

Neutrino (2)

wykład VIII

- Neutrino słoneczne
- Wyniki Super-Kamiokande
- Eksperyment SNO
- Eksperyment Kamland
- Podsumowanie: co wiemy o masach i mieszaniu
neutrin
- Przyszłość

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**

- **neutrino elektronowe**
 - ⇒ strumień zgodny z przewidywaniami modelu
 - ⇒ tyle samo neutrin “do góry” co “do dołu”
- **neutrino 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:

$$\sin^2 2\theta_{\mu\tau} = 1.00 \quad \Delta m_{\mu\tau}^2 = 0.002 \text{ eV}^2$$

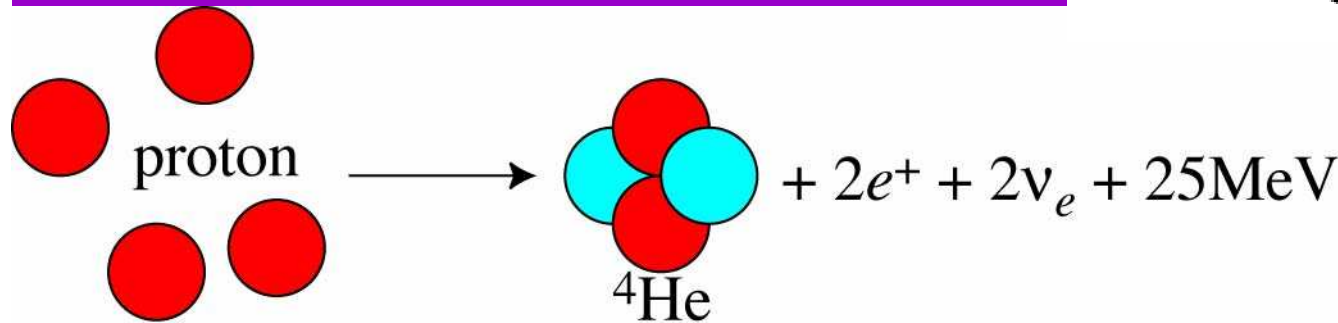
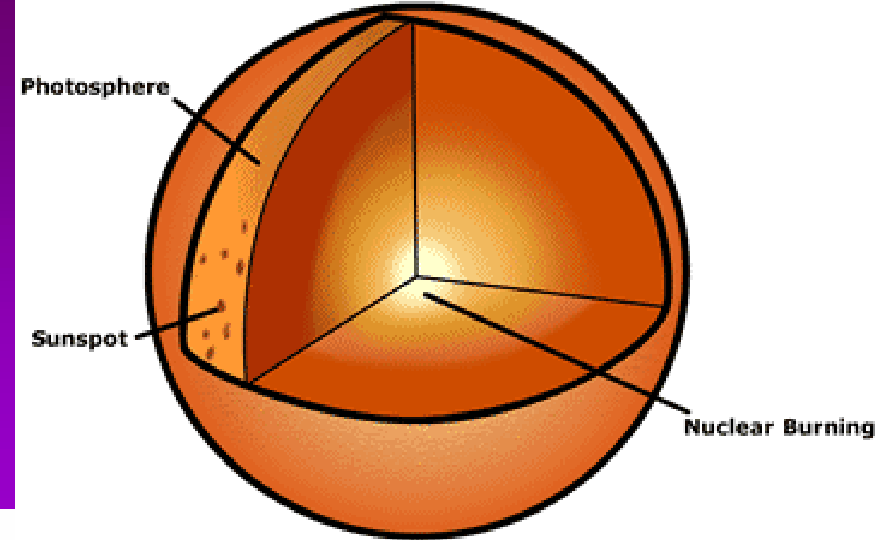
Wyniki potwierdzone przez K2K.

Neutrino słoneczne (kolejna zagadka brakujących neutrin)



Dlaczego Słońce świeci

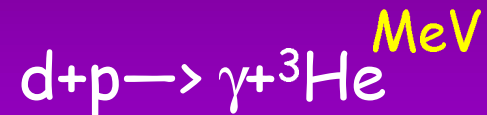
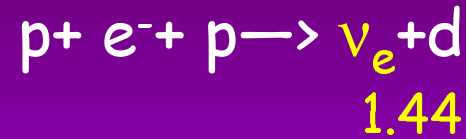
W wyniku fuzji termojądrowych dostajemy energię:



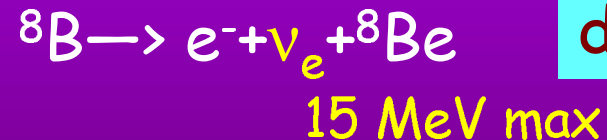
$$\Phi_{\nu} = \frac{2L_{\text{sun}}}{25\text{MeV}} \frac{1}{4\pi(1\text{AU})^2} = 7 \cdot 10^{10} \text{ sec}^{-1} \text{ cm}^{-2}$$

gdzie L_{sun} jest świetlnością Słońca
1AU jest odległością Słońce - Ziemia

Reakcje fuzji termojądrowych



ppI (85%)



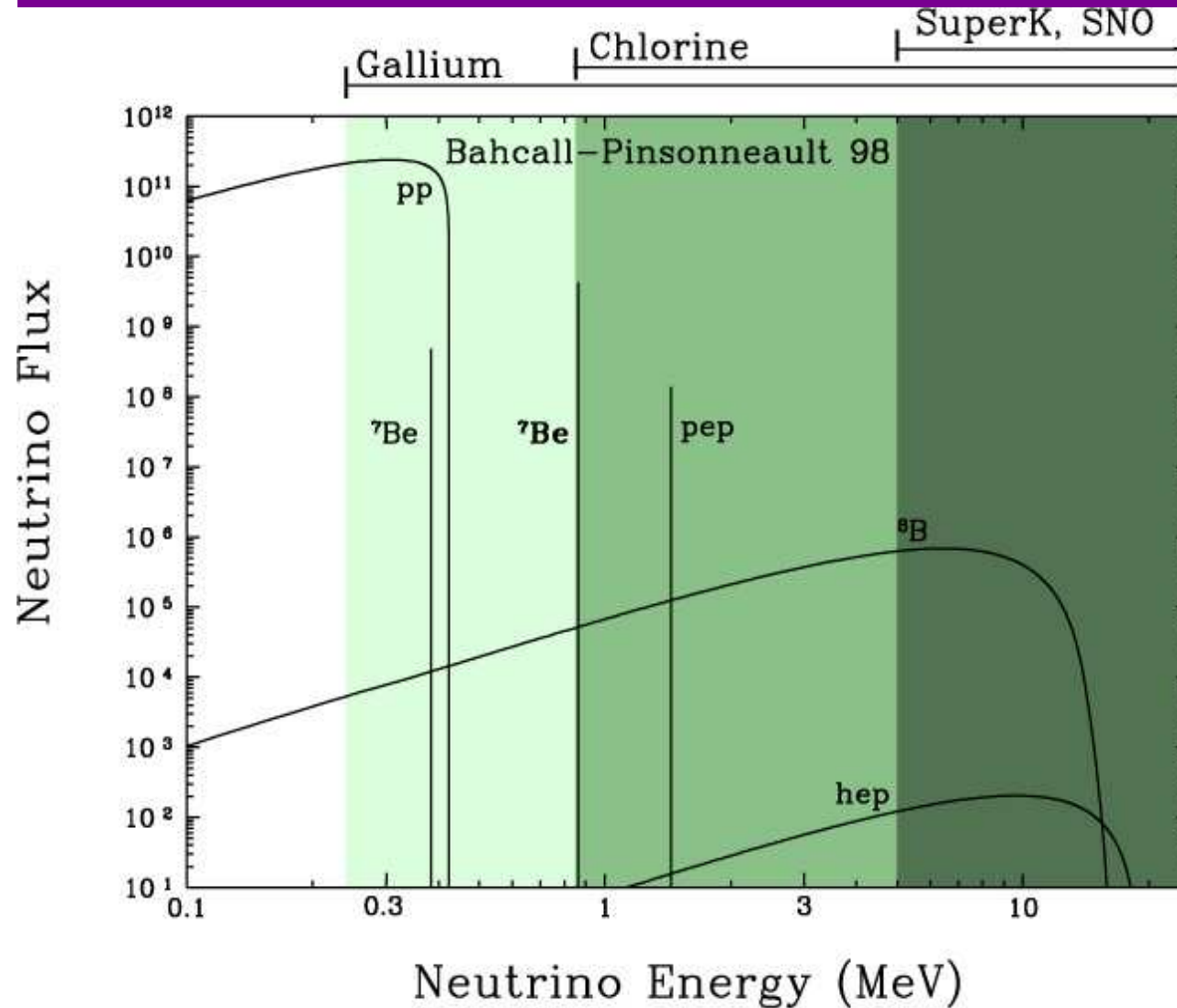
rzadkie ale
łatwiejsze
do detekcji



ppII (15%)

ppIII (0.01%)

Widmo energetyczne neutrin słonecznych



radiochemiczne (Galowe & Chlorowe):

- niski próg energetyczny
- tylko zliczanie przyp.

Detektory Czerenkowa (SuperKamiokande, SNO)

- wyższe progi energet
- dla każdego przyp:
czas, kierunek, energia

Eksperymenty radiochemiczne

Reakcja DAVISIA-PONTECORVO:

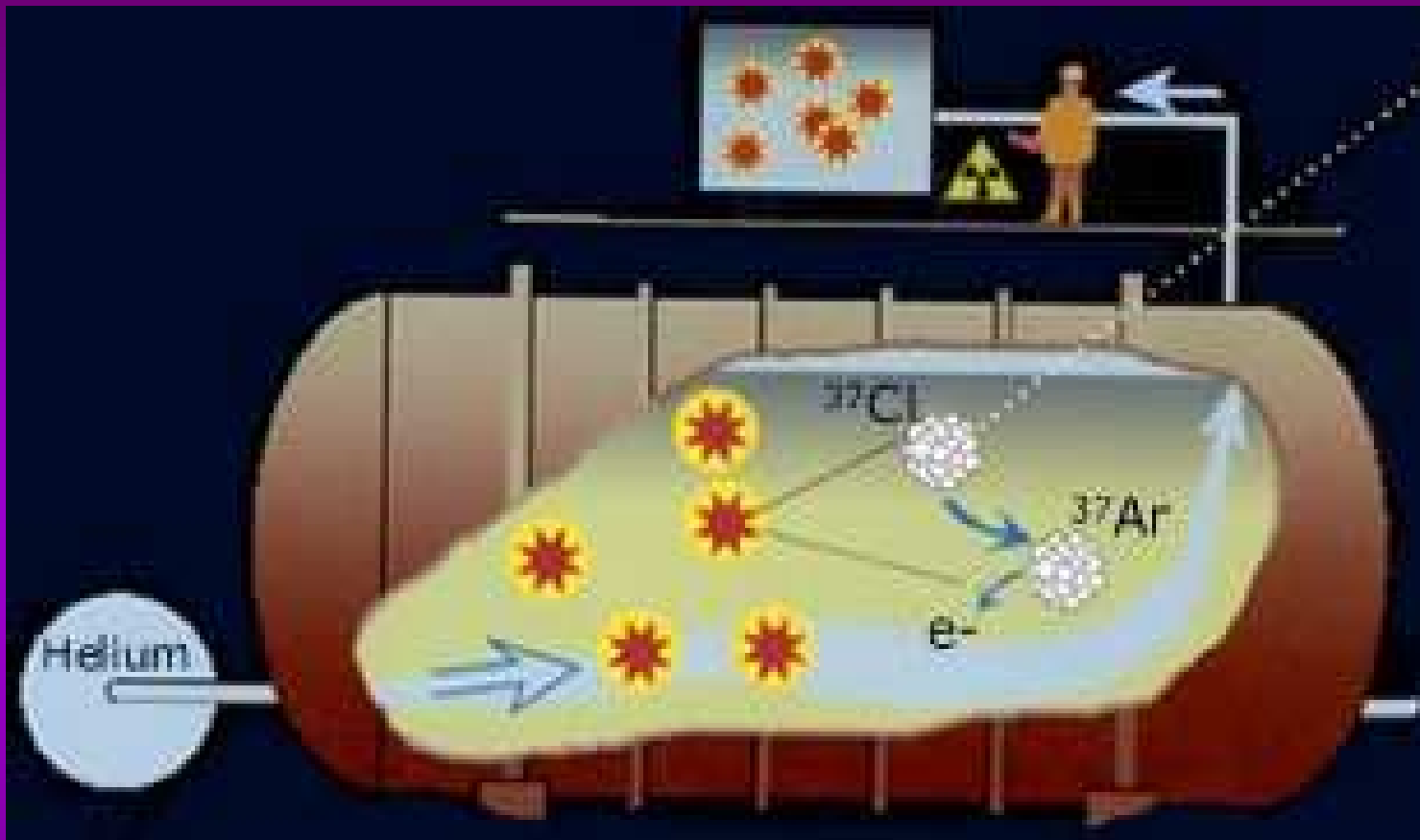


lub



- Produkowane isotopy są radioaktywne o czasach życia rzędu dni - są co kilka tygodni wydobywane ze zbiorników i zliczane
- Brak informacji o czasie zdarzenia oraz kierunku i energii neutrina

Eksperyment Davisa w Homestake



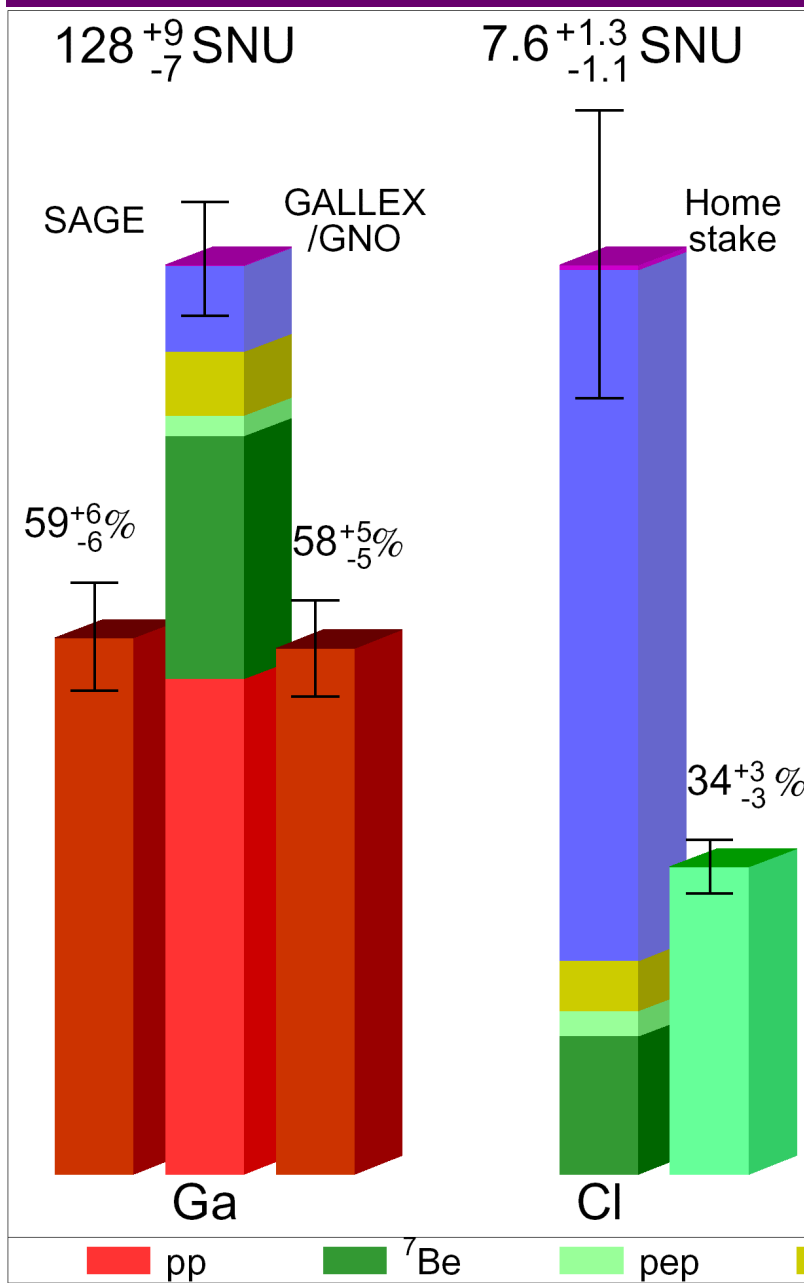
615 ton CCl_4

zbiarał dane od
1968
przez około 30
lat

Nagroda Nobla
w 2002

- ^{37}Ar ma czas połowicznego zaniku 35 dni (wychwył elektronu)
- Neutrino słoneczne produkują 1 atom argonu co 2-3 dni

Wyniki z eksperymentów radiochemicznych



Porównanie z przewidywaniami Standardowego Modelu Słonecznego (SSM):



brak neutrin ⁷Be (wszystkich) i części ⁸B
 ale skąd się biorą neutrina ⁸B gdy nie zachodzi produkcja neutrin ⁷Be ????

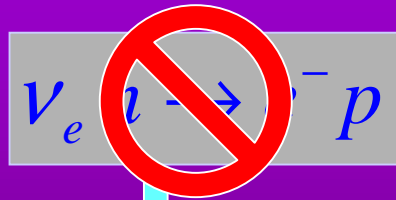
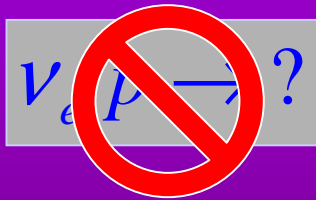
Definicja SNU (Solar Neutrino Unit)
 - 10⁻³¹ oddziaływań/atom/sek

Pomiary neutrin słonecznych w Super-Kamiokande

Pamiętamy, że w wyniku reakcji termojądrowych powstają tylko

$$\nu_e$$

Jakie reakcje mogą wywoływać ν_e o energii poniżej 14 MeV w lekkiej wodzie (i wyprodukować widoczną cząstkę)?



n związane



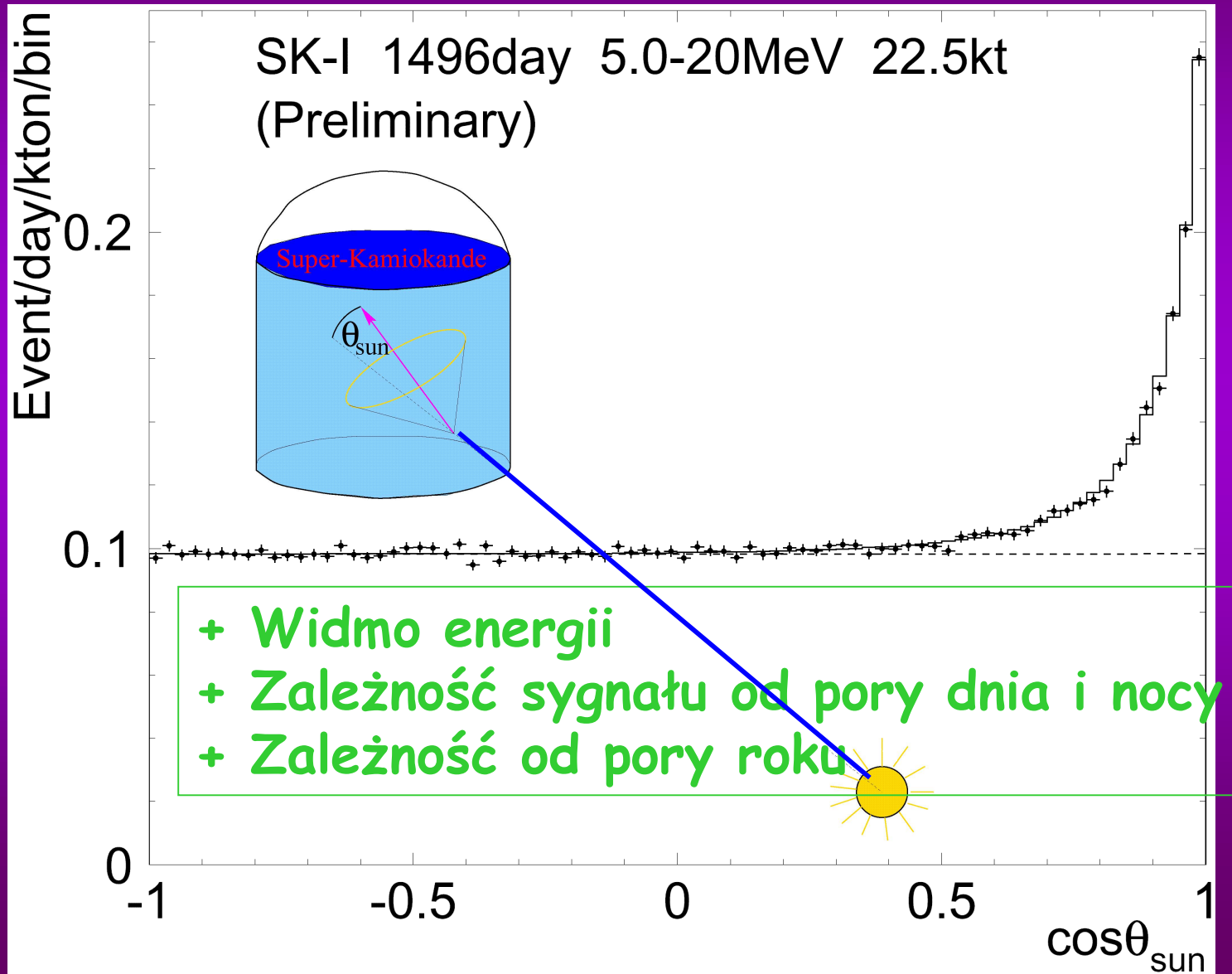
tylko gdy $E_\nu > 18 \text{ MeV}$

Pozostaje:

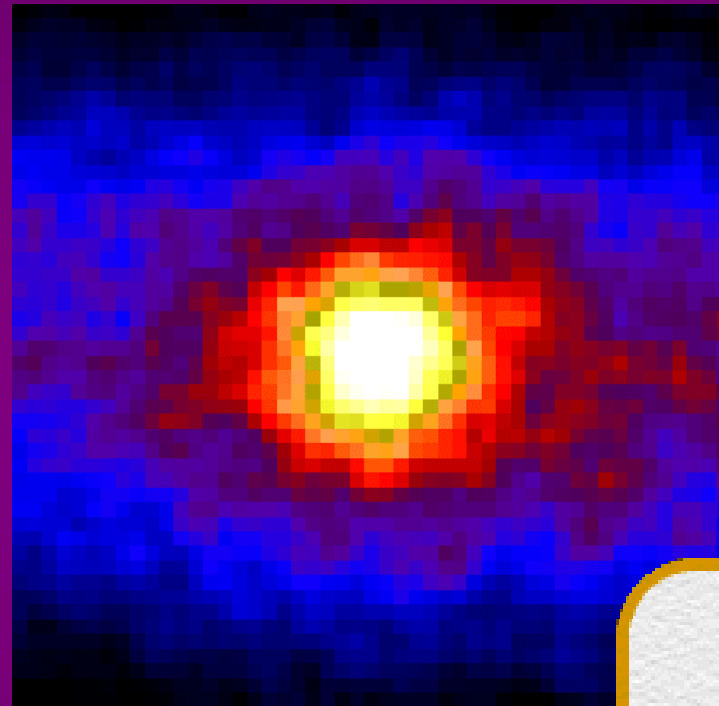
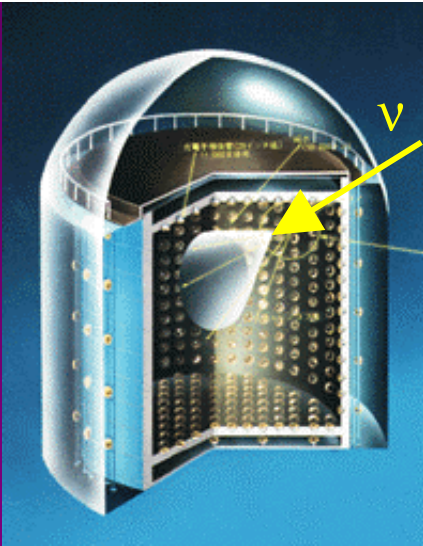


Wprowadzie mały przekrój czynny, ale elektron wystąpi do przodu

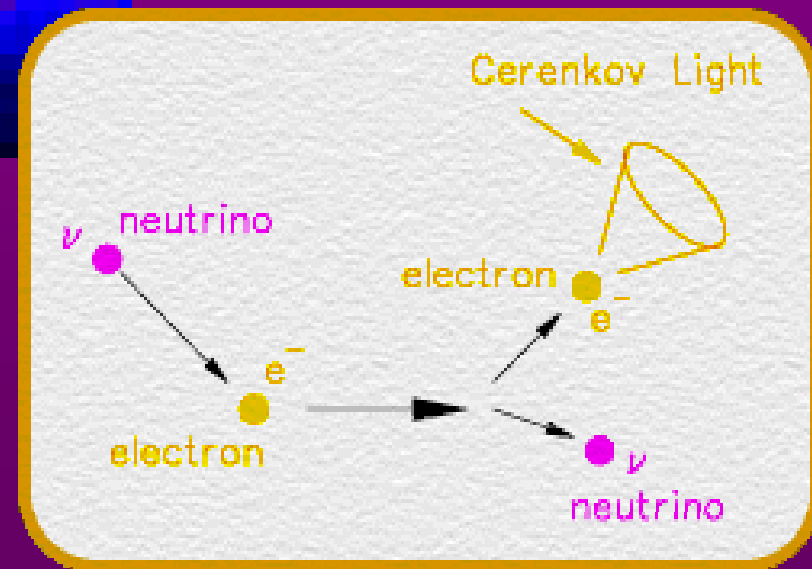
Jak bada się neutrina słoneczne w SK



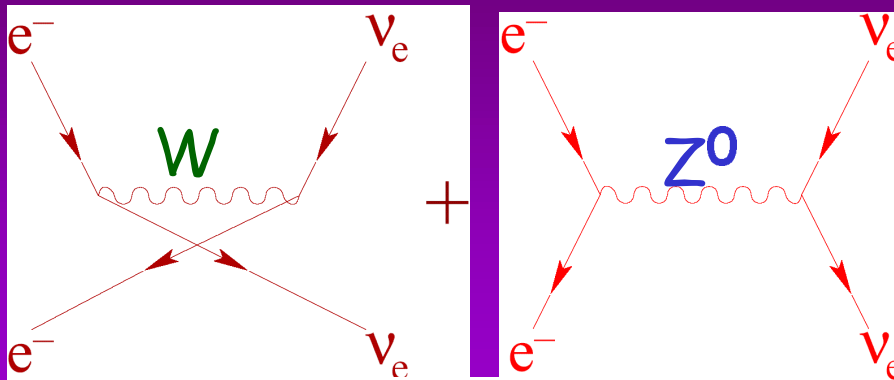
Neutrinoogram Słońca w Super-Kamiokande



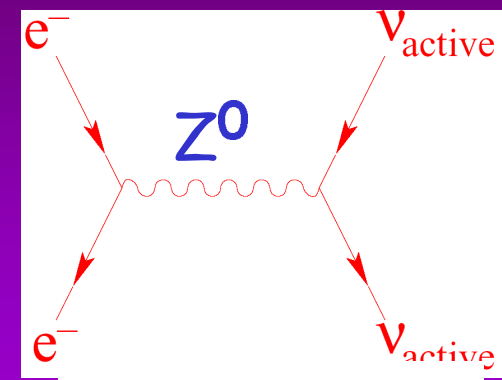
rzeczywisty rozmiar Słońca -
 $\frac{1}{2}$ piksela



Strumień neutrin zmierzony w Super-K



neutrino elektronowe



neutrino μ i τ

Zaobserwowano:

22,400
przypadków

w 1496 dni

Oczekiwano:

48,200 przypadków
na podstawie SSM
(standardowego modelu
Słońca)

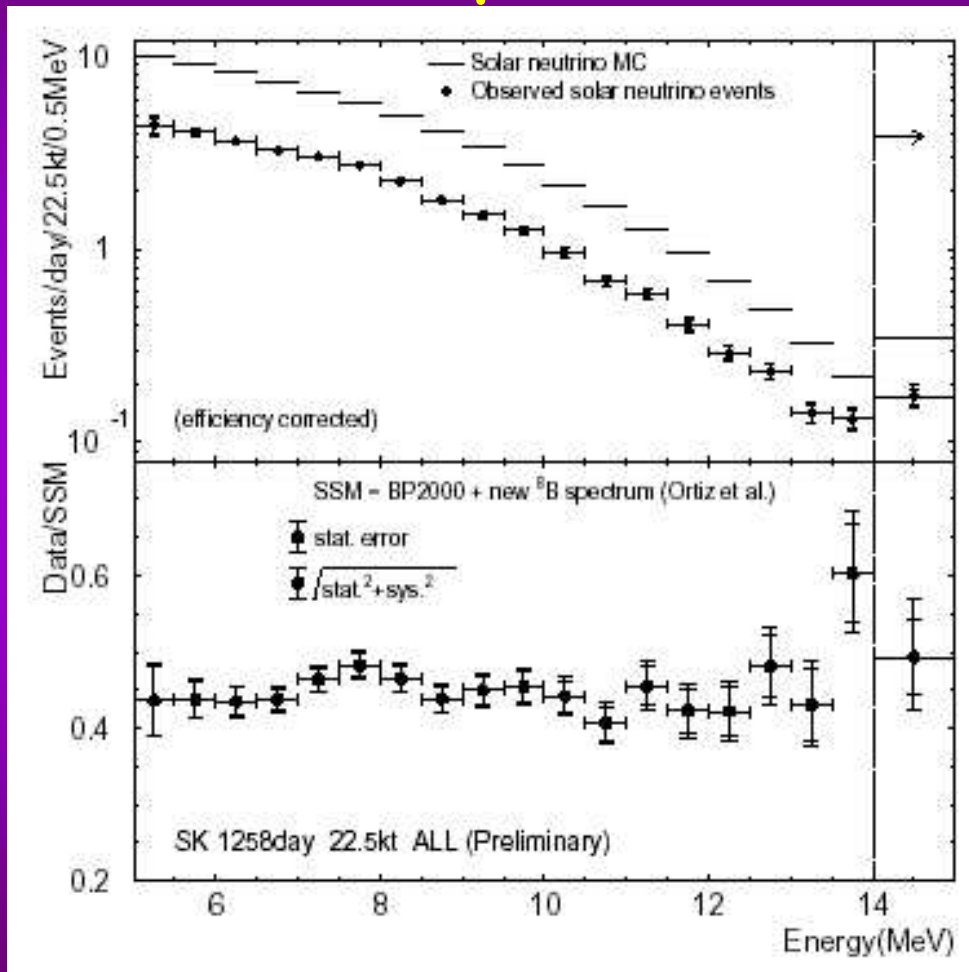
Stąd strumień:
(w całym zakresie
energii)

flux is

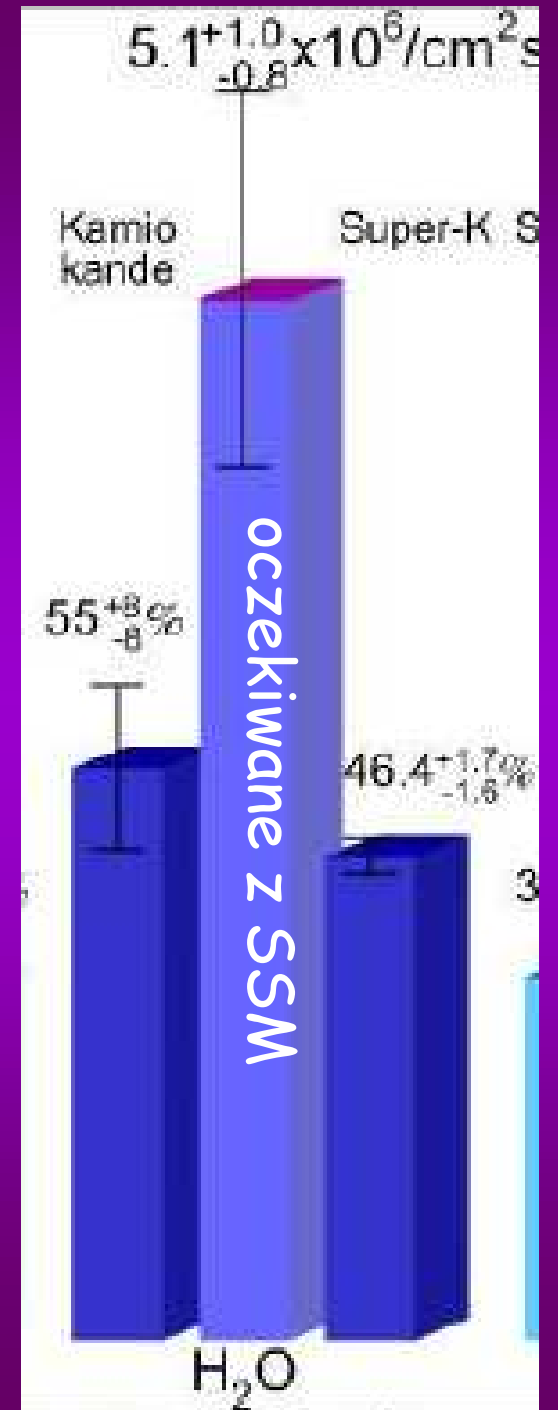
$2.35 \pm 0.02(\text{stat.}) \pm 0.08(\text{sys.}) \times 10^6 / \text{cm}^2 \cdot \text{s}$

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

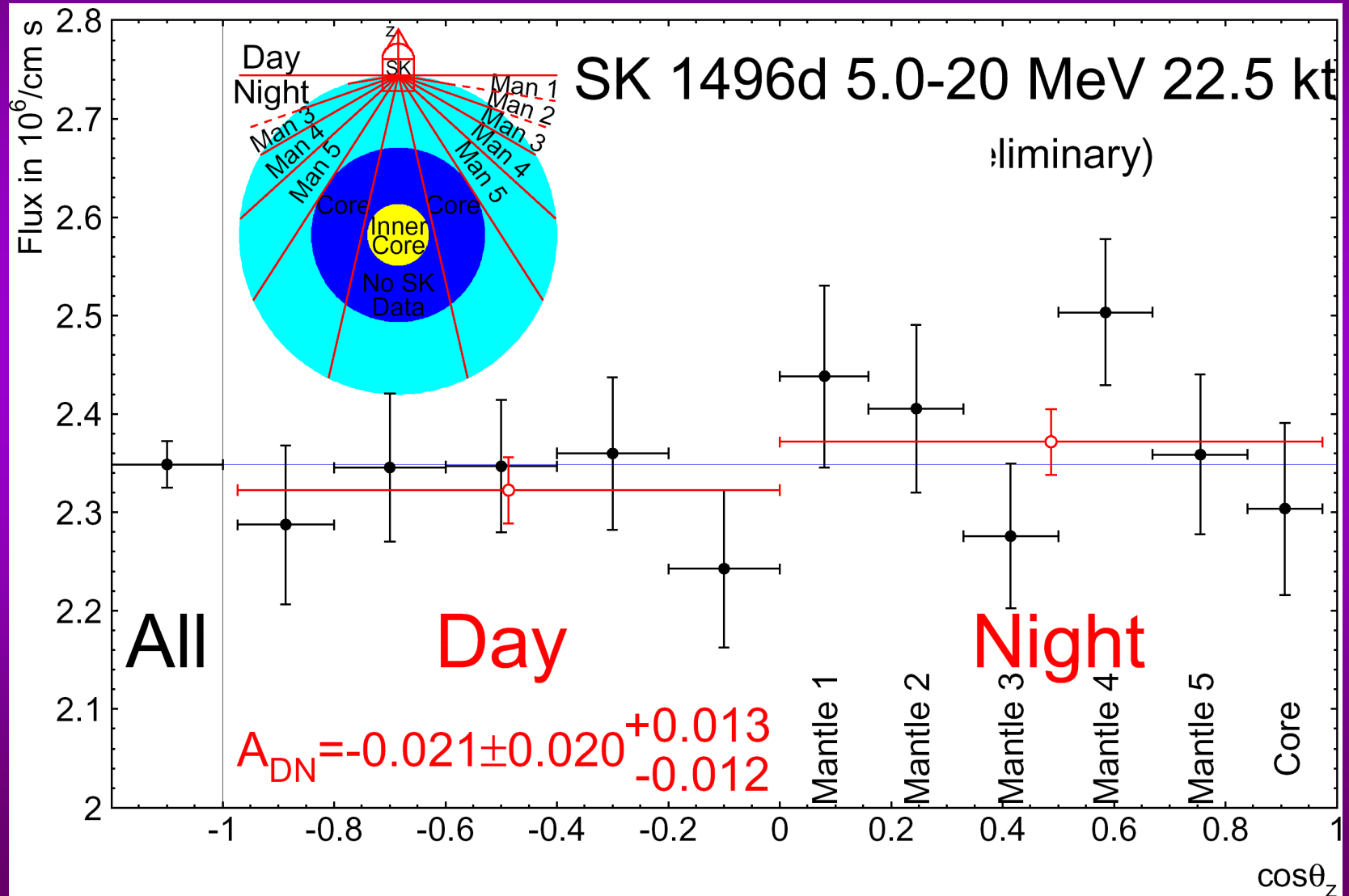
Rozkład energii elektronów w Super-K



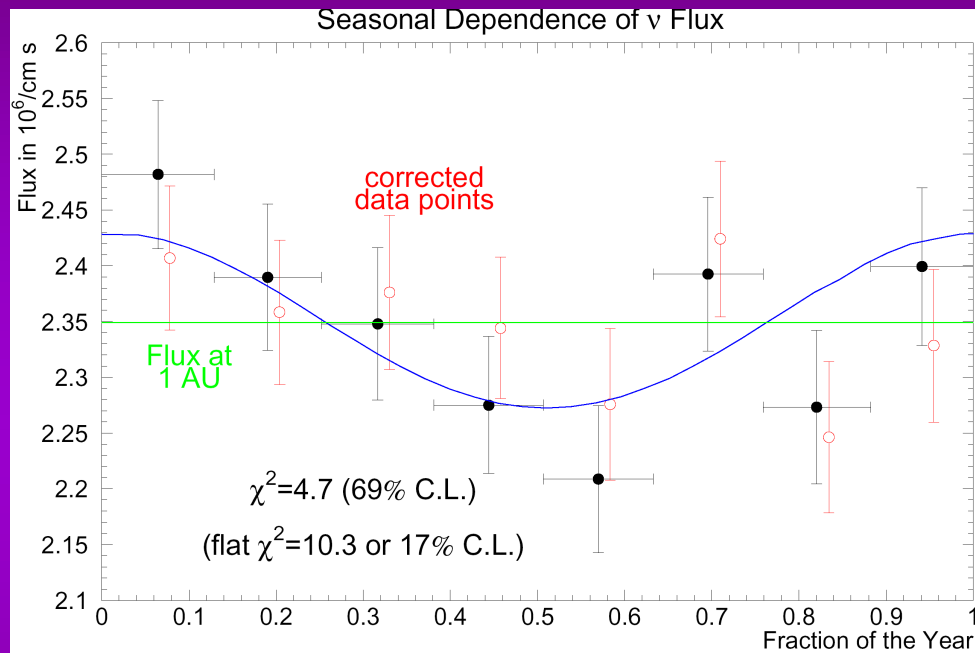
Nie obserwuje się modulacji widma tylko znów deficyt neutrin.



Zależność sygnału od pory dnia i nocy



Zależność sygnału od pory roku



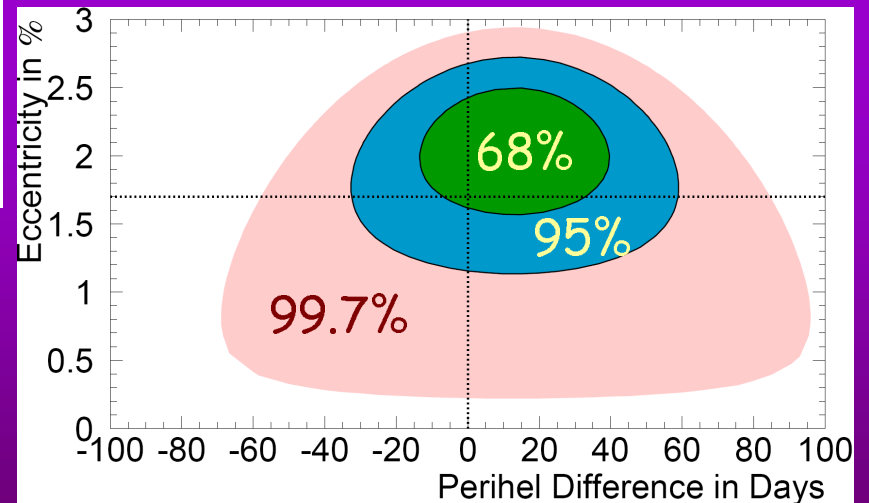
Jan....

Jun..

..Dec

>6.5 MeV to avoid radon bkg seasonal fluctuations

Mimośród orbity Ziemi zmierzony przy użyciu danych SK:



Klucz do zagadki neutrin słonecznych

- W kilku eksperymentach obserwujemy deficyt
- Eksperymenty radiochemiczne mierzyły tylko neutrina elektronowe
- Super-Kamiokande mierzył reakcję, w której mogły brać udział różne typy neutrin



Musimy zmierzyć osobno neutrina

$$\nu_e \quad i \quad \nu_{\mu/\tau}$$

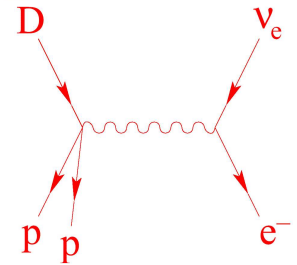
Solar ν Interactions in SNO

Elastic Scattering (ES) $\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$

- Directional sensitivity (e^- forward peaked)
- Cross-section for ν_e is $6.5 \times$ larger than for $\nu_{\mu\tau}$

Charged Current (CC) $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$

- Some directional information ($1 - \frac{1}{3} \cos \theta_{e\nu}$)
- good E_ν sensitivity (ν_e spectrum)



Neutral Current (NC) $\nu_x + d \rightarrow n + p + \nu_x$

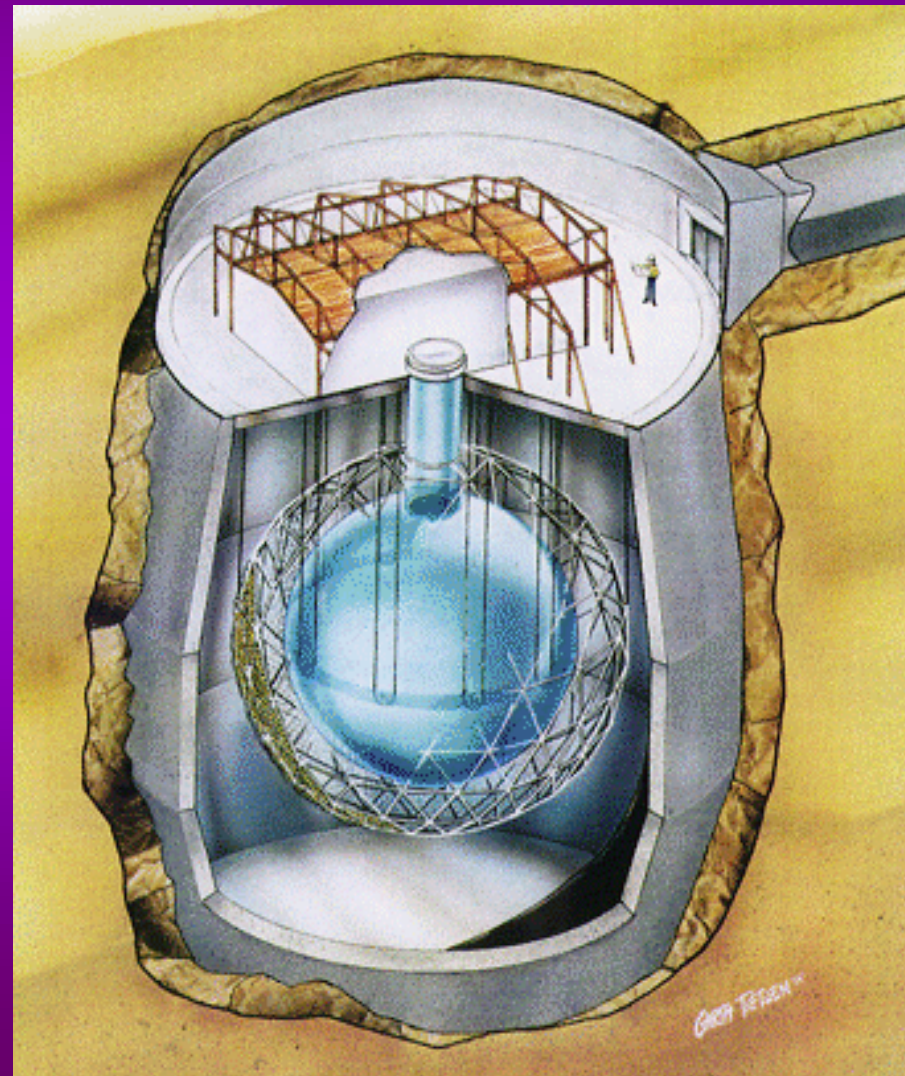
- Total flux of active neutrinos above 2.2 MeV
- Detect neutrons by $n + d \rightarrow t + 6.25 \text{ MeV } \gamma$

SNO

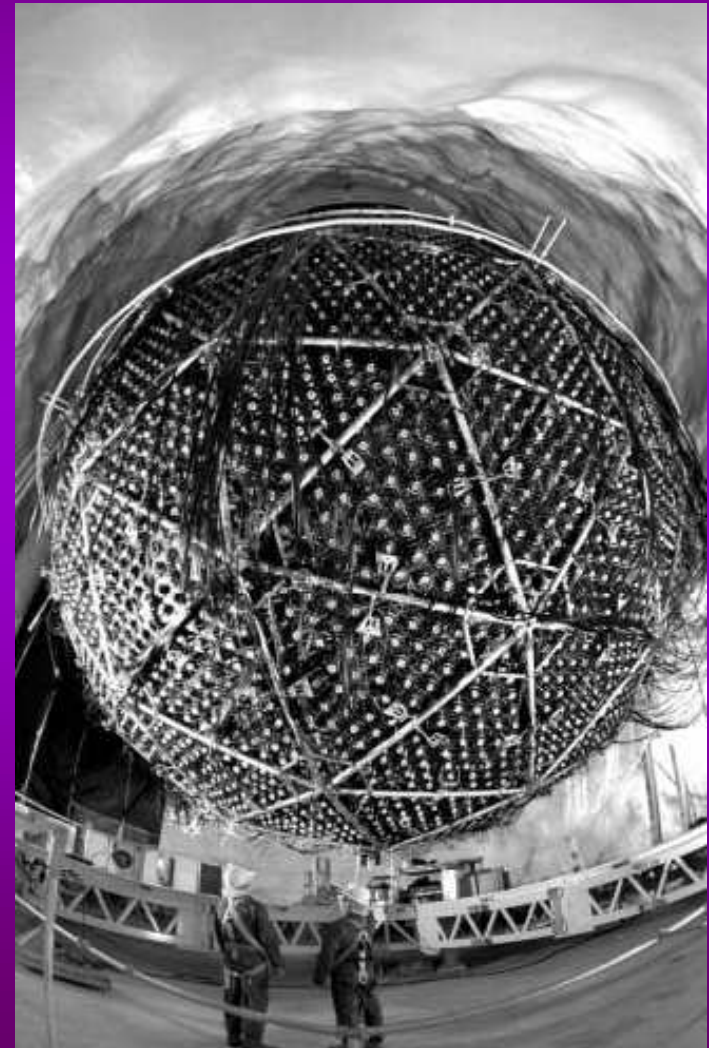
(Sudbury Neutrino Observatory)

- 2 km pod ziemią
- 1000 ton D_2O
- 6500 ton H_2O
- 10000 fotopowielaczy o średnicy 20cm

Projektowany od 1984 r
Pierwsze dane w 1999 r



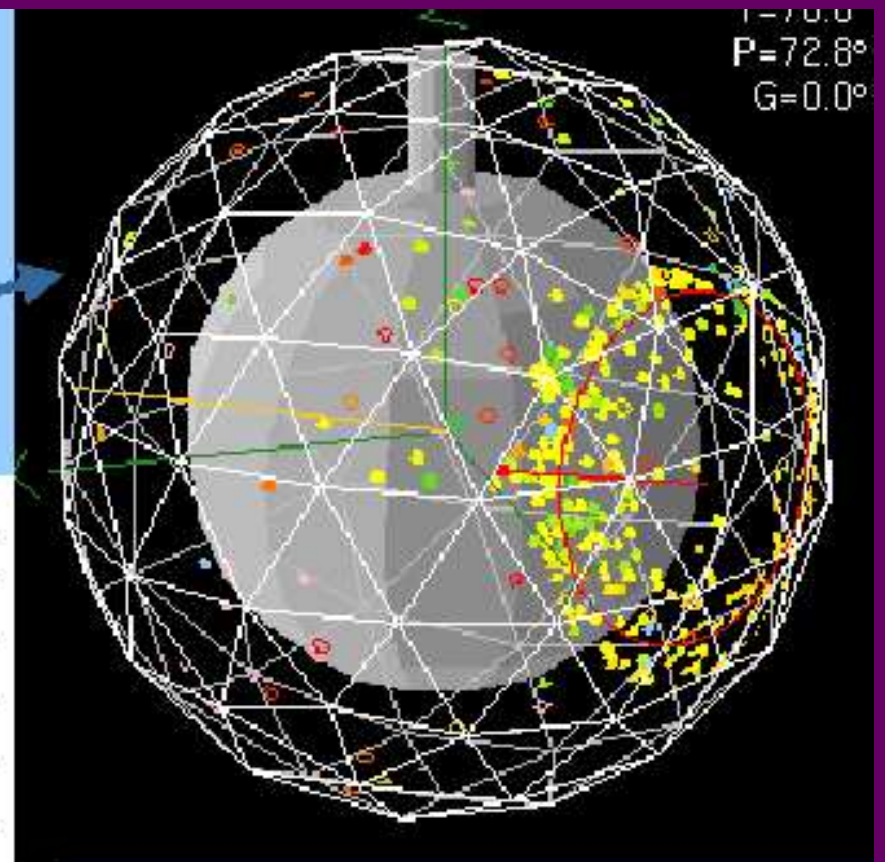
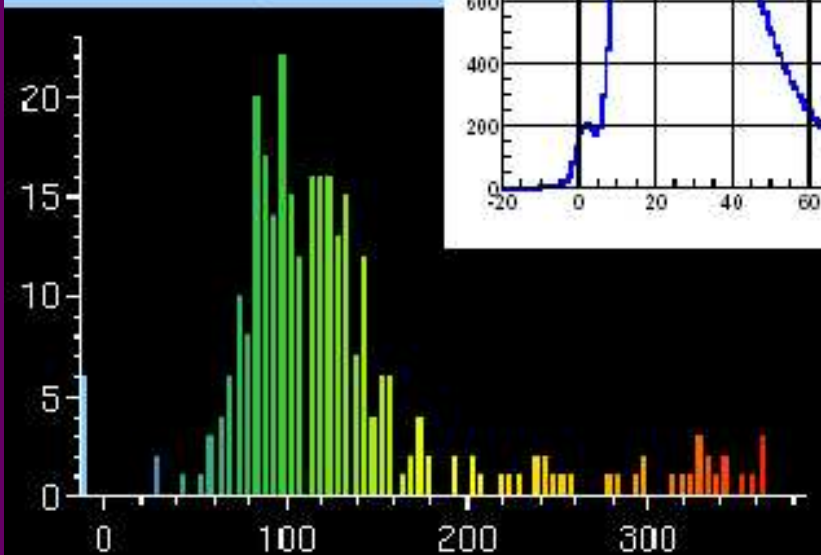
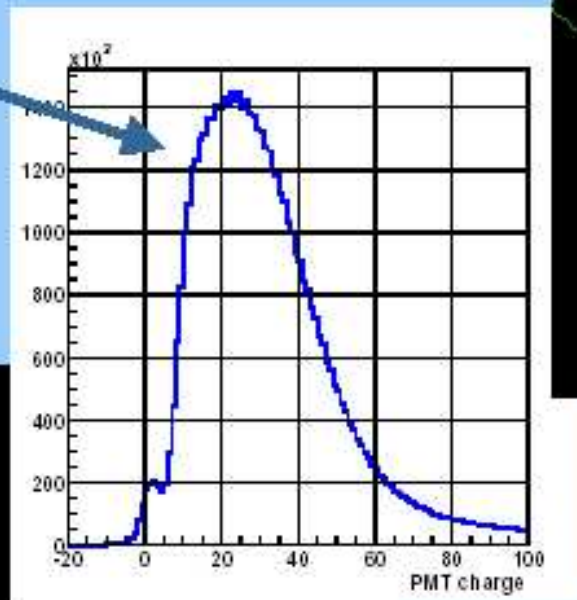
SNO under construction



What We Measure

PMT Measurements

- position
- charge
- time



Reconstructed Event

- event vertex
- event direction
- energy
- isotropy

Signal Extraction Results – Pure D₂O Phase

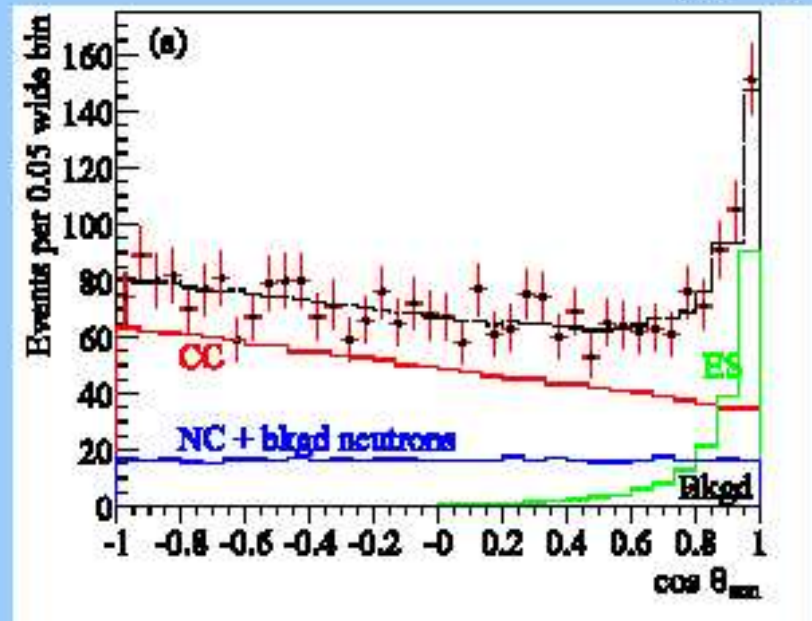
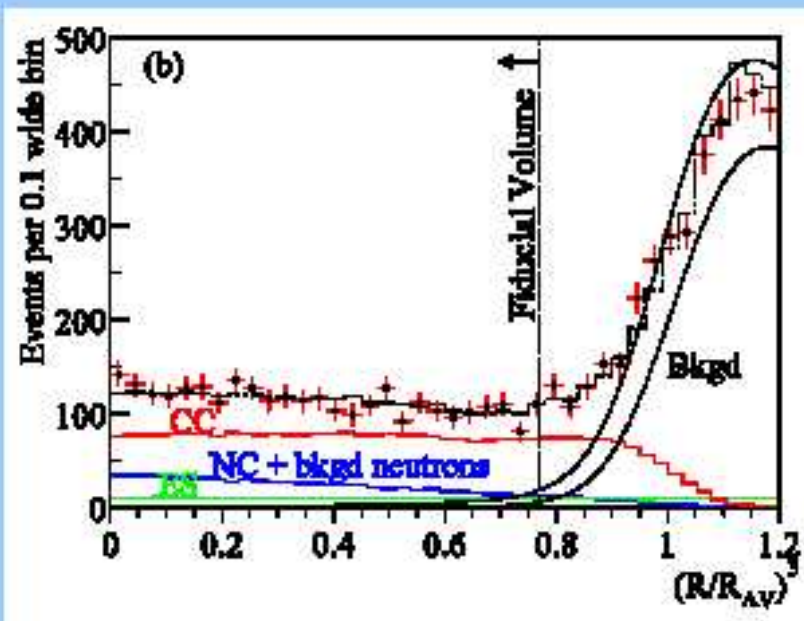
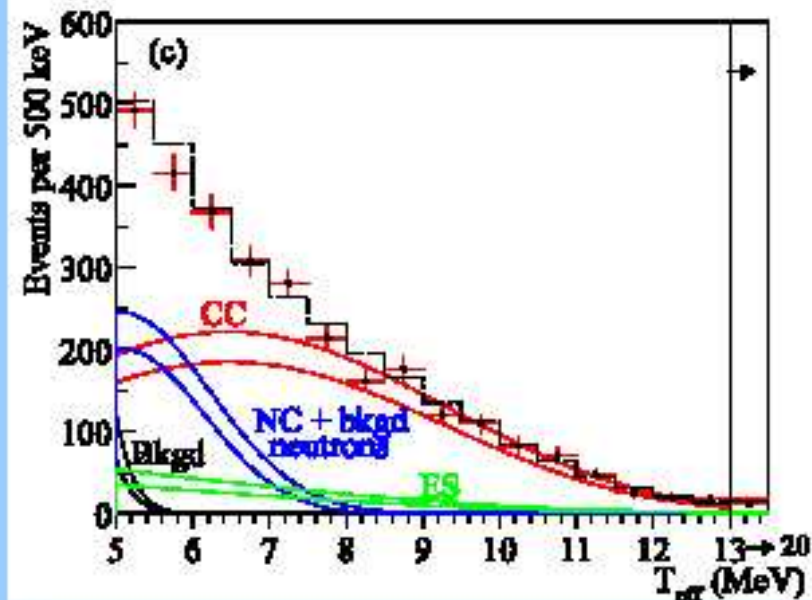
306.4 Live Days

#EVENTS

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

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

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



Strumień neutrin słonecznych mierzony w SNO

SNO $\phi_{CC} = 1.76 \pm 0.11$ [x10⁶/cm²/s]

$\phi_{CC} = \phi_e$ (faza 1)

SK $\phi_{ES} = 2.32 \pm 0.09$

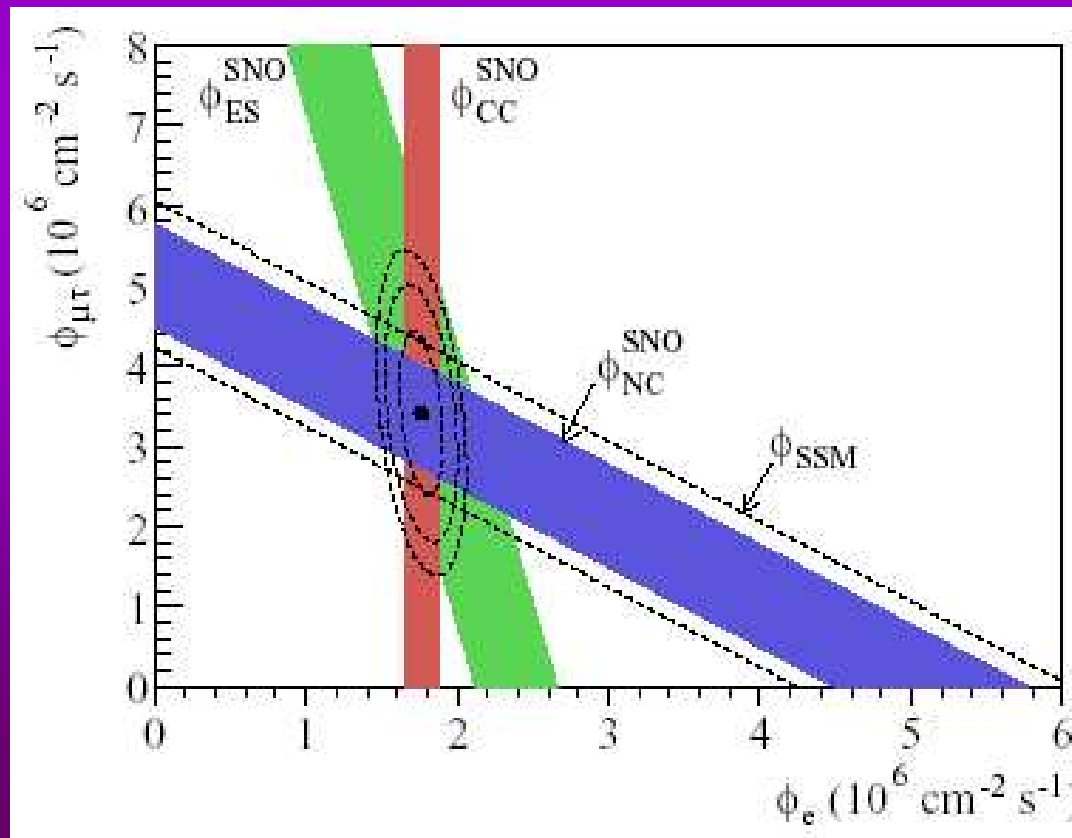
$\phi_{ES} = \phi_e + 0.154 \phi_{\mu,\tau}$



$\phi_{\mu,\tau} = 3.45 \pm 0.65$

$\phi_X = \phi_{NC} = 5.21 \pm 0.66$ (całkowity strumień neutrin ⁸B)

($\phi_{SSM} = 5.05 + 1.01 / -0.81$)



Dowód, że
neutrino oscylują:

$\nu_e \rightarrow \nu_{\mu/\tau}$

Dodatkowy pomiar w SNO

Tak ważny wynik wymaga zawsze sprawdzenia.

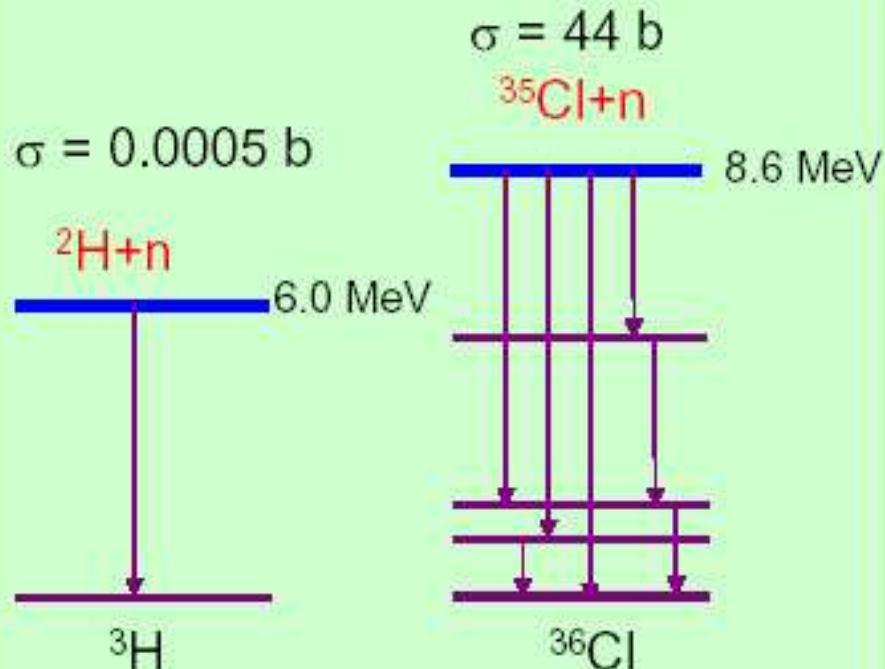
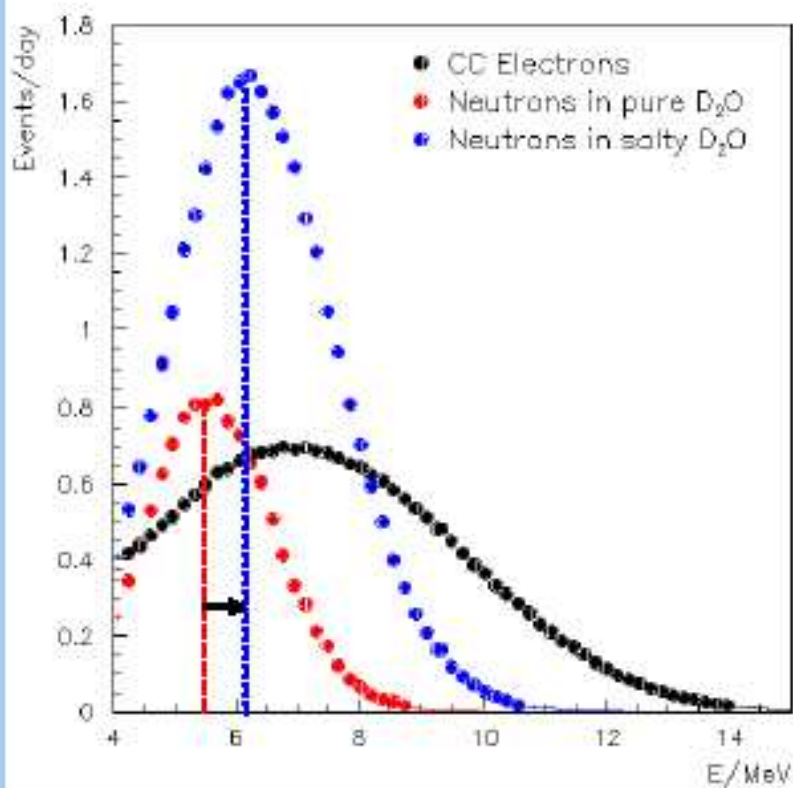
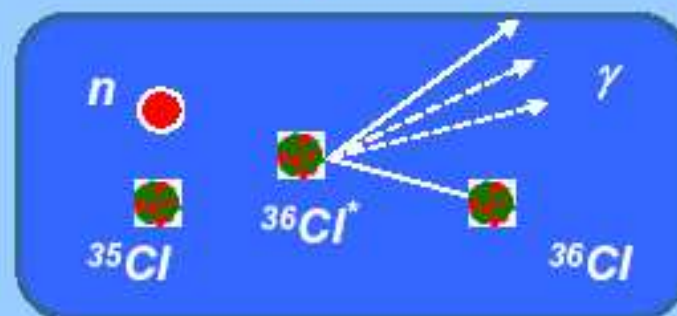
Postanowiono mierzyć strumień neutronów z reakcji:



dodając zwykłą sól do ciężkiej wody

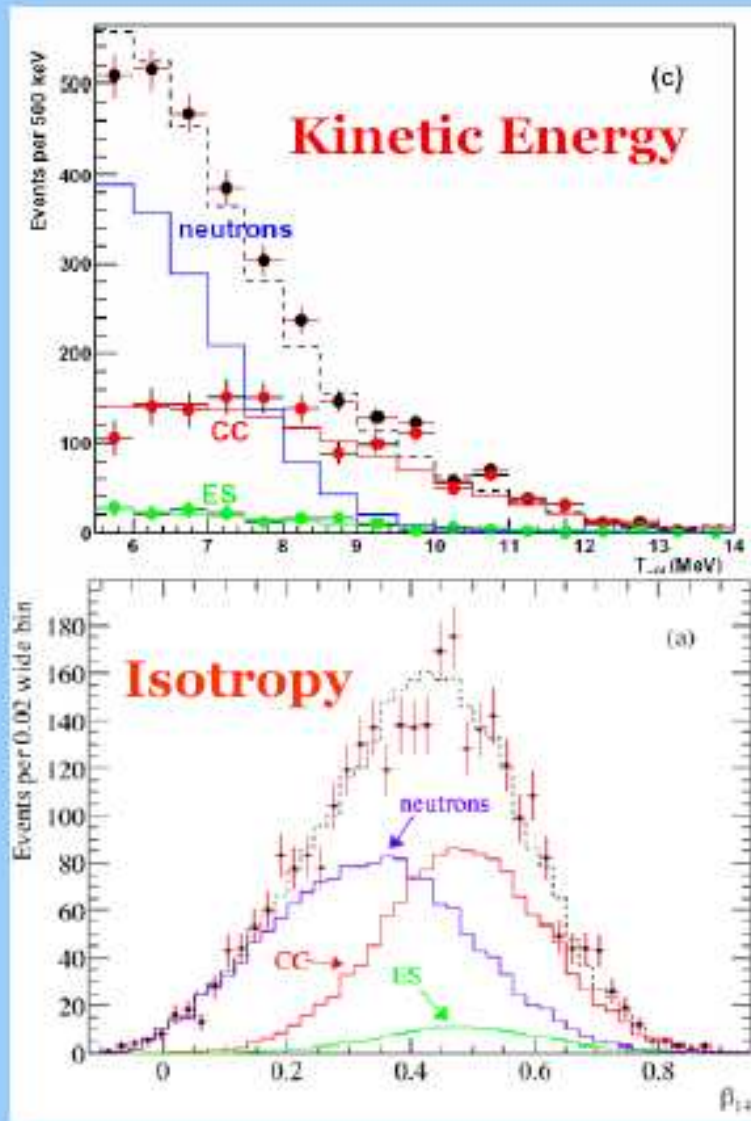
Neutrons in Salt → NaCl Capture

- Higher capture cross section
- Higher energy release
- Many gammas

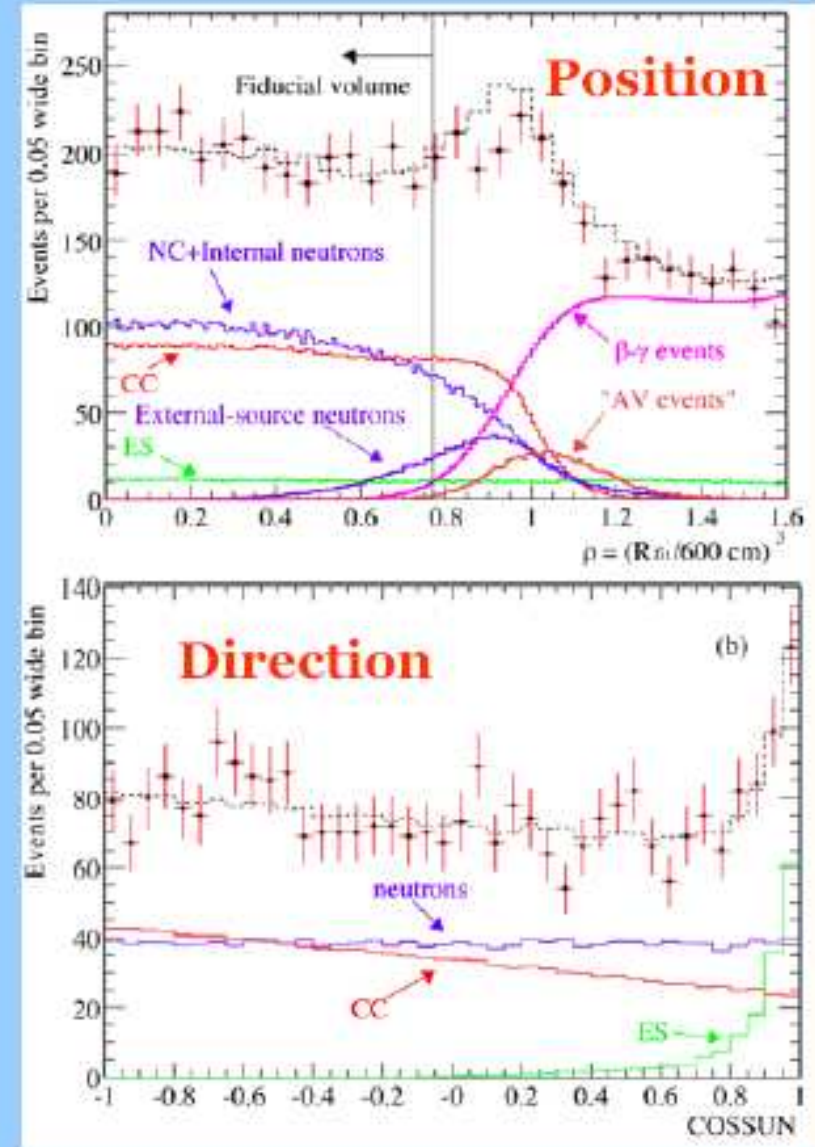


Measured distributions

Rozkładu energii nie używali do separacji oddziaływań



Measure External n background



Comparison with phase I

3055 candidate events
254 live days



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

⁸B shape constrained

#EVENTS

CC 1339.6^{+63.8}_{+61.5}

ES 170.3^{+23.9}_{+20.1}

NC 1344.2^{+69.8}_{+69.0}

84 external-source neutrons

Pure D₂O
(phase I)

Salt
(phase II)

$$\Phi_{CC}^{I-cons.} = 1.76^{+0.06}_{-0.05} (stat.)^{+0.09}_{-0.09} (syst.)$$

$$\Phi_{ES}^{I-cons.} = 2.39^{+0.24}_{-0.23} (stat.)^{+0.12}_{-0.12} (syst.)$$

$$\Phi_{NC}^{I-cons.} = 5.09^{+0.44}_{-0.43} (stat.)^{+0.46}_{-0.43} (syst.)$$

$$\Phi_{CC}^{II-cons.} = 1.70 \pm 0.07 (stat.)^{+0.09}_{-0.10} (syst.)$$

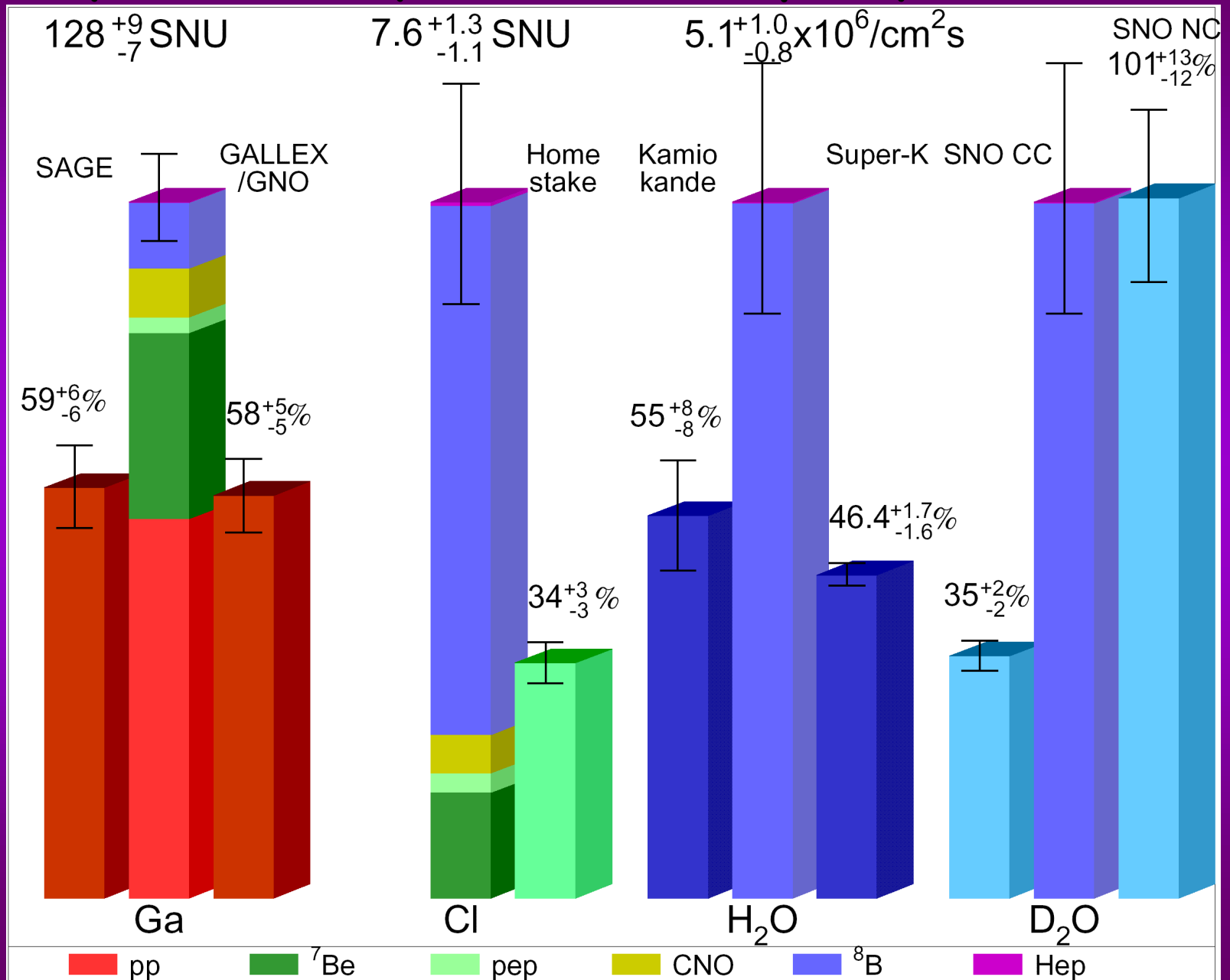
$$\Phi_{ES}^{II-cons.} = 2.13^{+0.29}_{-0.28} (stat.)^{+0.15}_{-0.08} (syst.)$$

$$\Phi_{NC}^{II-cons.} = 4.90 \pm 0.24 (stat.)^{+0.29}_{-0.27} (syst.)$$

Potwierdzono z większą precyzją pomiary z fazy I tzn:

- ❖ stwierdzono pojawienie się neutrin μ i τ w drodze z centrum Słońca
- ❖ całkowity strumień Φ_{NC} zgadza się z oczekiwaniami

Wyniki wszystkich eksperymentów



Czy antyneutrino też oscylują?

Reaktory to potężne źródła

$\bar{\nu}_e$

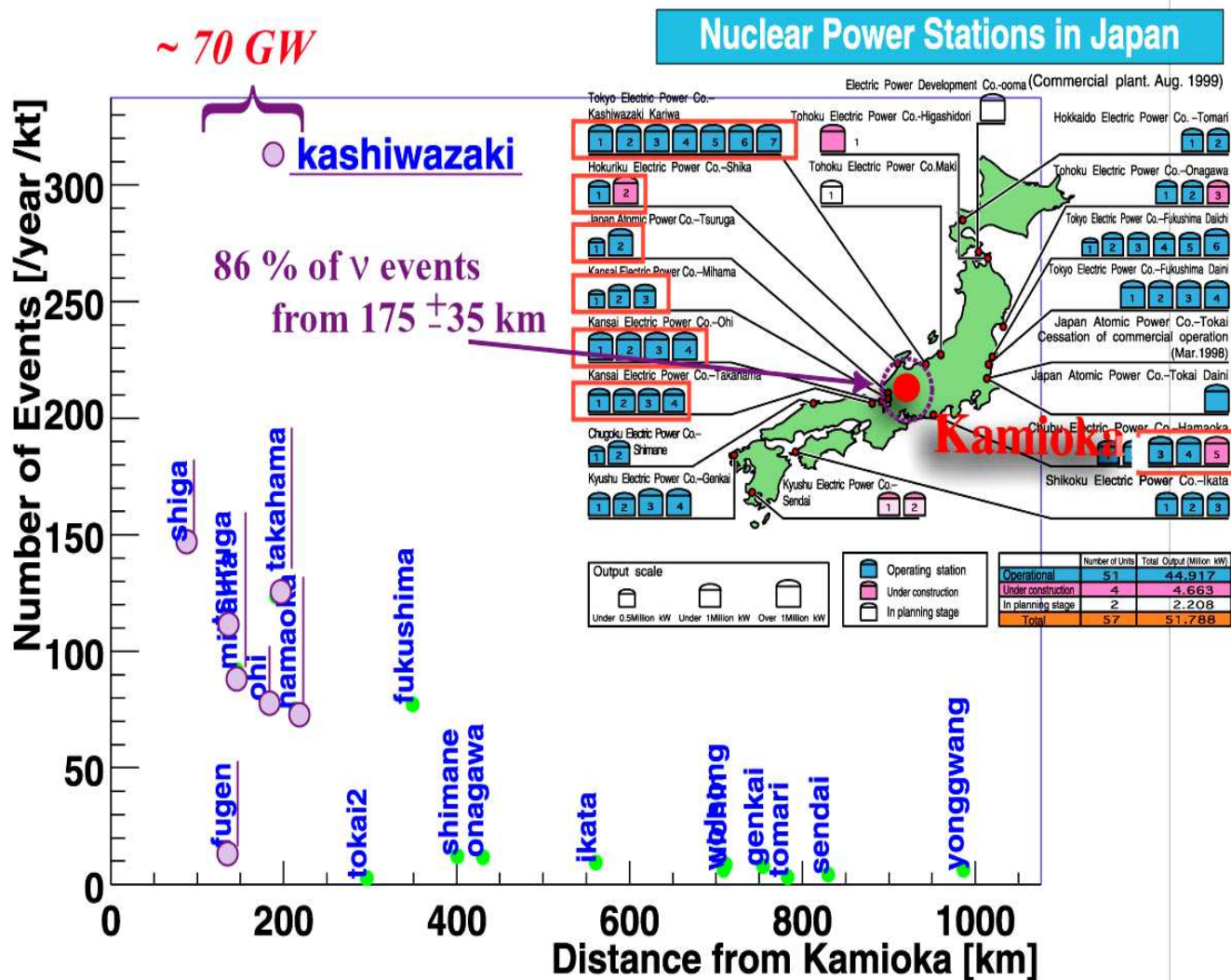


Eksperyment KamLAND

Oczekiwany strumień antyneutrin reaktorowych w KamLANDzie

20 % of world nuclear power

~ 70 GW

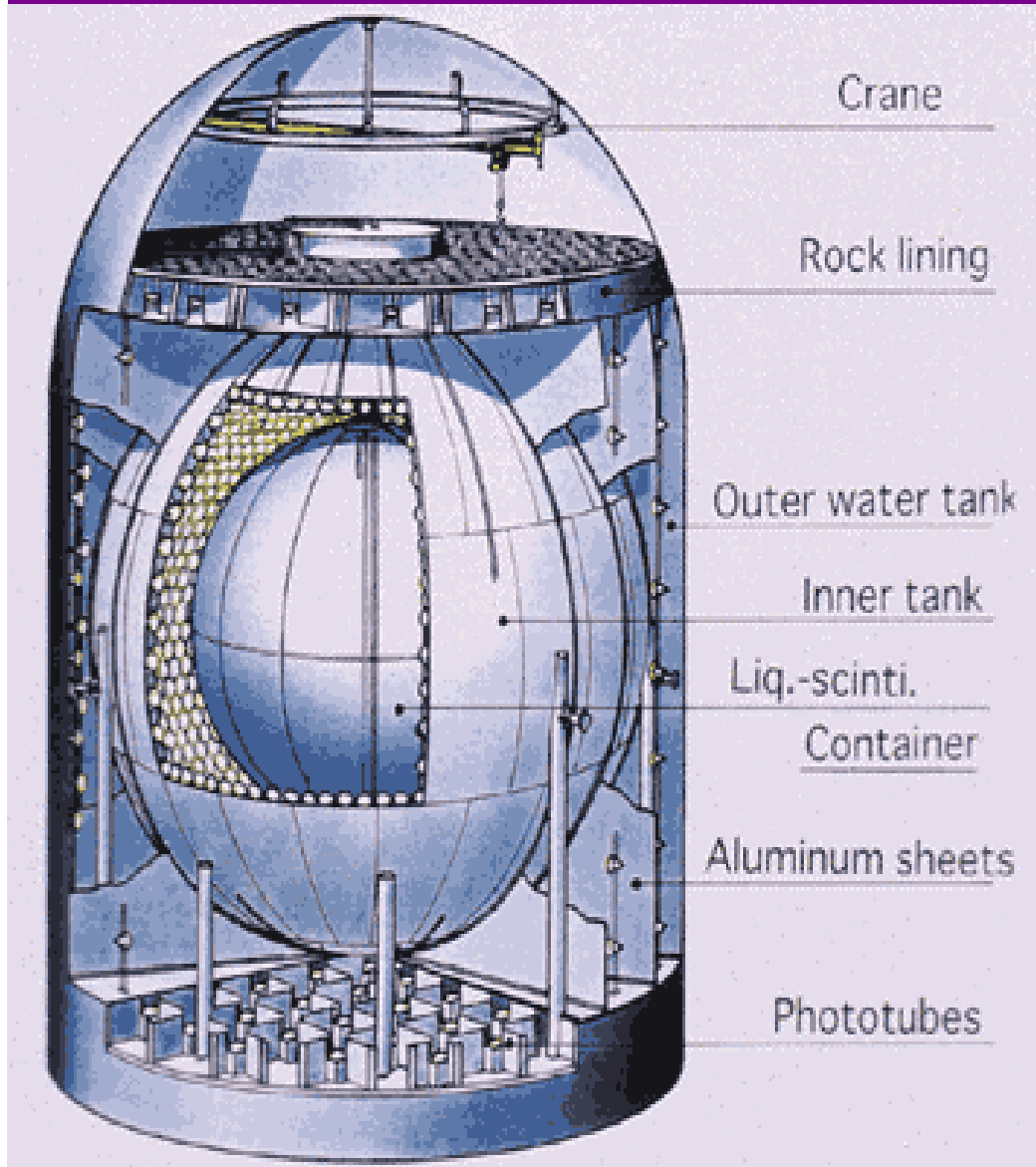


Oczekiwane oddziaływania neutrin w całej objętości detektora

~ 2 przyp/dzień

strumień
~ $1/R^2$

Detektor KamLAND



Budowa podobna do SNO:

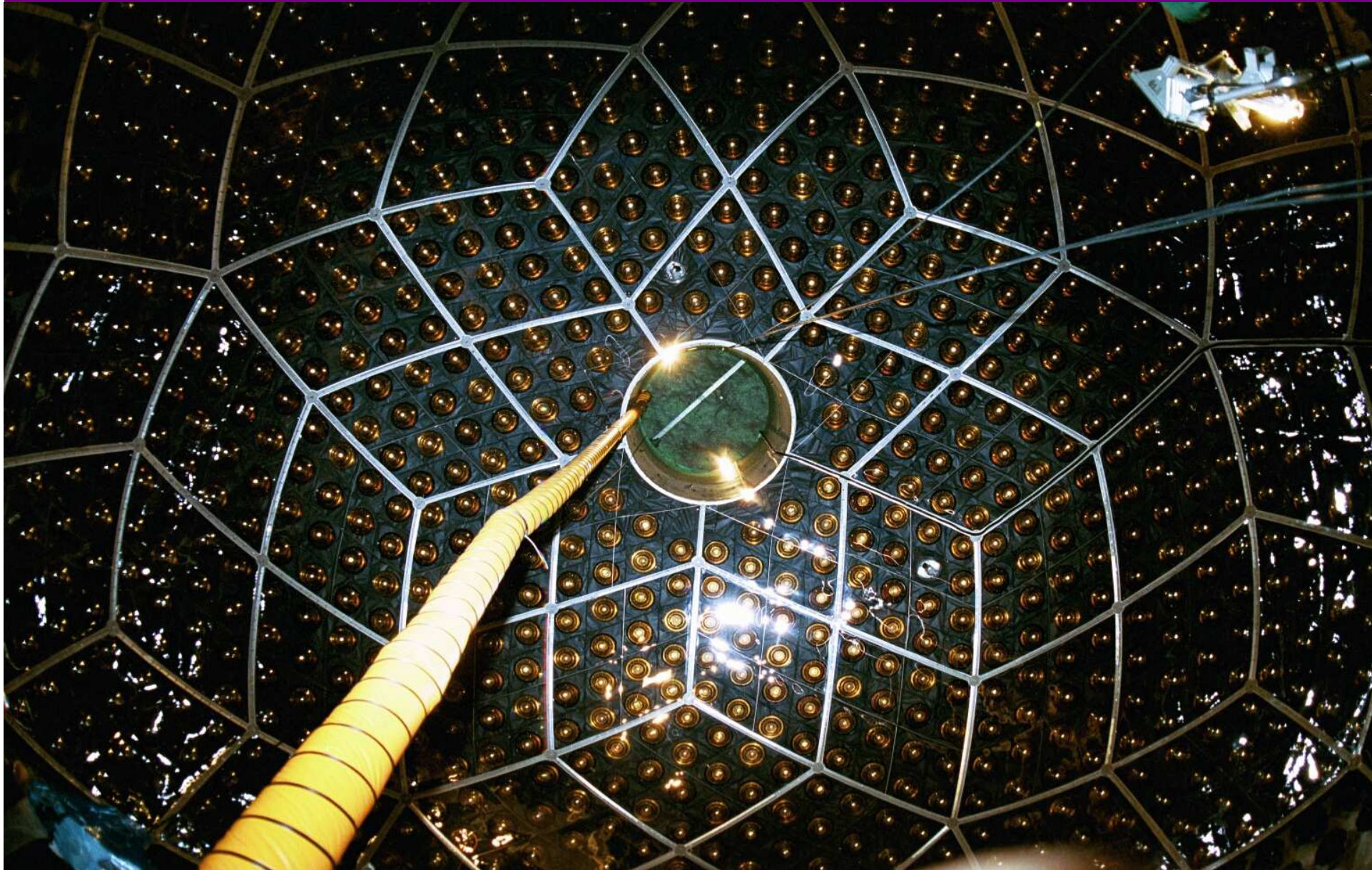
- zewnętrzny zbiornik wypełniony 3200 t **wody**
- wewnętrzny kulisty zbiornik wypełniony 2000 t **oleju**
- w środku balon wypełniony 1000 t **ciekłego scyntylatora**
- pomiar przy użyciu ok. 2100 fotopowielaczy.
- całość umieszczona na głębokości ok. 2700 m ("water-equivalent")

Detektor KamLAND



zbiornik
wewnętrzny

Konstrukcja detektora KamLAND



Kamland

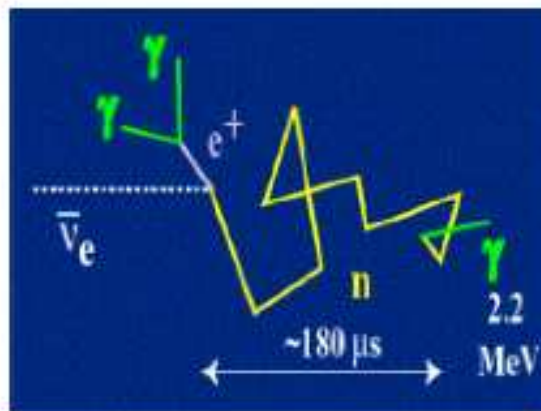
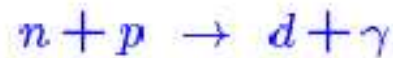
Selekcja przypadków

W oddziaływaniach **antyneutrino**

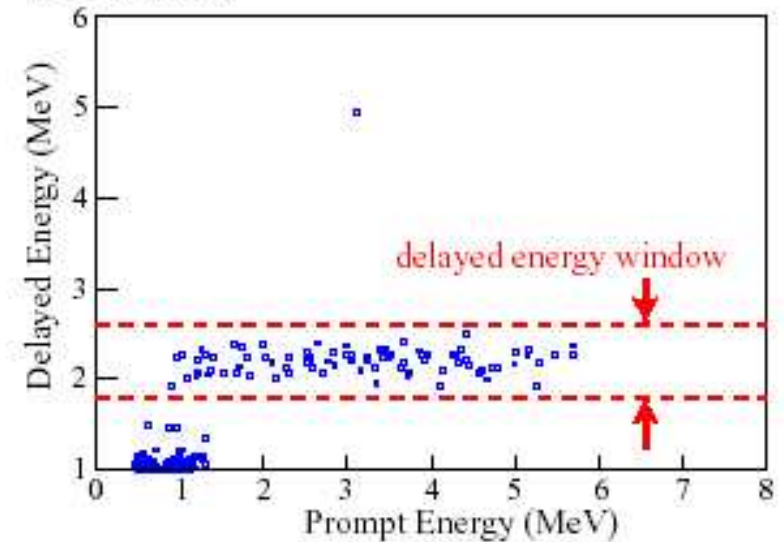


spodziewamy się:

- natychmiastowej emisji γ z anihilacji e^+
- opóźnionej emisji γ z wychwytu **neutronu**



Cięcie na energii fotonu z wychwytu neutronu:

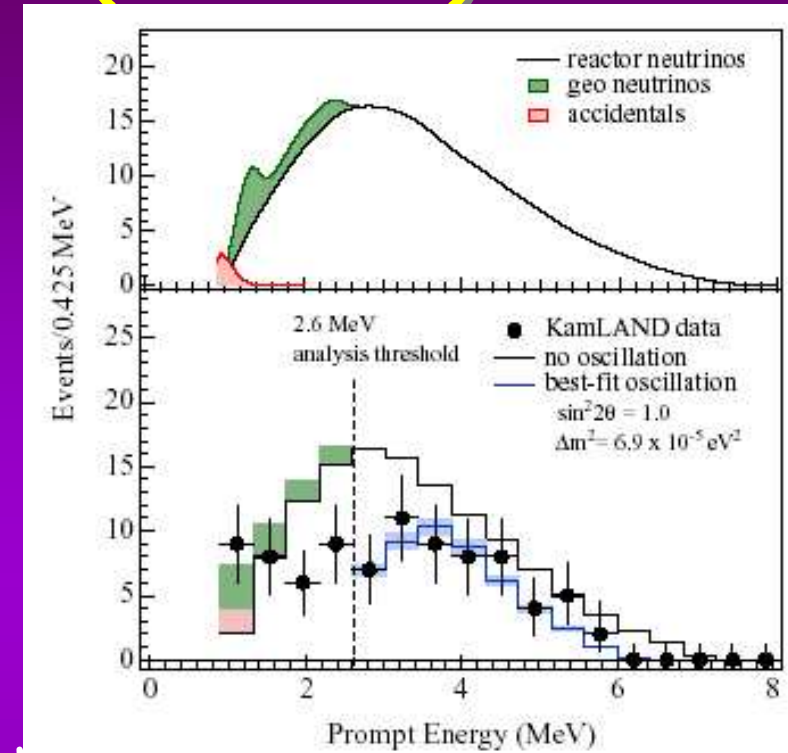


Oczekujemy $E_2^\gamma \approx 2.2 \text{ MeV}$

Wyraźny sygnał, zaniedbywalne tło

Wyniki KamLANDu (145 dni)

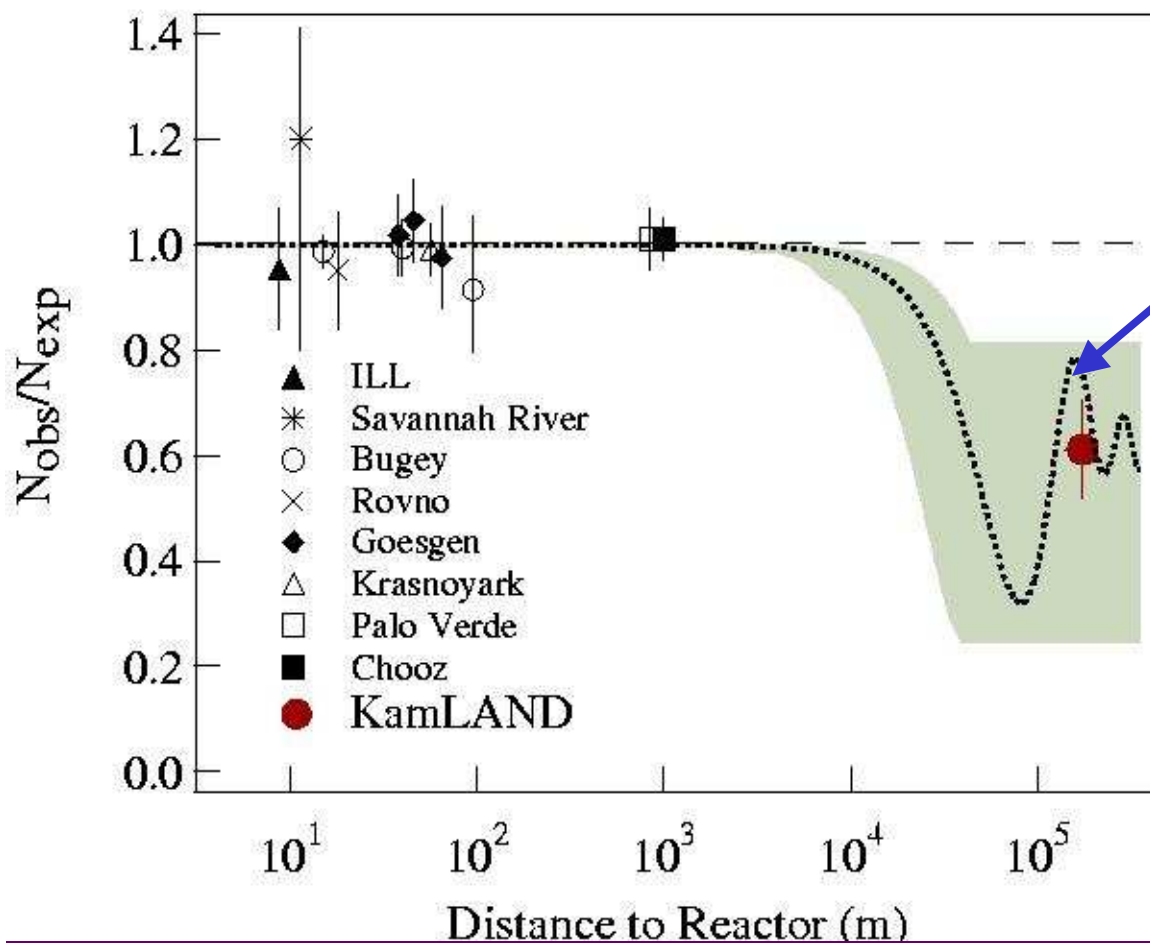
| | |
|------------|--------------------|
| | Liczba przypadków: |
| Dane | 54 |
| Oczekiwane | 86.8 ± 5.6 |
| Tło | 0.95 ± 0.99 |



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

Hipoteza braku oscylacji wykluczona na poziomie 99.95%

Stosunek mierzonego do oczekiwanego strumienia antyneutrino w dotychczasowych eksperymentach reaktorowych



Obszar zaciemniony:
rozwiązanie neutrin
słonecznych
dla 95% C.L.

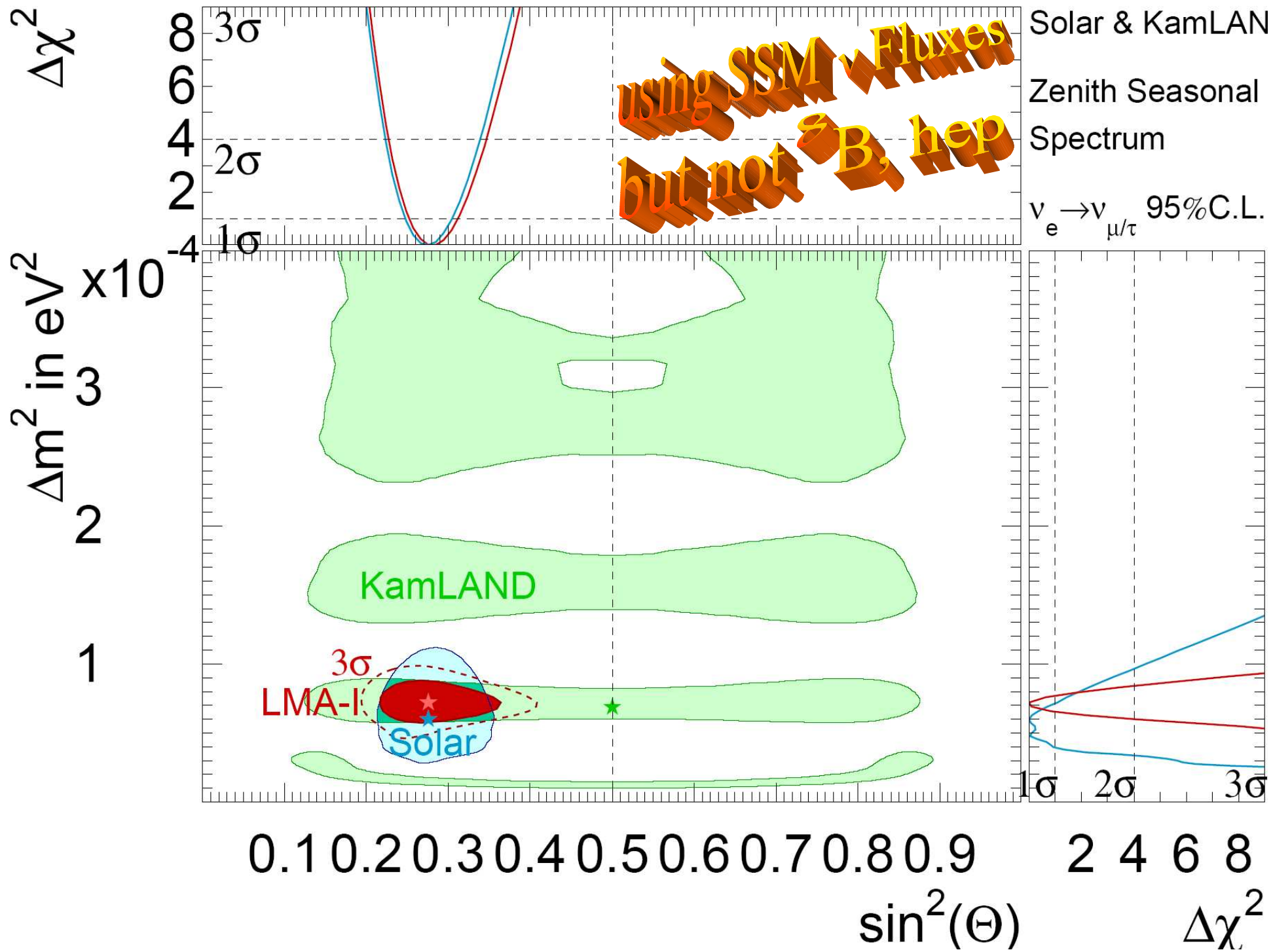
Linia kropkowana
 $\sin^2 2\theta = 0.833$
 $\Delta m^2 = 5.5 \times 10^{-6} \text{eV}^2$

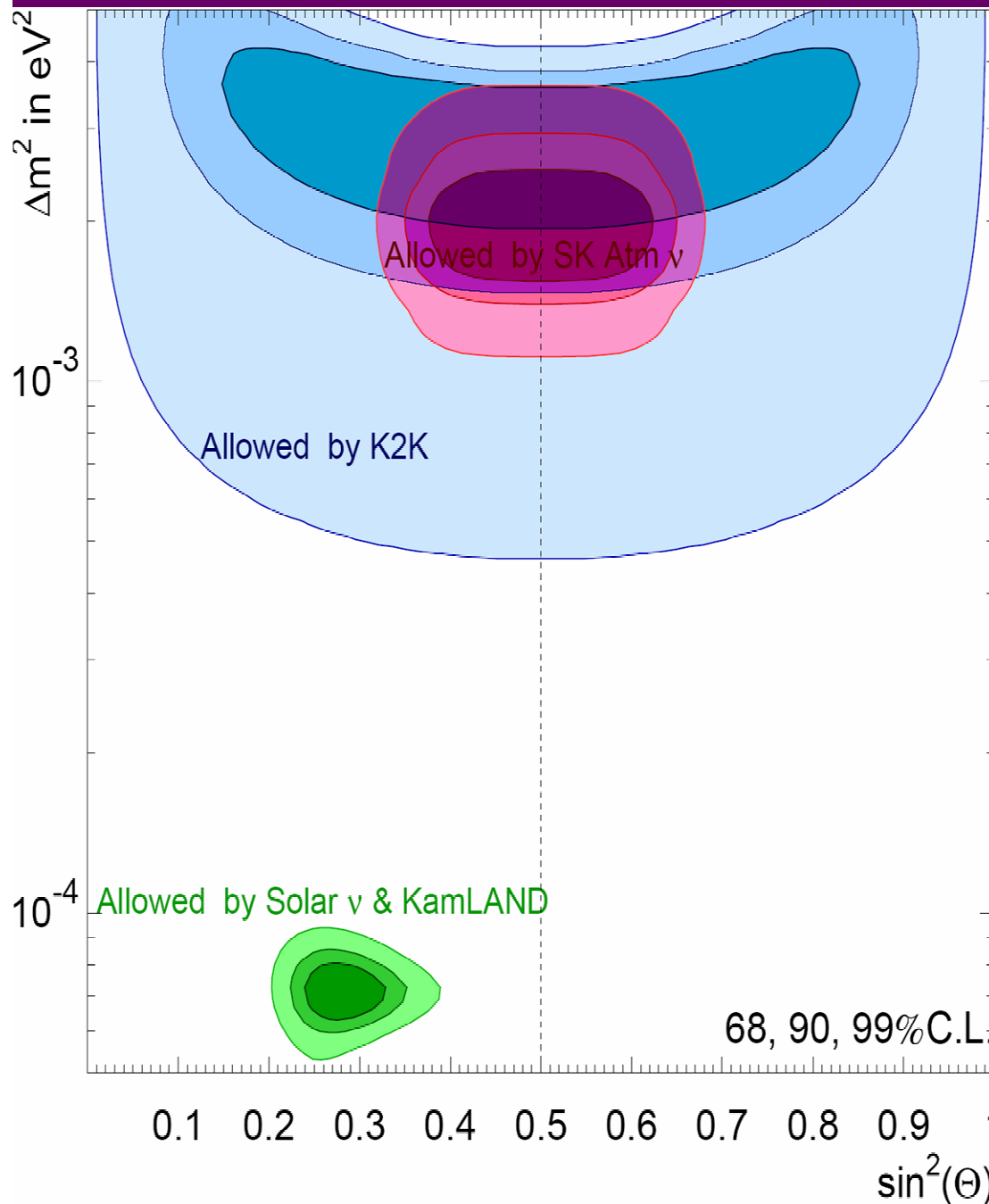
zgodność wskazuje
na zachowanie symetrii
CPT
(ładunek-parzystość-czas)

KamLAND pokazał, że

**Parametry oscylacji
antyneutrino elektronowych
są konsistentne z parametrami oscylacji
neutrino słonecznych.**

**Zakładając CPT
rozwiązanie zagadki neutrino słonecznych w SNO/SuperK
jest odtworzone przez eksperyment naziemny.**





Podsumowanie - parametry oscylacji

Neutrina atmosferyczne

$$0.0019 \text{ eV}^2 < \Delta m_{atm}^2 < 0.003 \text{ eV}^2$$

maksymalne mieszanie

Neutrina słoneczne i Kamland

$$0.00005 \text{ eV}^2 < \delta m_{solar}^2 < 0.00008 \text{ eV}^2$$

ale max mieszanie (1,2)

wykluczone

na poziomie 5.4σ

A co z wynikiem LSND???

Podsumowanie - Oscylacje neutrin

➤ Stany neutrin o ustalonym zapachu są mieszanką stanów o ustalonej masie.

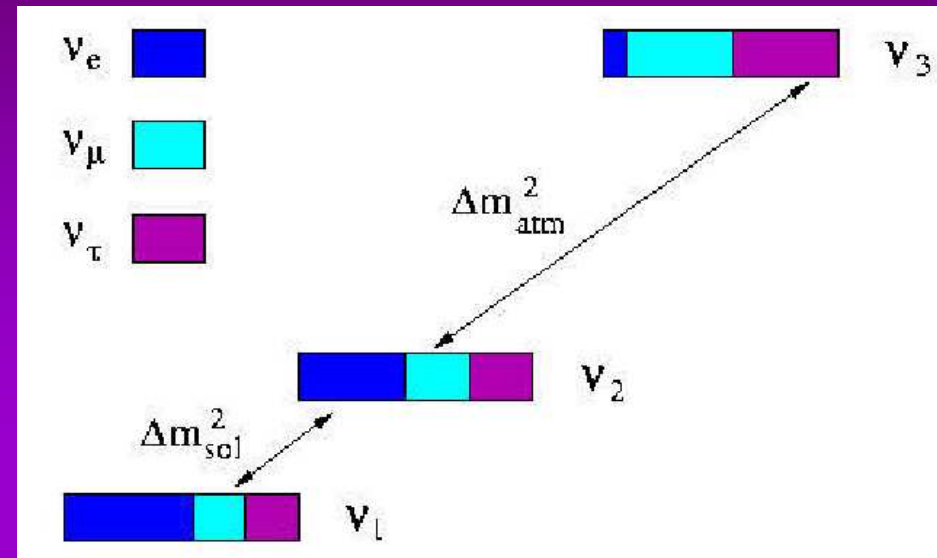
➤ Prowadzi to do oscylacji neutrin zmierzonych w 2 sektorach:

- ❖ atmosferycznym

$$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau} \quad \Delta m_{23}^2 \approx 0.002 eV^2$$

❖ słonecznym

$$\nu_e \rightarrow \nu_{\mu/\tau} \quad \Delta m_{12}^2 \approx 0.00006 eV^2$$



Mieszanie 3 zapachów może wytłumaczyć tylko 3 stany masowe czyli 2 niezależne różnice mas. Problem z wynikiem LSND ????

$$\Delta M^2 > 0.025 eV^2$$

eksperyment MiniBoone

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:

$\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$
neutrino
słoneczne

$\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$
neutrino
atmosferyczne

$\nu_e \leftrightarrow \nu_\tau$
ew. słabe
mieszanie

duże mieszanie

Oscylacje neutrin

Podsumowanie

W ciągu ostatnich kilka lat dokonana się "rewolucja" w naszym spojrzeniu 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"...

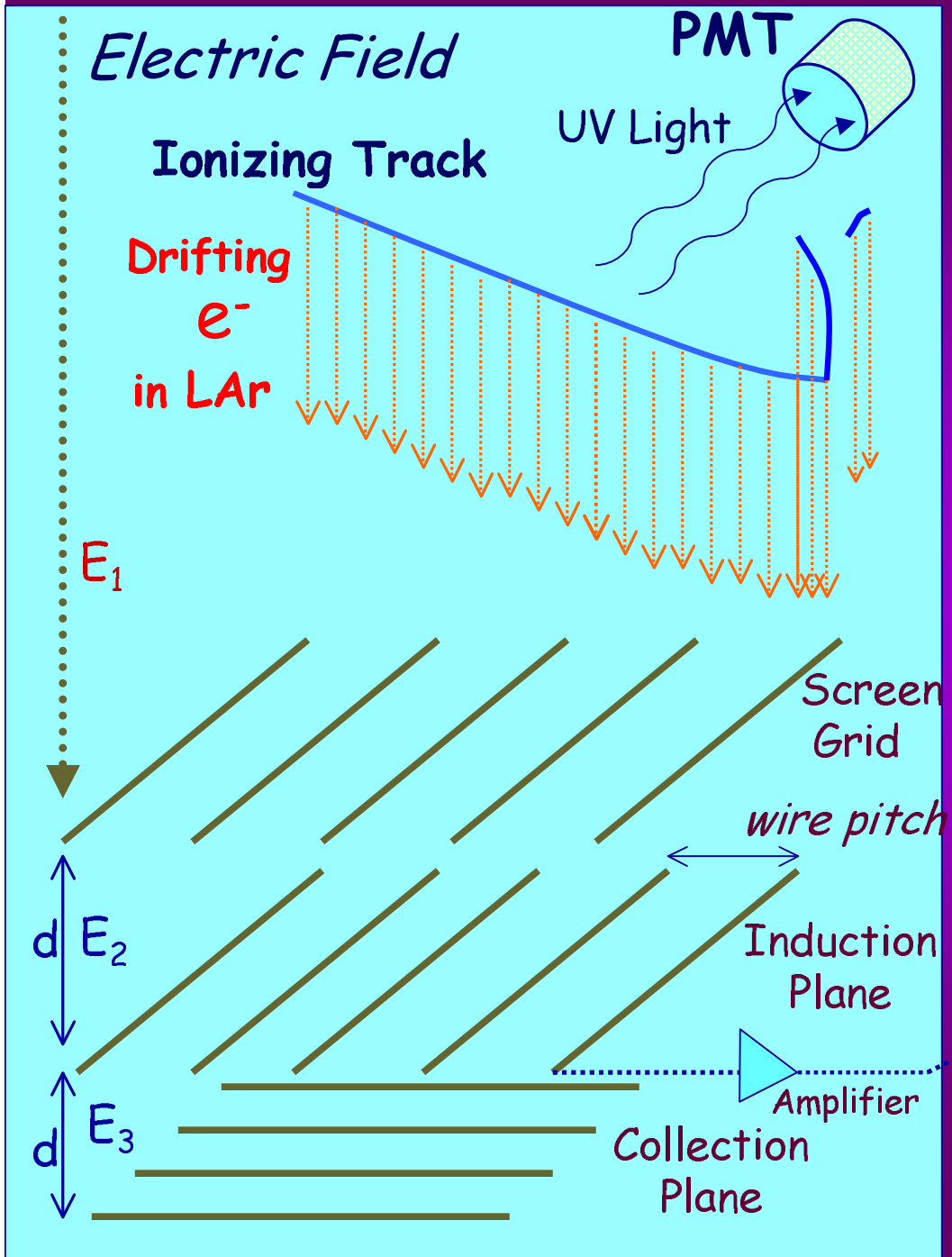
Dlatego planowane i przygotowywane są kolejne, liczne i różnorodne doświadczenia związane z fizyką neutrin (słonecznych, atmosferycznych, reaktorowych, akceleratorowych).

Detektor ICARUS „T600”

Nowatorska technika: TPC (time projection chamber) z ciekłym argonem
-umożliwia budowę dużych detektorów ze zdolnością rozdzielczą komór
pęcherzykowych.

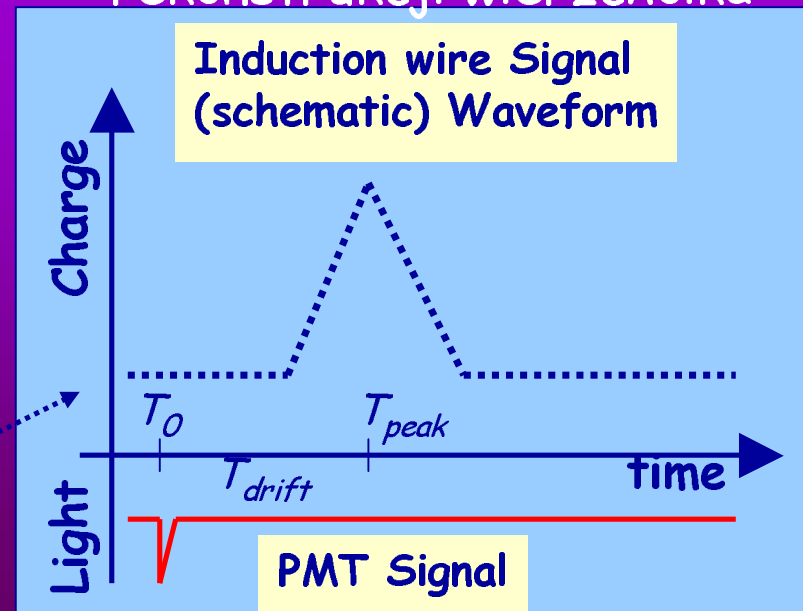
- Elektrony powstałe w wyniku jonizacji dryfują w polu elek. 500 V/cm.
- Rejestrowane są przez komory wielodrutowe (odl. między drutami 3mm)
- Argon musi być bardzo czysty, żeby droga dryfu była długa
- W Warszawie jest grupa uczestnicząca w eksperymencie Icarus



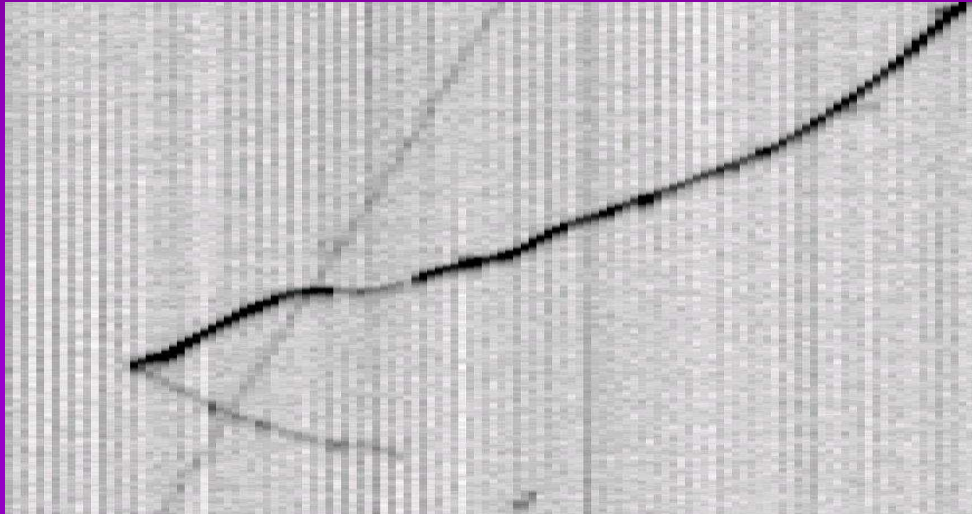


ICARUS

- Uzyskuje się czystości np. O_2 ($< 0.1\text{ppb}$), które umożliwiają dryfowanie elektronów na odległości kilku metrów.
- Wykorzystuje się też światło scyntylacyjne i Czerenkowskie do rekonstrukcji wierzchołka



Rejestracja zdarzeń w detektorze TPC z ciekłym argonem



Detektor ICARUS
z 600 tonami ciekłego Ar
będzie wkrótce
zainstalowany w
podziemnym laboratorium
w Gran Sasso (Włochy)

Będzie służył do:

- badania oscylacji neutrin wyprodukowanych w CERNie (730 km)
w szczególności obserwacji neutrin ν_τ powstałych z oscylacji ν_μ
- poszukiwania rozpadu protonu
- rejestracji neutrin z supernowych itd...