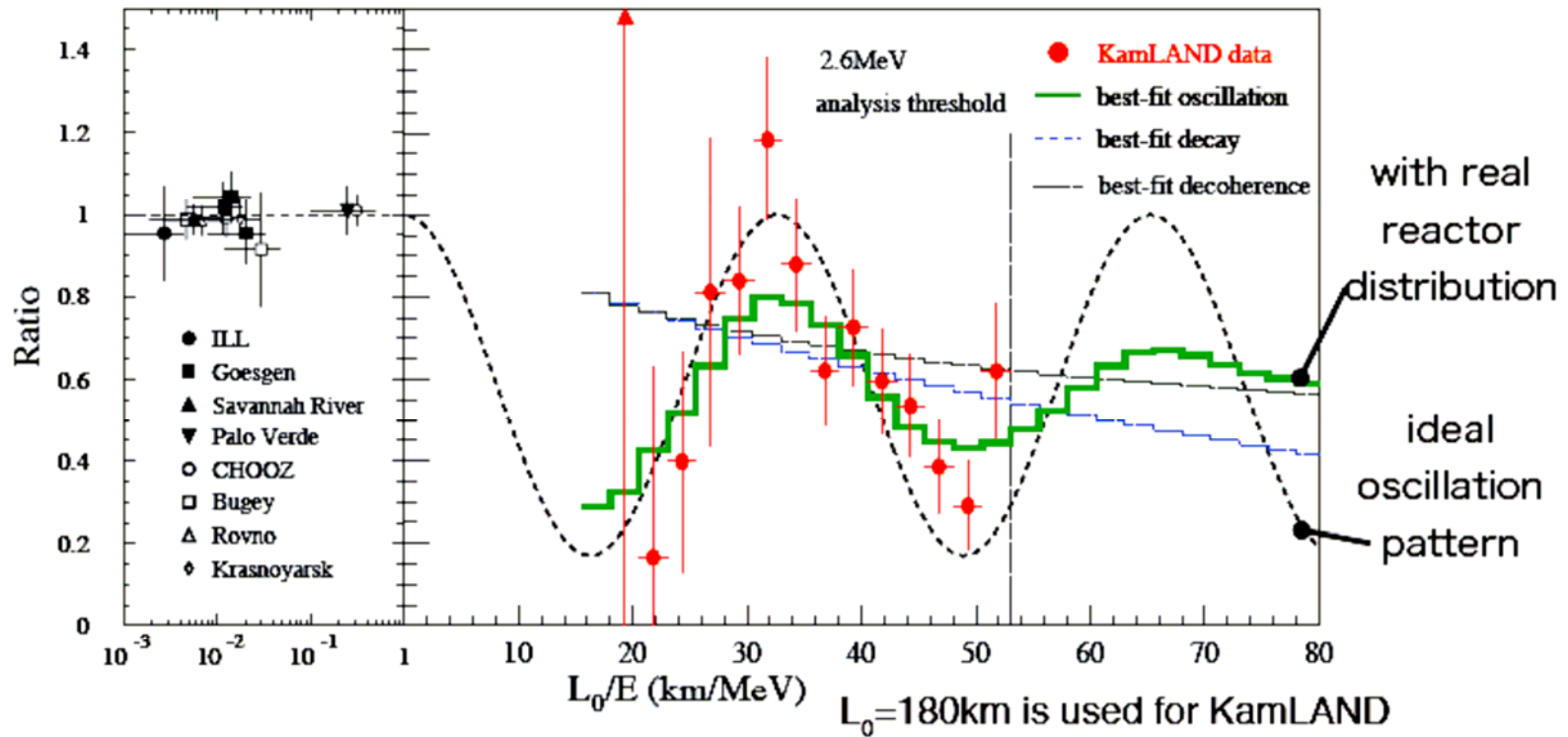
it :

$$6.9 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\sin^2 2\theta = 1.01$$

KamLAND - rozkład L/E - po raz pierwszy pokazany na konferencji Neutrino 2004

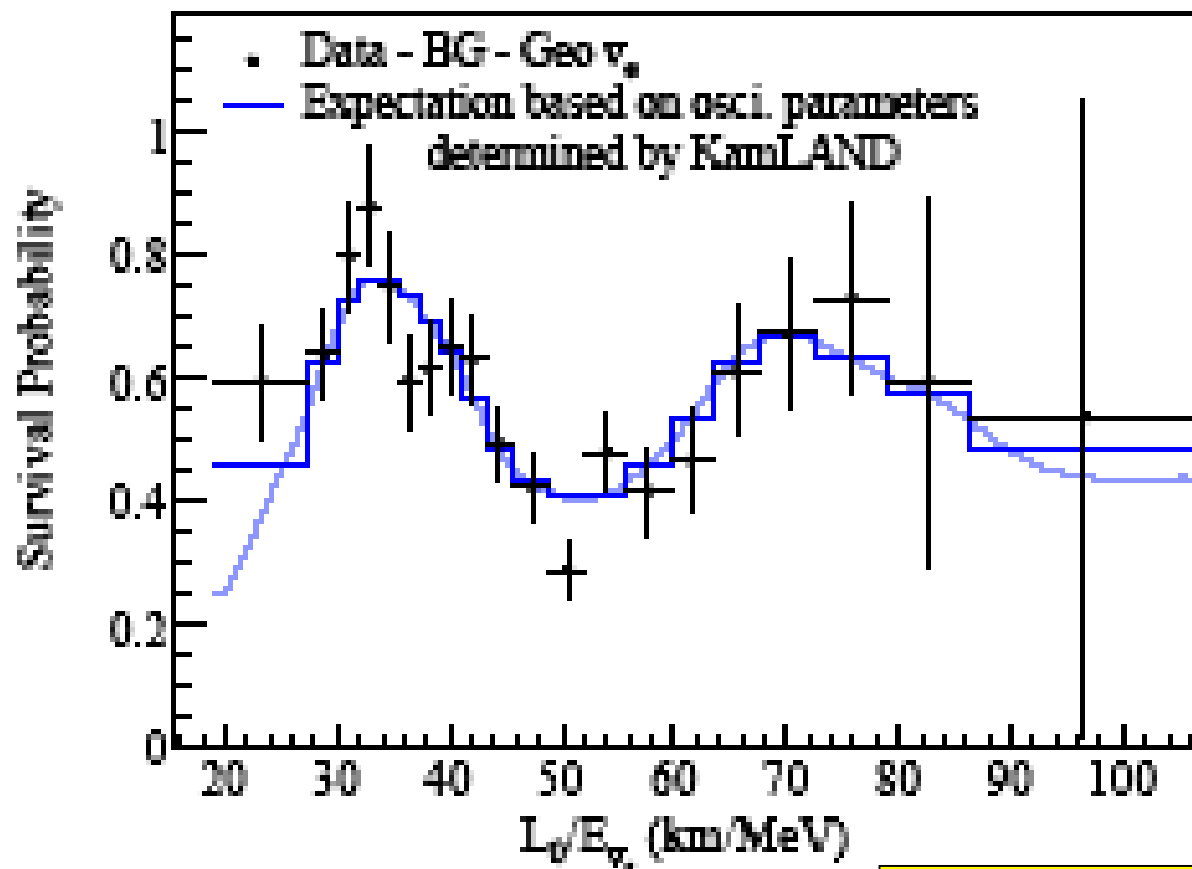
Rozkład L/E - bezpośrednie wskazanie na oscylacje



$$\Delta m_{12}^2 = 8.2^{+0.6}_{-0.5} \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\tan^2 \theta_{12} = 0.40^{+0.09}_{-0.07}$$

KamLAND - rozkład L/E - dane z 2008 roku



$$\Delta m_{21}^2 = 7.59^{+0.21}_{-0.21} \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\tan^2 \theta_{12} = 0.47^{+0.06}_{-0.05}$$

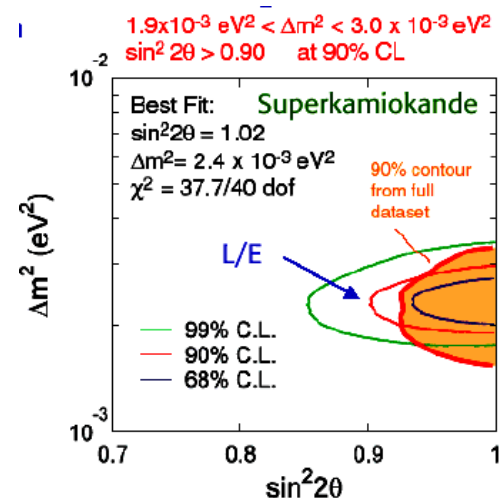
Oscylacje neutrin atmosferycznych (akceleratorowych) i słonecznych (reaktorowych)

Neutrino

atmosferyczne/akceleratorowe:

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

$$\Delta m_{23}^2 \cong 10^{-3} \text{eV}^2, \theta_{23} \cong 45^\circ$$



Neutrino słoneczne/reaktorowe:

oscylacje $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu, \nu_\tau$

$$\Delta m_{12}^2 \cong 10^{-4} \text{eV}^2, \theta_{12} \cong 30^\circ$$

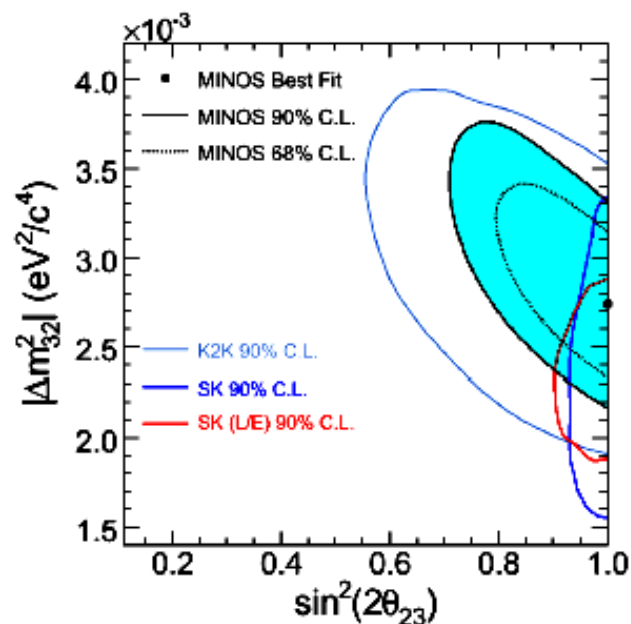
$$\Delta m_{12}^2 = 8.2^{+0.6}_{-0.5} \times 10^{-5} \text{eV}^2$$
$$\tan^2 \theta_{12} = 0.40^{+0.09}_{-0.07}$$

Dwie skale dla różnicy kwadratów mas → trzy stany zapachowe neutrin

W obu przypadkach dobry opis w ramach formalizmu oscylacji dwu stanów zapachowych - dlaczego?

„Sektor” atmosferyczny i słoneczny - podsumowanie

Dla trzech zapachów neutrin i trzech stanów masowych - występuje sześć parametrów oscylacji: trzy kąty mieszania θ_{12} , θ_{23} , θ_{13} , dwie różnice kwadratów mas Δm_{21}^2 , Δm_{32}^2 i jedna faza δ_{CP}

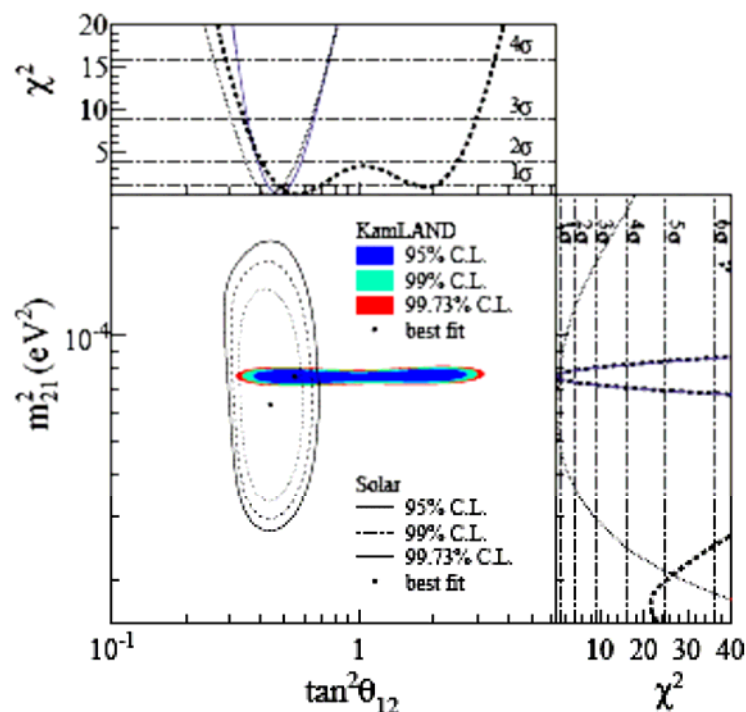


$$|\Delta m_{32}^2| = 2.74^{+0.44}_{-0.26} (\text{stat} + \text{syst}) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\sin^2 2\theta_{23} = 1.00_{-0.13} (\text{stat} + \text{syst})$$

$$\text{Constrained to } \sin^2(2\theta_{23}) \leq 1$$

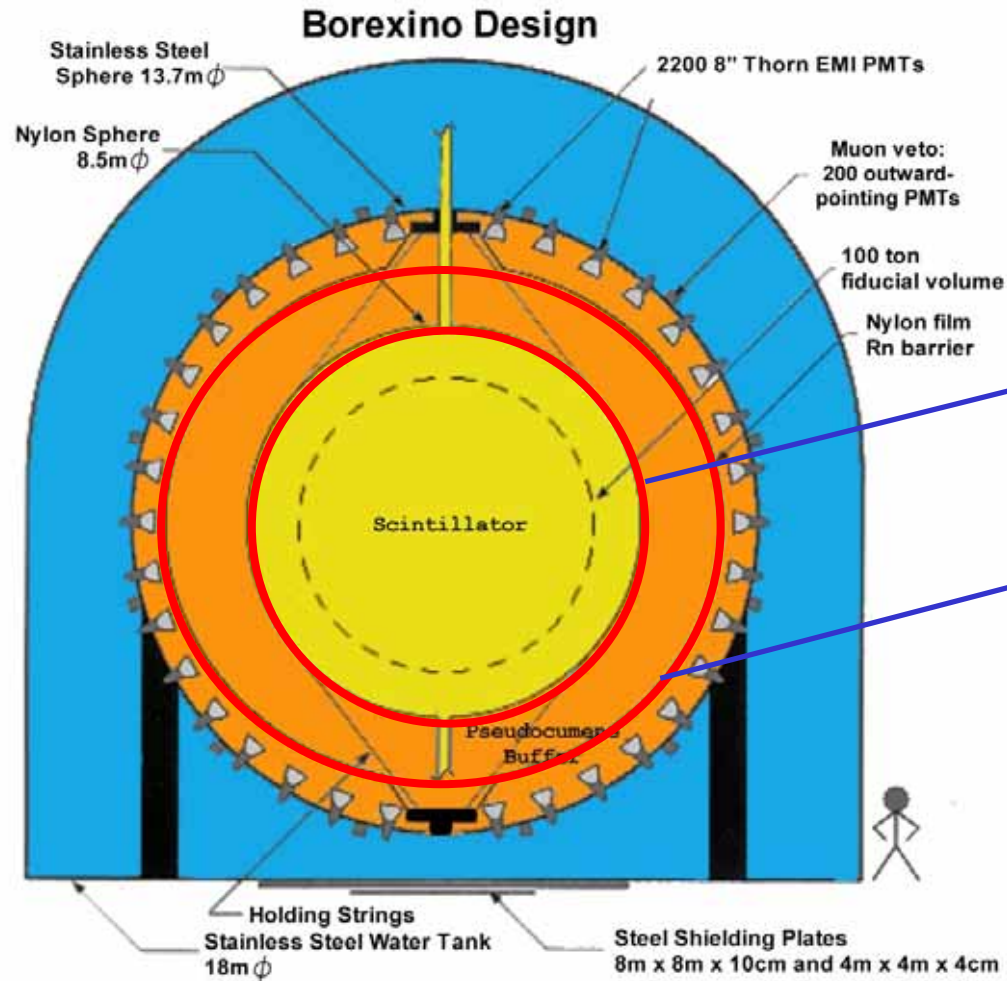
A.Zalewska, w.6, 16.4.2008



$$\Delta m_{21}^2 = 7.59^{+0.21}_{-0.21} \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\tan^2 \theta_{12} = 0.47^{+0.06}_{-0.05}$$

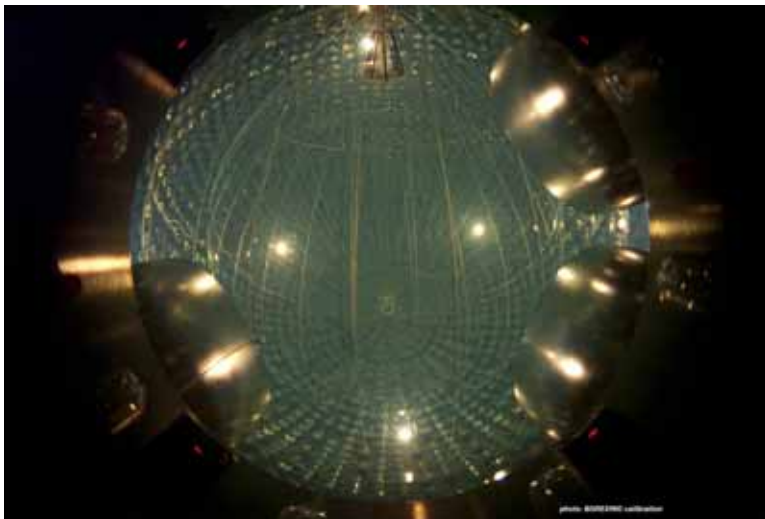
Eksperyment Borexino



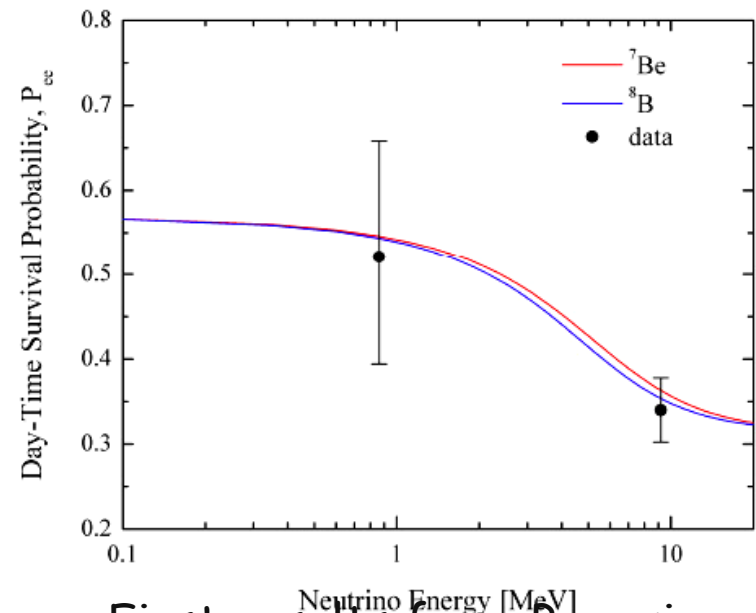
Eksperyment Borexino

Neutrino astronomy of the Sun,
e.g. measurement of the flux of pep neutrinos and of neutrinos from the CNO cycle will be possible in the Borexino experiment (neutrino energy threshold below 0.9 MeV)

Neutrinos from SN explosions
to understand mechanism of the SN gravitational collapse



The Borexino detector filled
With scintillator - 15.05.2007
A.Zalewska, w.o, 16.4.2008



First results from Borexino