Neutrina (2)

Elementy fizyki cząstek elementarnych
Wykład VIII

- Neutrina słoneczne
- Wyniki Super-Kamiokande
- Wyniki SNO
- Eksperyment K2K
- Nowe eksperymenty
- Podsumowanie

Przypomnienie

Wyniki LSND

Zmierzono przypadki odpowiadające reakcji

$$\bar{\nu}_\mu \, p \;\rightarrow\; n \, e^+$$

Reakcja z łamaniem zachowania liczby leptonowej ?
Czy oscylacja $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$?...

Wyniki Super-Kamiokande

Obserwacja neutrin atmosferycznych

- neutrina elektronowe
  - $\Rightarrow$ strumień zgodny z przewidywaniami modelu
  - $\Rightarrow$ tyle samo neutrin "do góry" co "do dołu"
- neutrina mionowe
  - $\Rightarrow$ strumień "do dołu" zgodny z przewidywaniami
  - $\Rightarrow$ deficyt $\sim$50% neutrin lecących "do góry"

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

Dopasowane parametry

$$\begin{aligned} \sin^2 2\theta_{\mu\tau} &= 1.00 \\ \Delta m^2_{\mu\tau} &= 0.0025 \, eV^2 \end{aligned}$$

Neutrina słoneczne

Produkcja neutrin

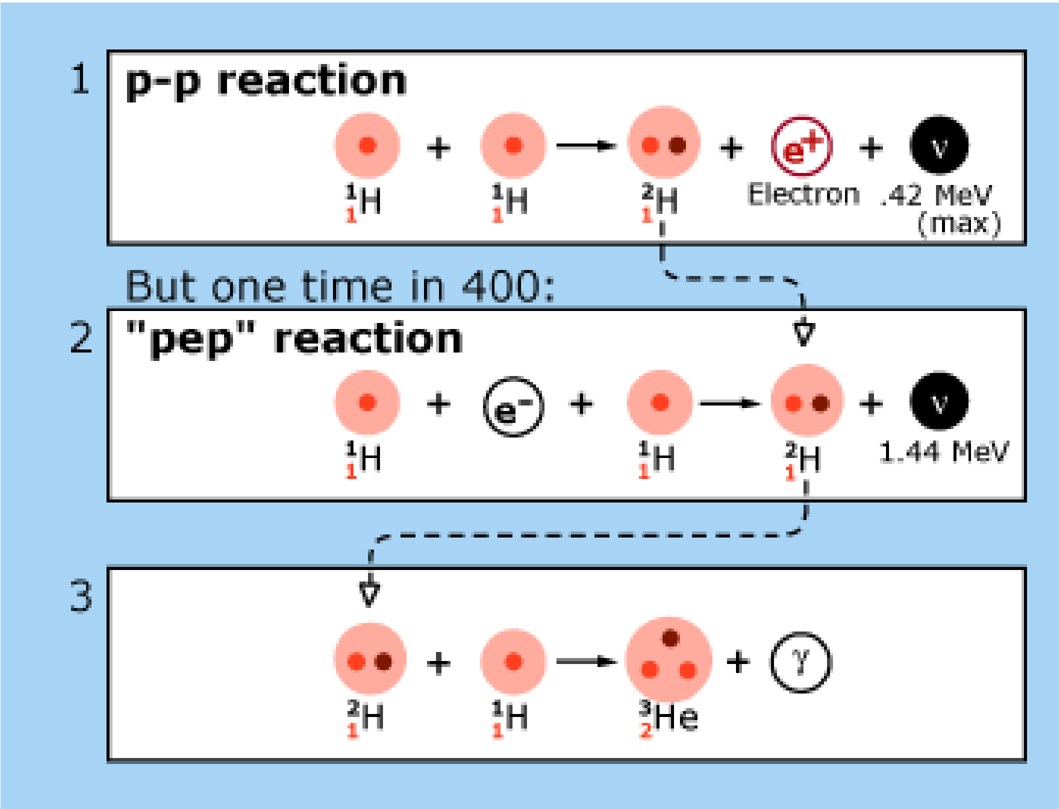
Słońce jest nie tylko źródłem promieniowania elektromagnetycznego, ale też niezwykle intensywnym źródłem neutrin.

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

$$p + p \;\rightarrow\; D \;+\; e^{+} \;+\; \nu_e \quad (E_\nu \leq 0.42\; MeV)$$

jednak wyższe energie uzyskują neutrina z reakcji “**pep**”:

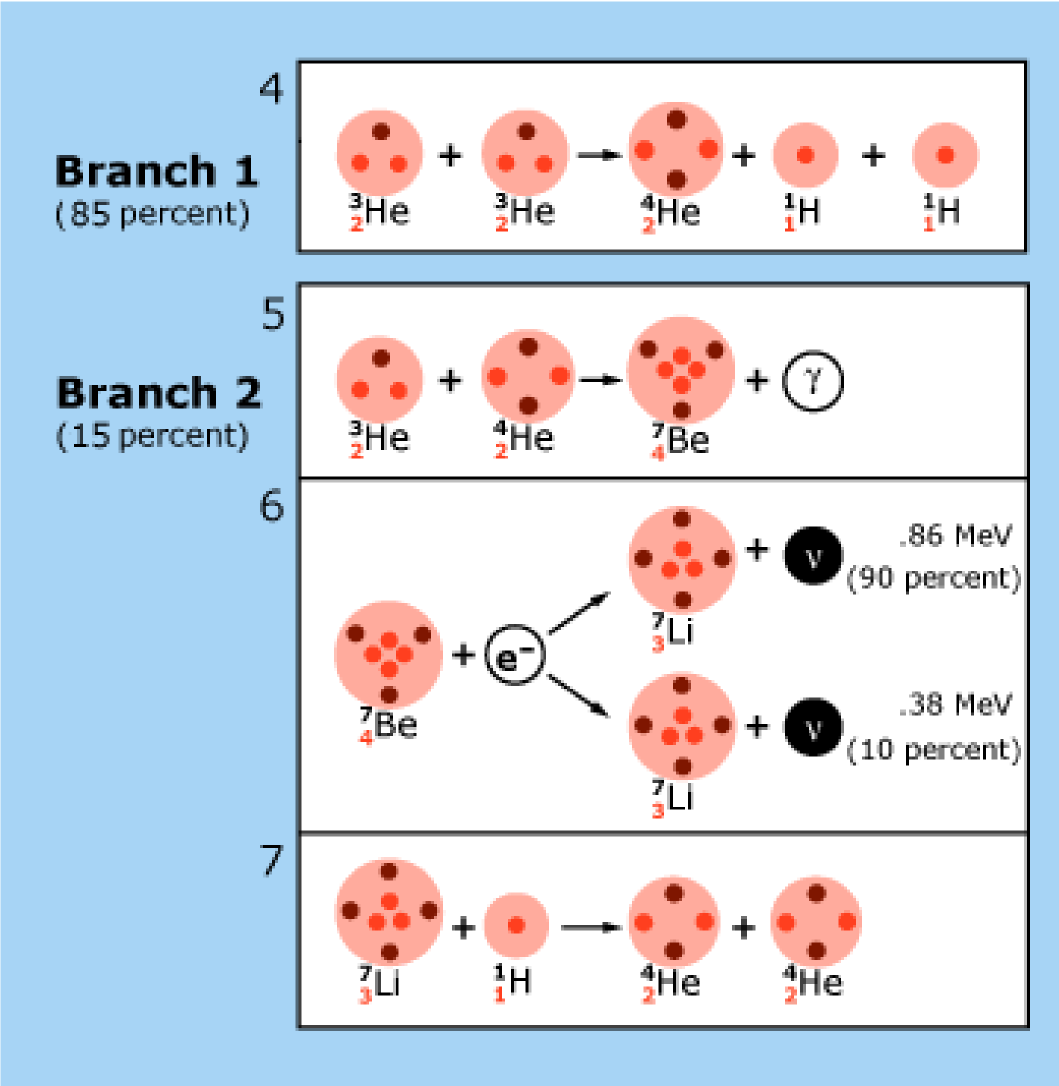
$$p + e^{-} + p \;\rightarrow\; D \;+\; \nu_e \quad (E_\nu \approx 1.44\; MeV)$$



Neutrina słoneczne

Produkcja neutrin

Dalsze reakcje syntezy ^3He, ^4He, ^7Be i ^7Li prowadzą do emisji dodatkowych neutrin.



Neutrina z przemiany ^7Be

$$^7_4Be + e^- \;\rightarrow\; ^7_3Li \;+\; \nu_e$$

mają jednak energie poniżej 1 MeV

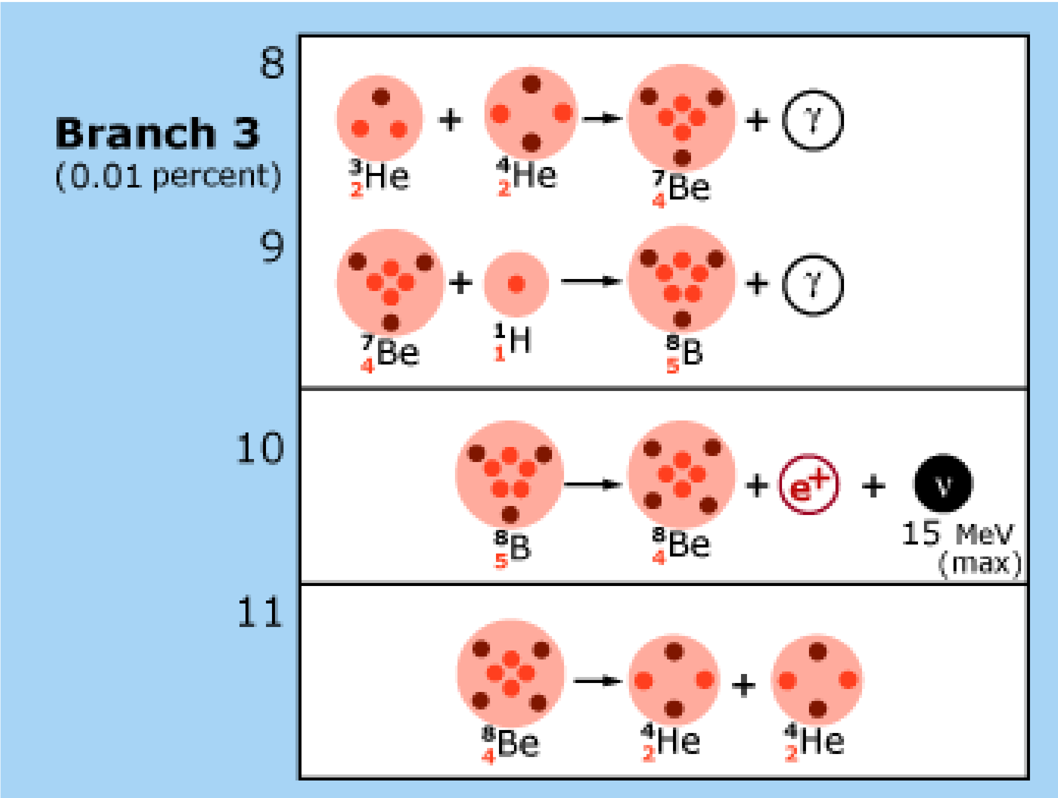
Neutrina słoneczne

Produkcja neutrin

Źródłem wysokoenergetycznych neutrin jest przemiana ^{8}B

$$^{8}_{5}B \rightarrow {}^{8}_{4}Be + e^{+} + \nu_e$$

w której energia emitowanych neutrin dochodzi do 15 MeV

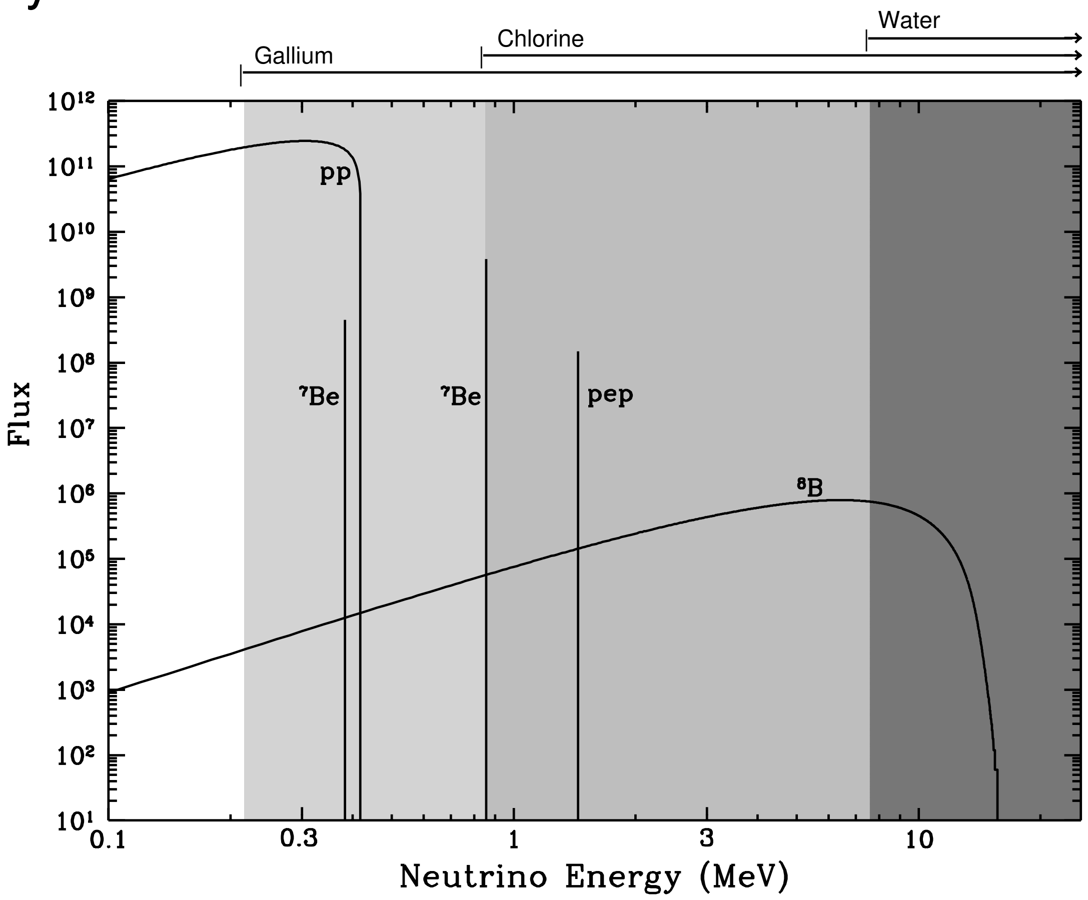


Tylko te neutrina mogą być mierzone w detektorach cząstek elementarnych. Np. w Super-Kamiokande mierzymy neutrina o $E_\nu > 7$ MeV...

Neutrina słoneczne

Widmo energii

Neutrin elektronowych produkowanych w reakcjach jądrowych na słońcu



Strumień neutrin o energiach poniżej kilku MeV może być zmierzony metodami radiochemicznymi. Mierzymy produkcję powstających izotopów:

$$\nu_e + Cl \rightarrow Ar + e^-$$

(eksperyment Homestake)

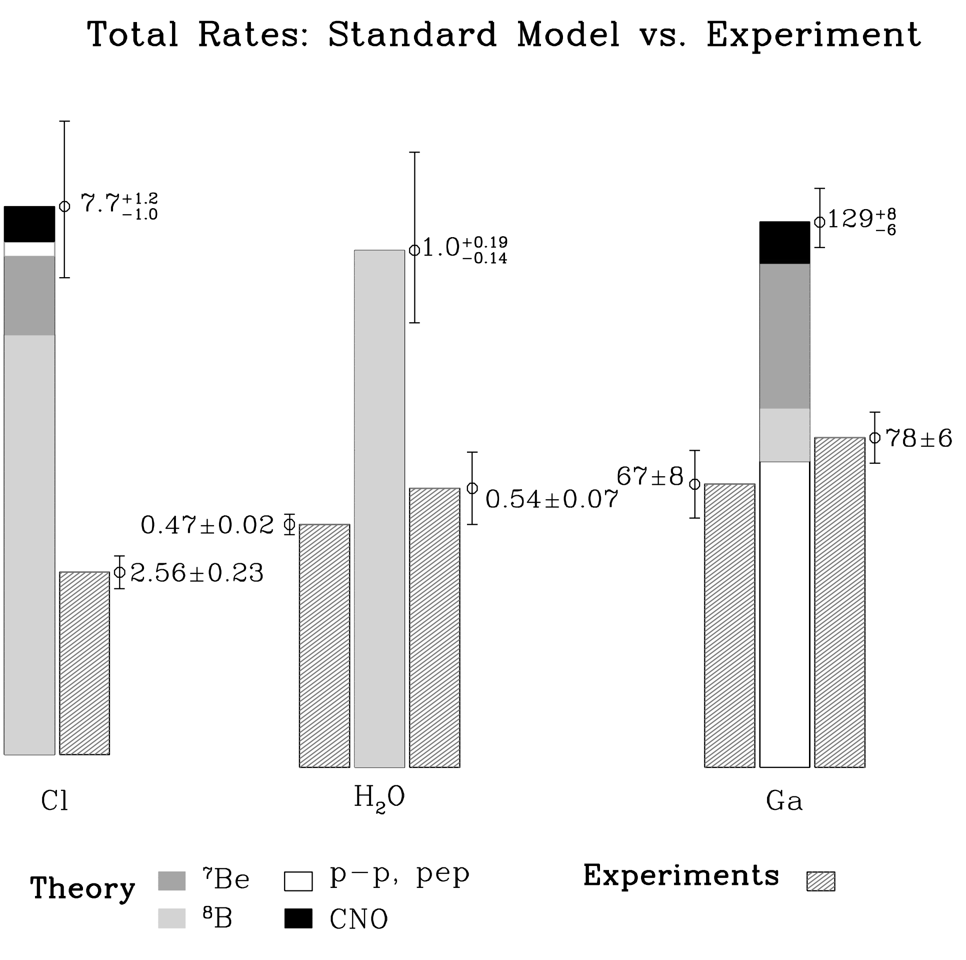
$$\nu_e + Ga \rightarrow Gr + e^-$$

(SAGE, GALLEX, GNO)

Neutrina słoneczne

Deficyt neutrin słonecznych

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



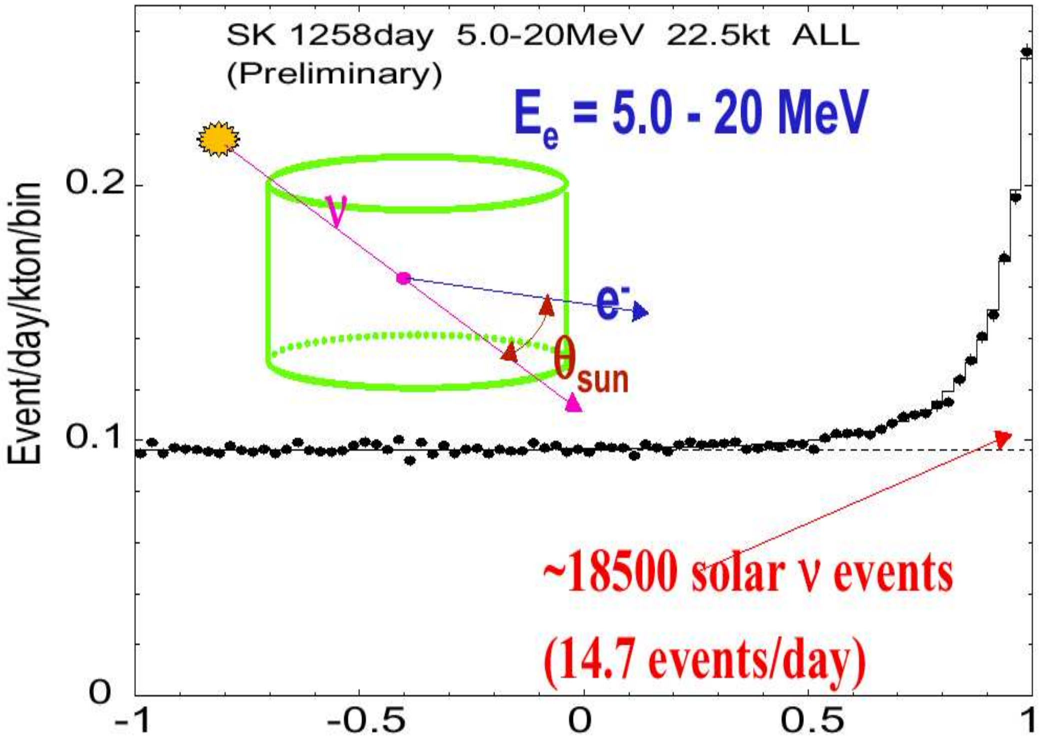
Aby wytłumaczyć wyniki pomiarów trzebaby założyć, że:

- reakcja ${}^{8}_{5}B \rightarrow {}^{8}_{4}Be + e^{+} + \nu_e$ zachodzi 2 $\times$ rzadziej
- reakcja ${}^{7}_{4}Be + e^{-} \rightarrow {}^{7}_{3}Li + \nu_e$ wogóle nie zachodzi !...

Super-Kamiokande

Obserwacja neutrin słonecznych

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



Obserwowane neutrina pochodzą głównie z reakcji typu CC (z wymianą $W^{\pm}$):

$$\nu_e + e^- \rightarrow e^- + \nu_e$$

choć możliwy jest też proces typu NC (wymiana Z°):

$$\nu_X + e^- \rightarrow \nu_X + e^-$$

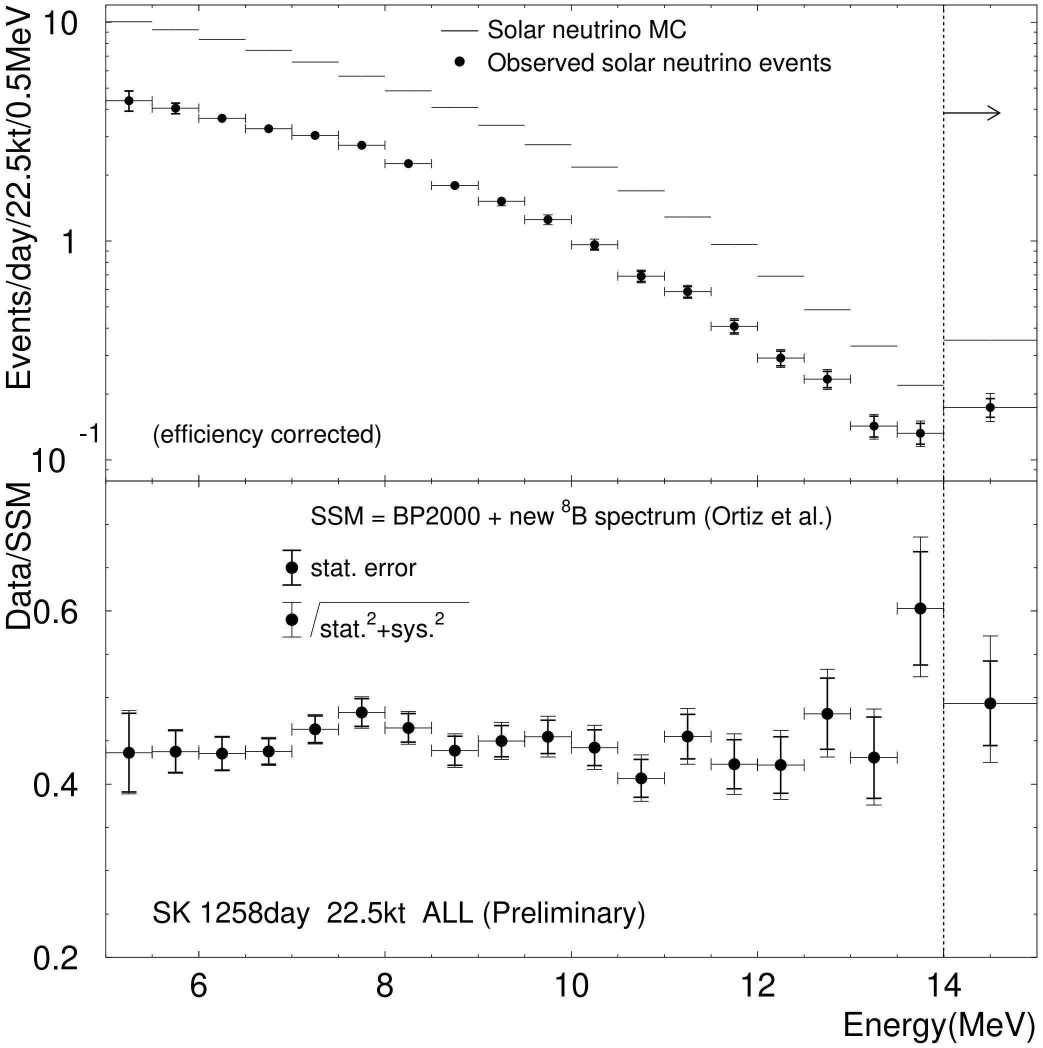
$X = e,\ \mu,\ \tau$ (!)

przekrój $\sim$ 5 razy mniejszy...

Super-Kamiokande

Deficyt neutrin słonecznych

Obserwowany rozkład energii neutrin słonecznych:



Kształt rozkładu zgadza się bardzo dobrze z SSM (Standard Solar Model).

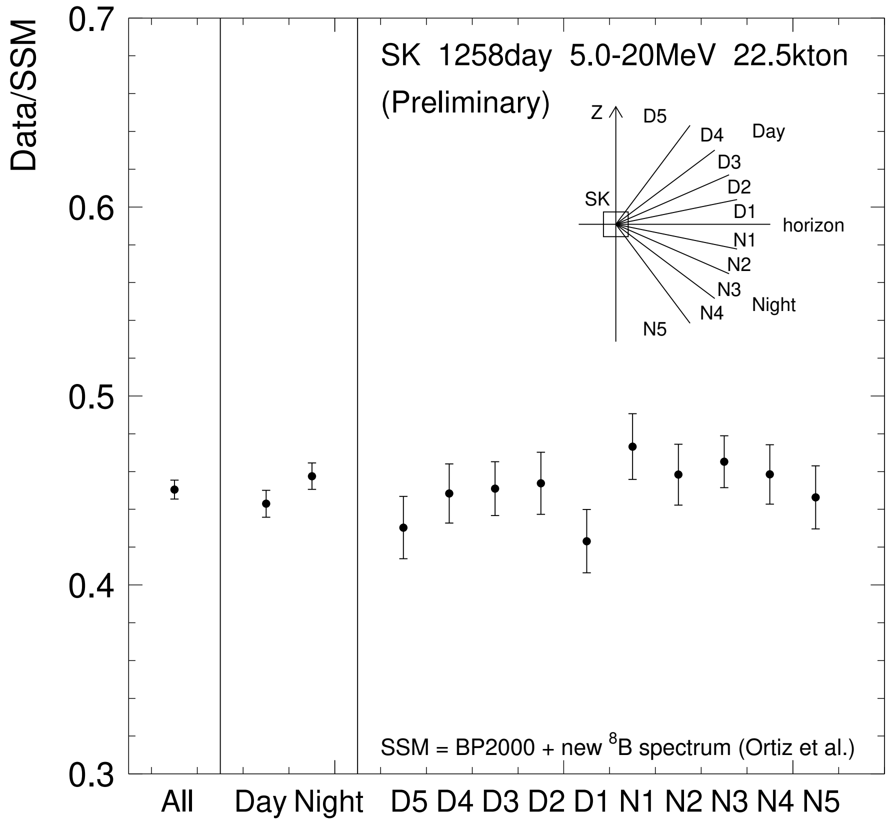
Obserwujemy jednak jedynie ok. 45% oczekiwanych przypadków (neutrin elektronowych tym razem !)

Może to znowu oscylacje !?...

Super-Kamiokande

Efekt dzień–noc

Porównując strumień neutrin słonecznych mierzony w dzień ("od góry") i w nocy ("od dołu"), możemy sprawdzić oscylacje na odległości $\sim$ średnicy Ziemi



Nie obserwujemy znaczących zmian przy przechodzeniu przez Ziemię

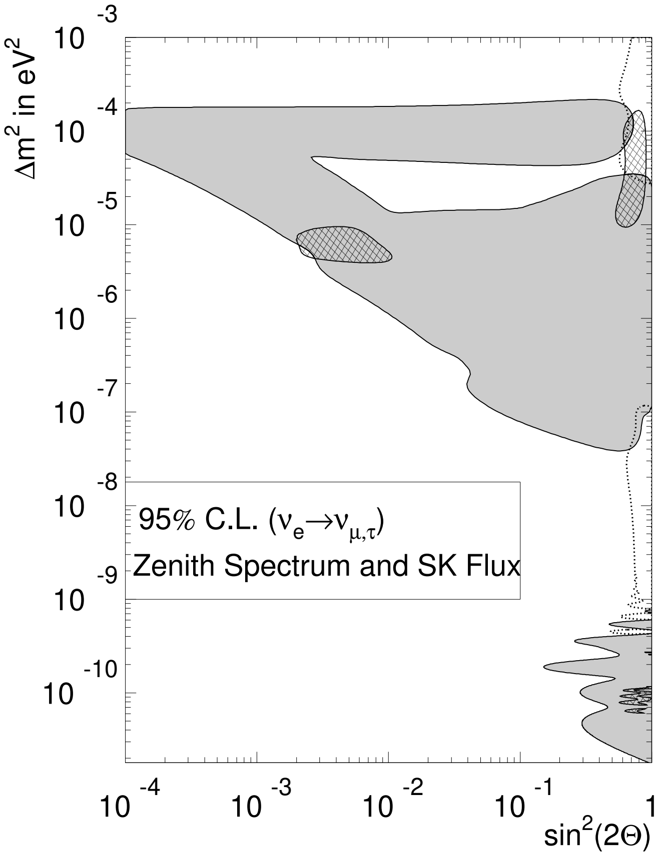
$\Rightarrow$ ewentualne oscylacje ν_e dużo słabsze niż dla ν_μ (oscylacje neutrin atmosferycznych)

Super-Kamiokande

Oscylacje neutrin słonecznych

Ograniczenia na parametry oscylacji $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$

- różne pomiary strumienia neutrin słonecznych
  obszar dozwolony $\Rightarrow$ ciemne kontury
- brak efektu "dzień–noc"
  obszar wykluczony $\Rightarrow$ jasny kontur



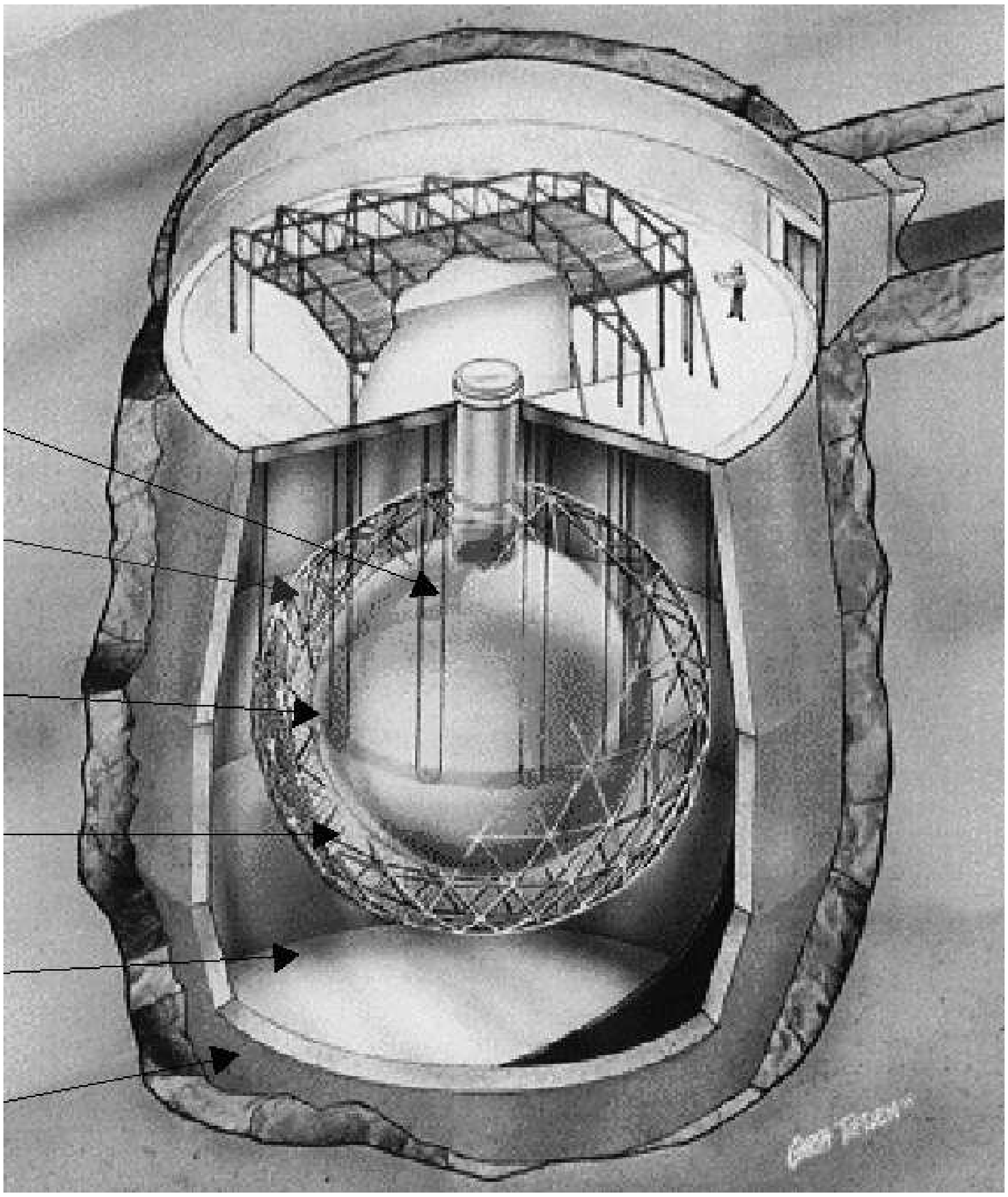
Wszystkie pomiary neutrin słonecznych można wytłumaczyć przyjmując ($X = \mu$ lub τ):

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

$$\Delta m^2_{eX} \sim 0.00005\, eV^2$$

SNO

Eksperyment SNO (Sudbury Neutrino Observatory)



Ogromny zbiornik wypełniony 7000 t wody (H_20)

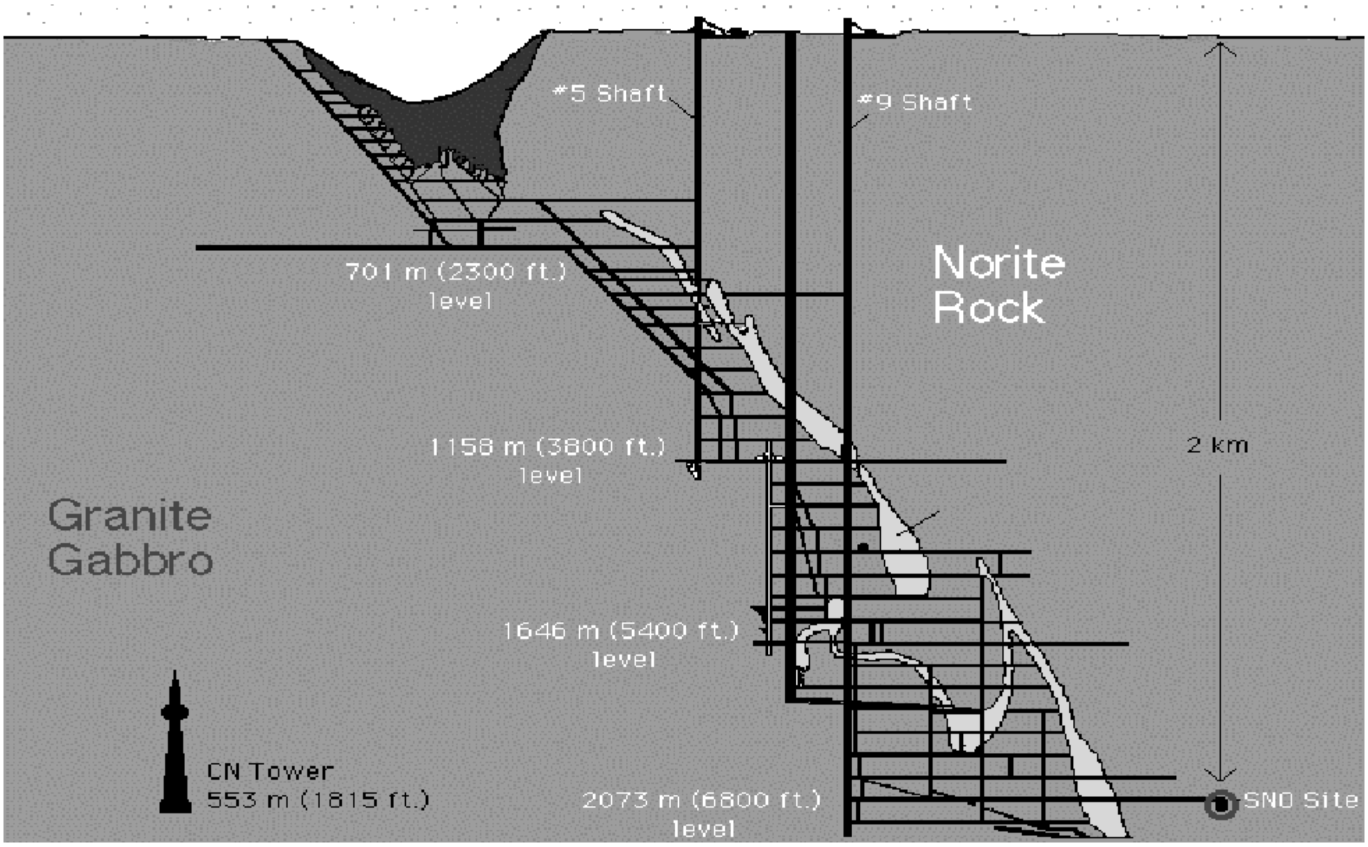
W środku kula wypełniona 1000 t **ciężkiej wody** (D_20)

Promieniowanie Czerenkowa mierzone przez
ok. 9500 fotopowielaczy.

SNO

Eksperyment SNO

Detektor umieszczony jest na głębokości ponad 2000 m



Jak w Super-Kamiokande możemy zmierzyć łączny sygnał:

$$\nu_e + e^- \rightarrow e^- + \nu_e \qquad (CC)$$
$$\nu_X + e^- \rightarrow \nu_X + e^- \qquad (NC)$$

$\Rightarrow$ informacja o wszystkich typach neutrin

Zastosowanie ciężkiej wody umożliwia dodatkowo pomiar:

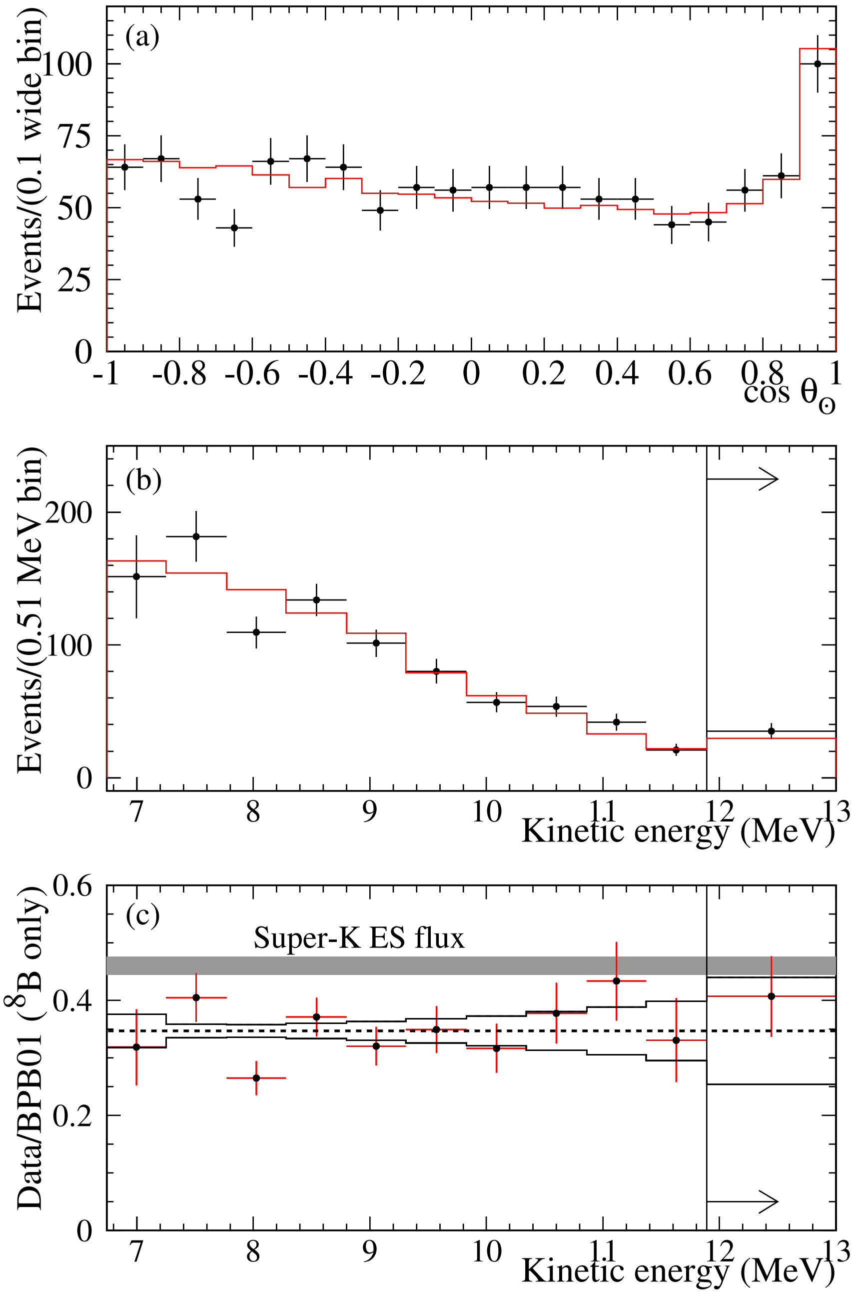
$$\nu_e + D \rightarrow p + p + e^- \qquad (CC)$$

$\Rightarrow$ informacja o neutrinach elektronowych

SNO

Wyniki

Rozkład kierunku rozproszenia względem słońca i mierzonej energii, dla przypadków $\nu_e + D \to p + p + e^-$

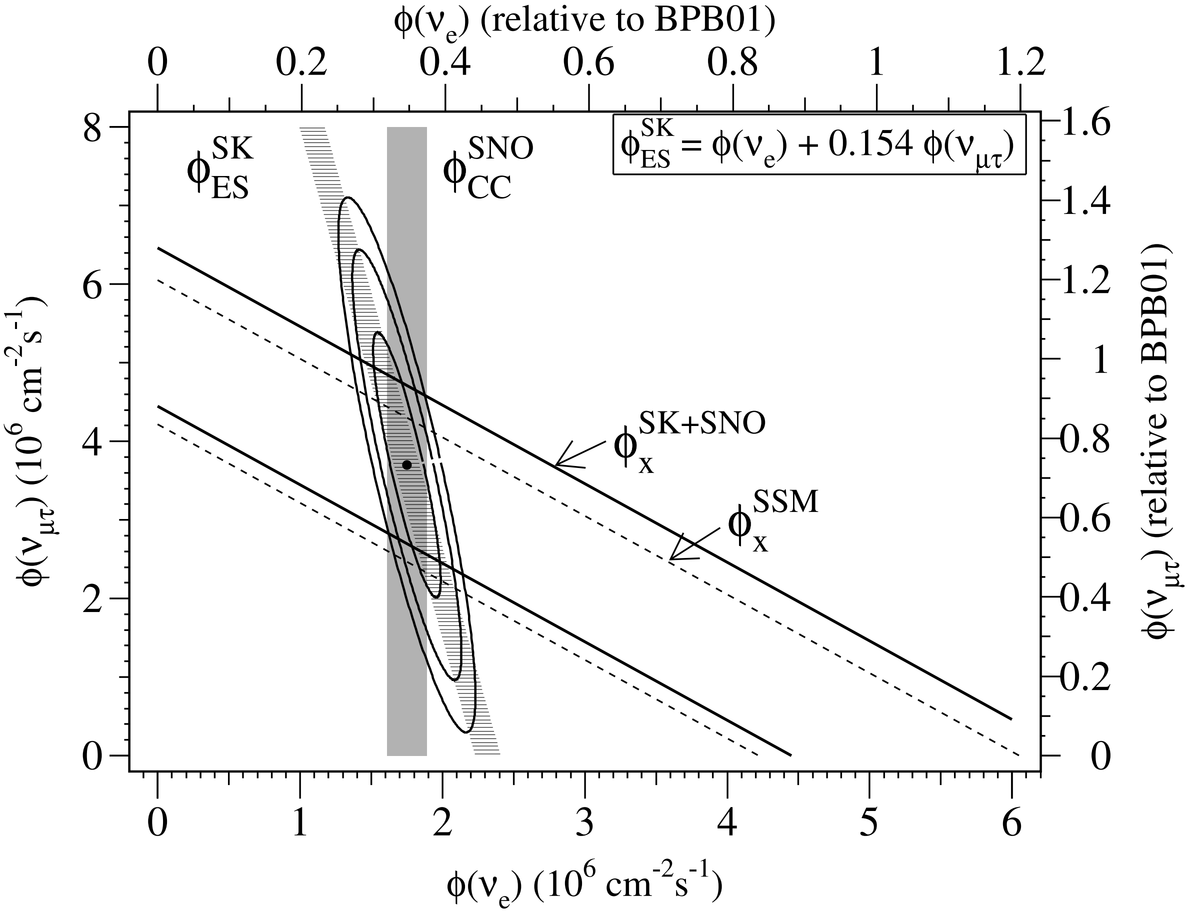


Zmierzony stosunek strumienia neutrin do przewidywań modelu jest wyraźnie niższy niż w pomiarze Super-K.

SNO

Wyniki

Porównując pomiary Superkamiokande i SNO



Uzyskujemy:

$$\begin{aligned}
\Phi(\nu_e) &= 1.75 \pm 0.13 \times 10^6\ cm^{-2}s^{-1} \\
\Phi(\nu_\mu + \nu_\tau) &= 3.69 \pm 1.13 \times 10^6\ cm^{-2}s^{-1} \\
\Phi(\nu_e + \nu_\mu + \nu_\tau) &= 5.44 \pm 0.99 \times 10^6\ cm^{-2}s^{-1}
\end{aligned}$$

w porównaniu z przewidywaniami SSM

$$\Phi^{SSM}(\nu_e) = 5.15 \pm 0.95 \times 10^6\ cm^{-2}s^{-1}$$

SNO

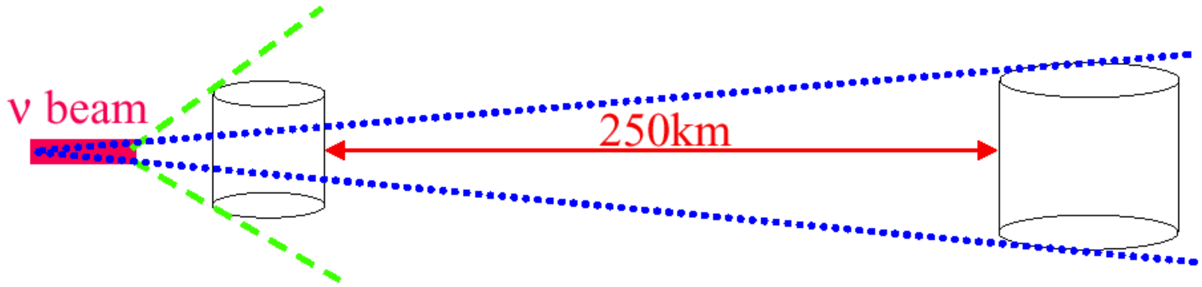
Wyniki SNO potwierdzają, że obserwowany deficyt neutrin słonecznych jest rezultatem "przemiany" ν_e w inne rodzaje neutrin (ν_μ i ν_τ).

Efekty obserwowane w różnych doświadczeniach wskazują na oscylacje neutrin. Są to jednak dowody "pośrednie". Wciąż jest sporo wątpliwości...

Ostateczne rozstrzygnięcie powinny przynieść

Doświadczenia z "długą bazą"

Obserwacja oscylacji w dobrze kontrolowanych warunkach:



Wiązka neutrin kierowana do oddalonego detektora.

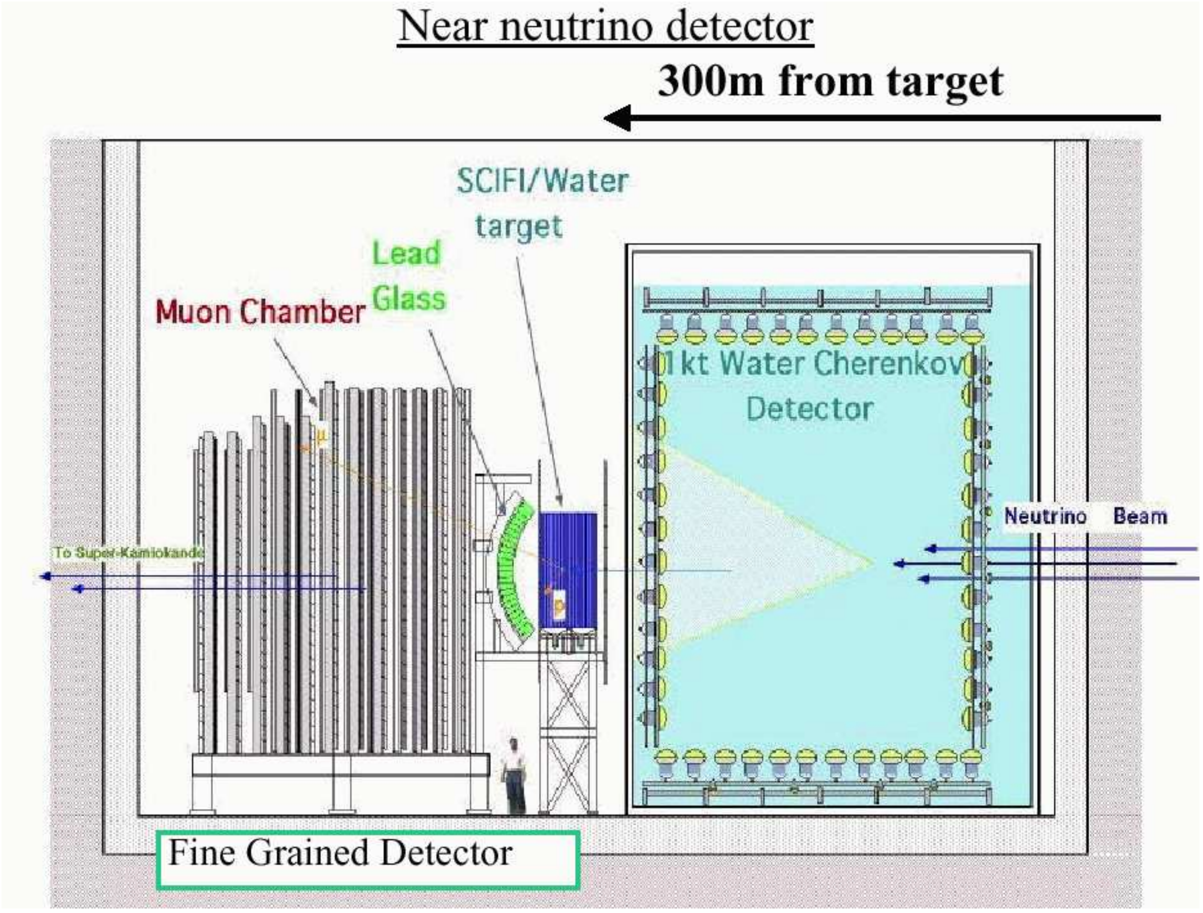
Odpowiednio dobierając odległość i energię wiązki powinniśmy zaobserwować efekt oscylacji.

Eksperyment K2K

Pierwszym eksperymentem z “długą bazą” jest K2K
(KEK to Kamiokande).

Wiązka ν_μ z laboratorium KEK ($\langle E_\nu \rangle \sim 1$ GeV) skierowana została do odległego o 250 km detektora Super-Kamiokande.

Aby dobrze zmierzyć parametry wiązki oraz lepiej zrozumieć działanie detektora SK na początku wiązki ustawiono

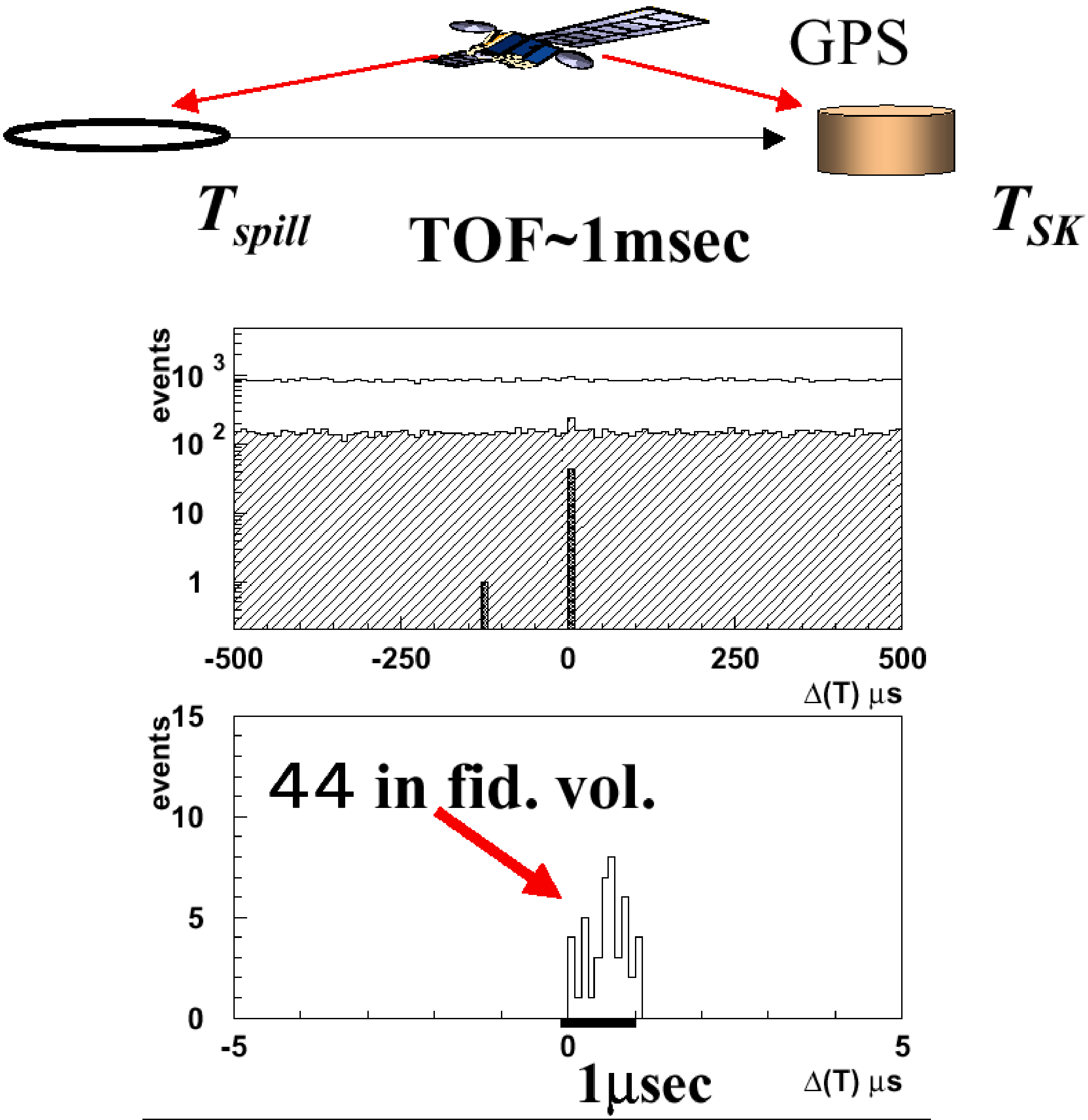


detektor elektroniczny + “miniatura” Super-Kamiokande

K2K

Korelacja czasowa

Przypadki rejestrowane w Super-Kamiokande pochodzące z wiązki KEK rozpoznawane są na podstawie kierunku i korelacji czasowej z impulsami akceleratora.



Wyraźnie widoczna korelacja czasowa, zaniedbywalne tło.

K2K

Wyniki

Liczby obserwowanych przypadków (i ich klasyfikacja) oraz ich porównanie z przewidywaniami modelu:

			$\Delta m^2 (\times 10^{-3} eV^2)$		
	Obs.	No Ocsi.	3	5	7
FC 22.5kt	44	$63.9^{+6.1}_{-6.6}$	41.5	27.4	23.1
1-ring	26	38.4 ± 5.5	22.3	14.1	13.1
μ-like	24	34.9 ± 5.5	19.3	11.6	10.7
e-like	2	3.5 ± 1.4	2.9	2.5	2.4
multi ring	18	25.5 ± 4.3	19.3	13.3	10.0

Obserwowane liczby przypadków zgodne są z hipotezą oscylacji $\nu_\mu \to \nu_\tau$ i wartością Δm^2 dopasowaną do pomiarów neutrin atmosferycznych.

Prawdopodobieństwo braku oscylacji < 3 %

Pomiar przerwany przez “awarię” Super-Kamiokande...

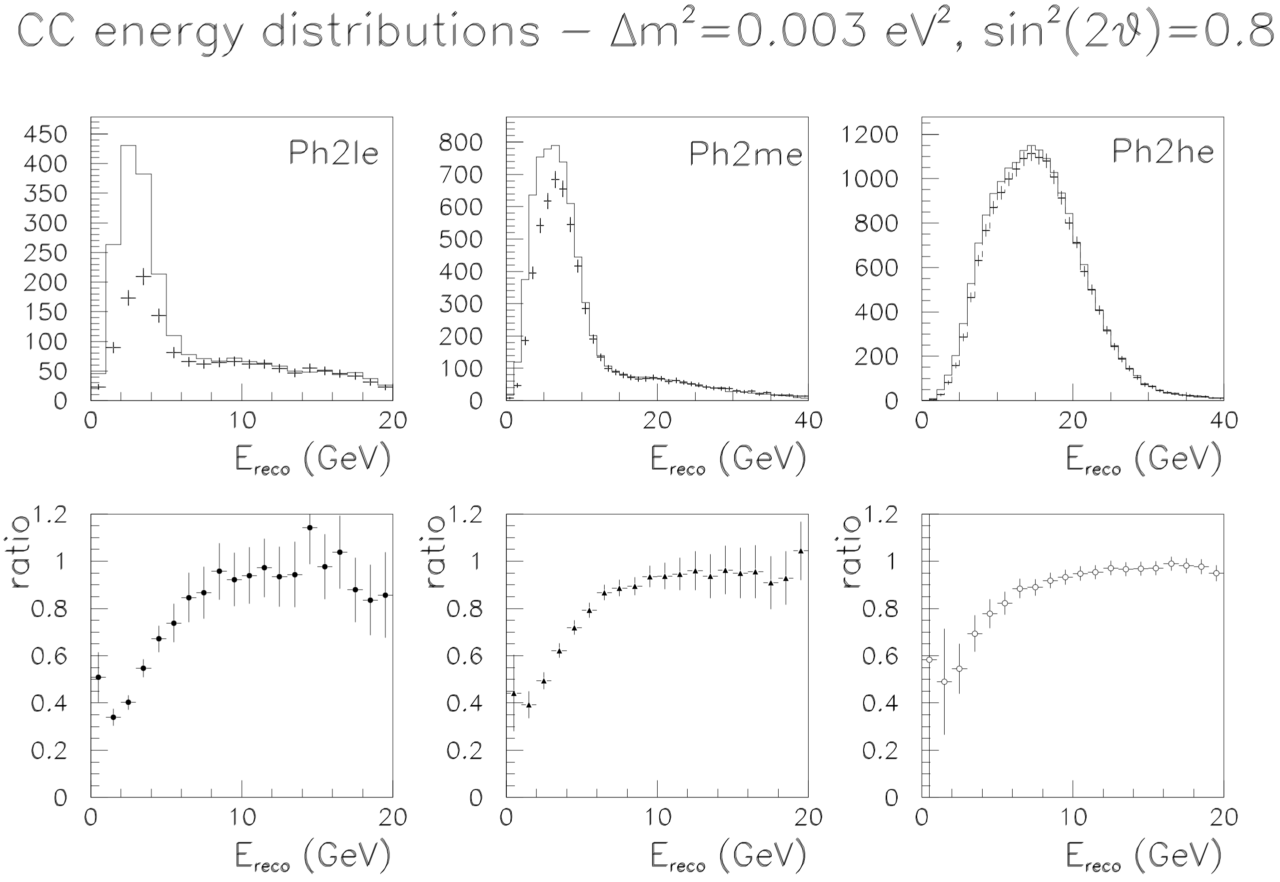
Nowe eksperymenty

Eksperyment MINOS

W 2005 roku wiązka ν_μ z Fermilab, o energii od 1 do 20 GeV, zostanie skierowana do odległego o 735 km detektora MINOS (kalorymetr 5.4 t) w kopalni Soudan w Minnesocie.

Po raz pierwszy będzie można zaobserwować właściwe oscylacje, tzn. “znikanie” i “pojawianie się” ν_μ.

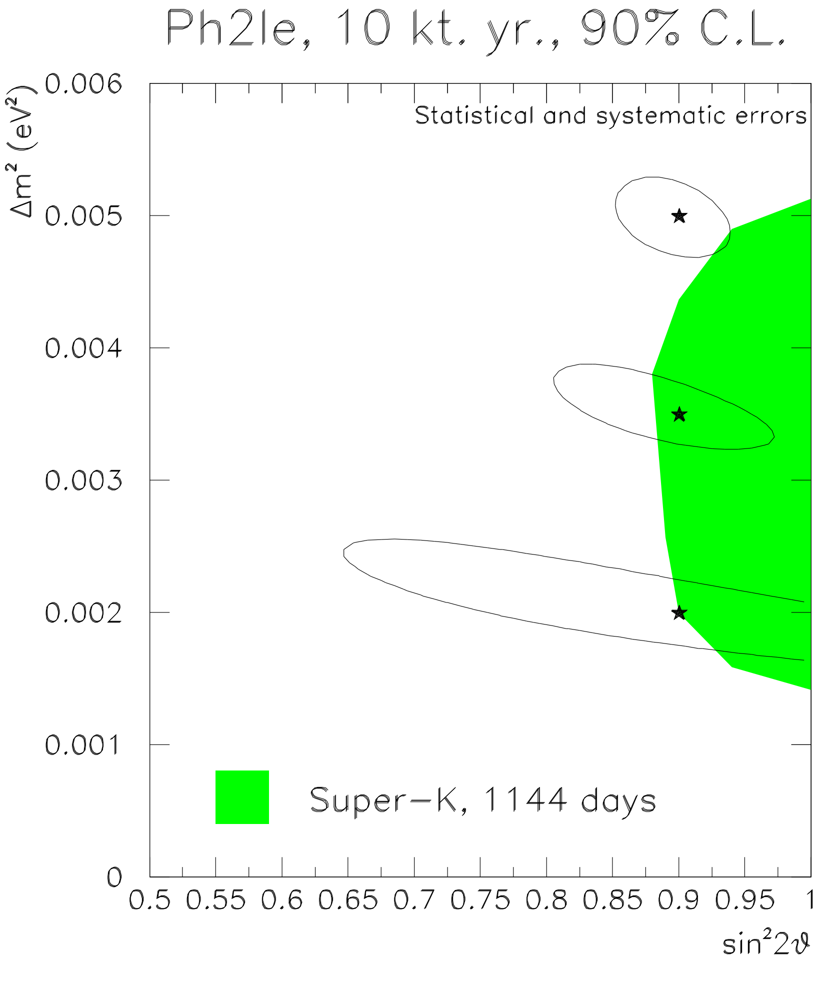
Wynik symulacji:
liczba mierzonych i oczekiwanych przypadków w funkcji rekonstruowanej energii, dla różnych profili wiązki.



Nowe eksperymenty

MINOS

Oczekiwana dokładność pomiaru parametrów oscylacji w eksperymencie MINOS, w porównaniu z obecnymi wynikami Super-Kamiokande



Dokładność pomiaru Δm^2 będzie można zwiększyć prawie 10 razy...

Nowe eksperymenty

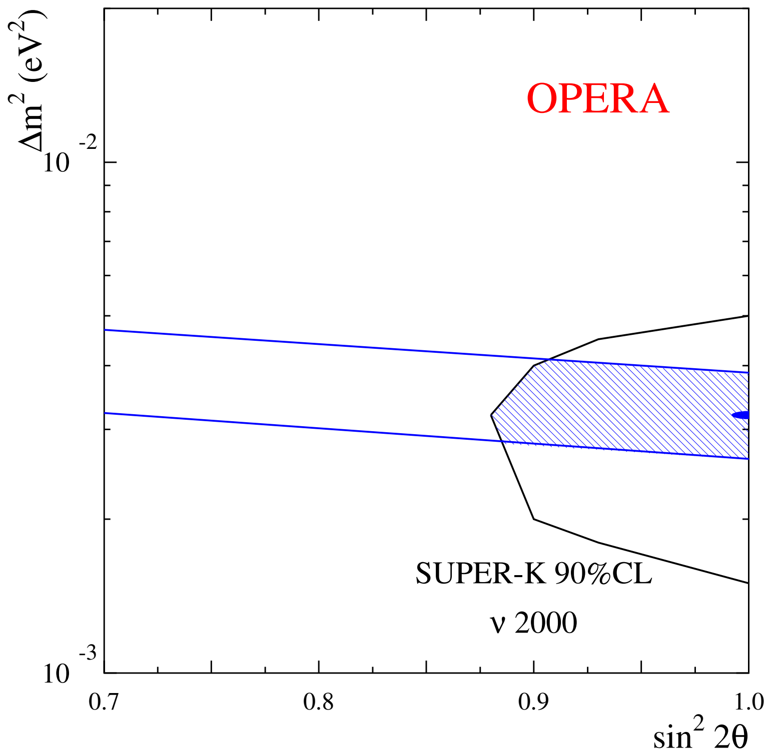
Eksperyment Opera

Wiązka ν_μ z CERN do Gran Sasso (również 735 km).

Wyższe energie wiązki, aby umożliwić detekcję ν_τ (obserwację produkcji τ) i potwierdzenie hipotezy o oscylacjach $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$

Detekcja τ: połączenie detektorów śladowych z odczytem elektronicznym i emulsji.

Przewidywana precyzja pomiaru Δm^2:



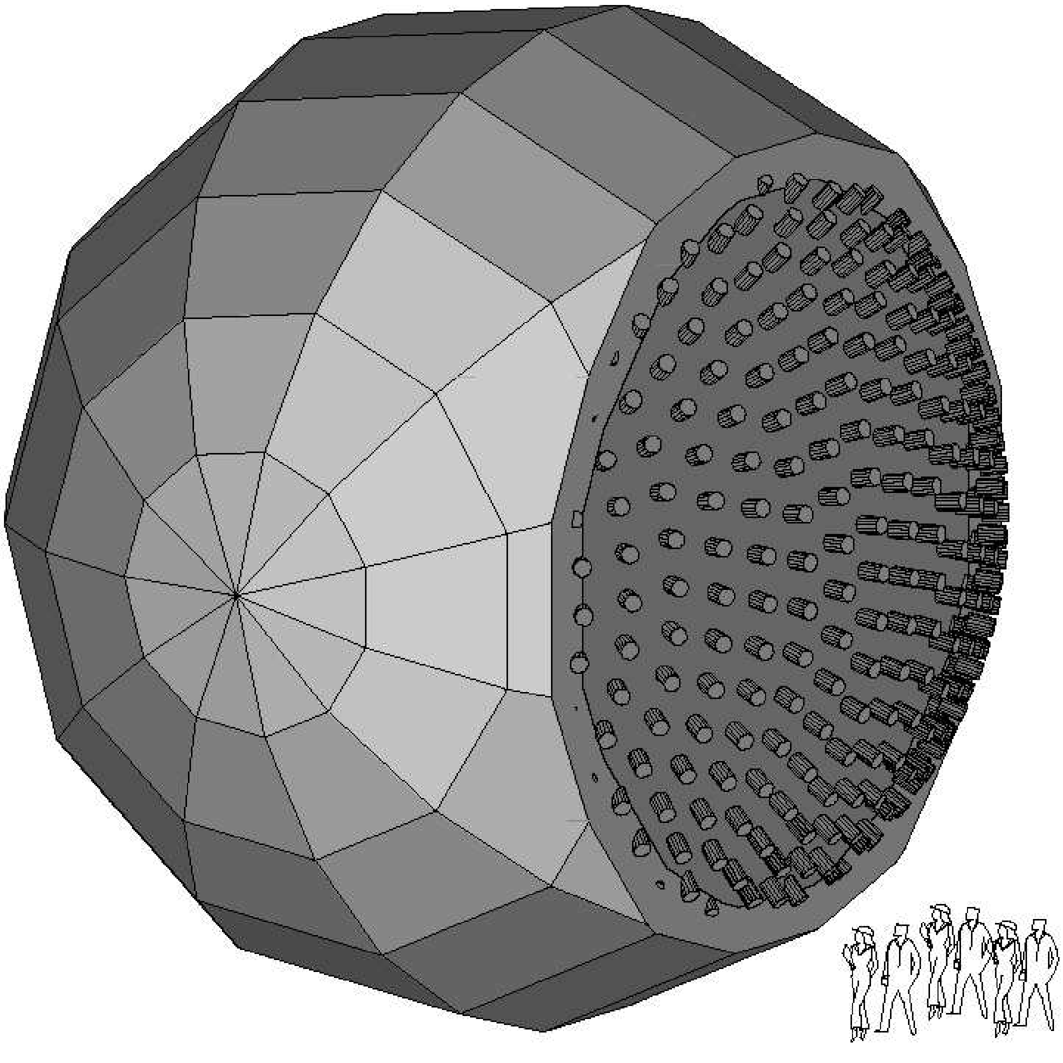
Początek zbierania danych ~2005

Nowe eksperymenty

Mini BooNe

Wyniki LSND, wskazujące na oscylacje $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$ na małych odległościach wciąż czekają na potwierdzenie.

Mini BooNe: 900 ton oleju mineralnego + fotopowielacze



Wiązka neutrinowa w Fermilab, $\langle E_\nu \rangle \sim 1$ GeV.

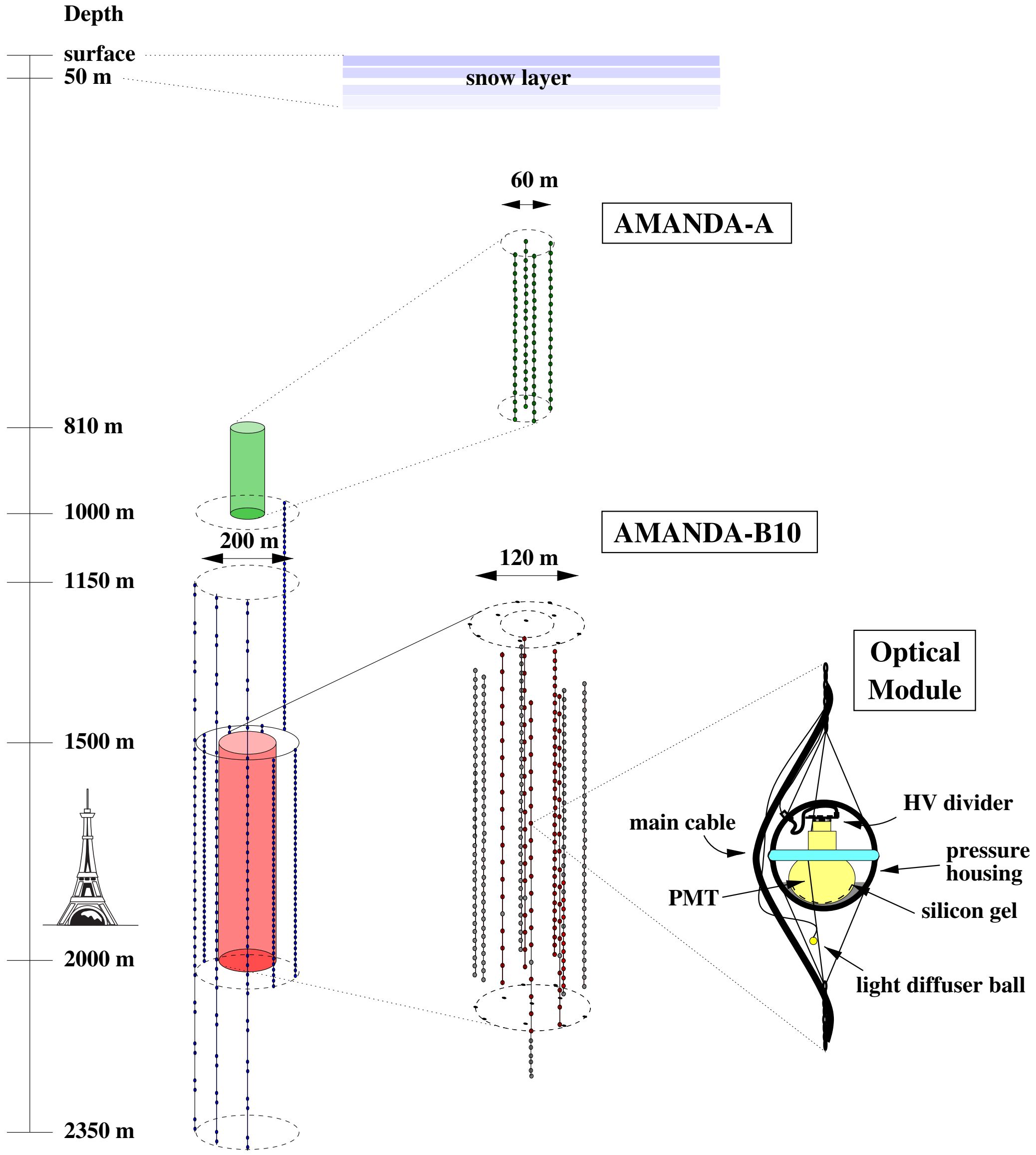
Oczekiwany sygnał $\sim$1000 przypadków (LSND: 88$\pm$23).

Początek zbierania danych: 2002

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



AMANDA as of 2000
Eiffel Tower as comparison
(true scaling)

zoomed in on
AMANDA-A (top)
AMANDA-B10 (bottom)

zoomed in on one
optical module (OM)

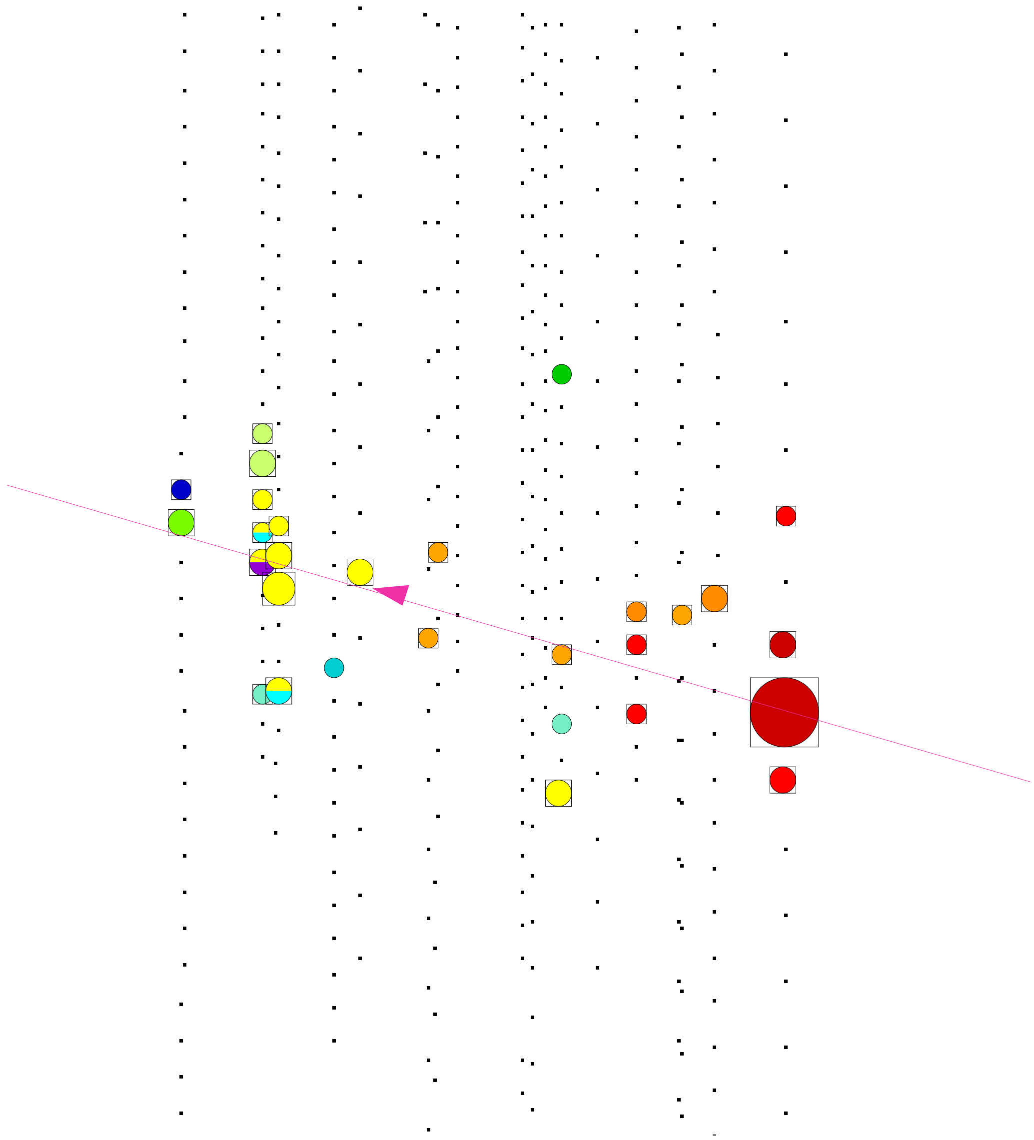
Nowe eksperymenty

Amanda

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

Rejestracja mionów o energiach powyżej 50 GeV.

Przypadek mionowy pochodzący z oddziaływania wysokoenergetycznego neutrina (mion leci od dołu):



Oscylacje neutrin

Podsumowanie

Obecne dane doświadczalne wskazują na oscylacje w trzech “sektorach”:

- neutrina atmosferyczne
  $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$: $\Delta m^2_{\mu\tau} \sim 0.0025\ eV^2$
- neutrina słoneczne
  $\nu_e \leftrightarrow \nu_\tau$ (?): $\Delta m^2_{e\tau} < 0.0001\ eV^2$
- neutrina reaktorowe
  $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$: $\Delta m^2_{e\mu} > 0.025\ eV^2$

Jeśli mamy tylko 3 neutrina, 3 masy,
to tylko 2 różnice kwadratów mas są niezależne

$$\Delta m^2_{ij} = \left| m^2_i - m^2_j \right|$$

Oczekiwalibyśmy więc:

$$\Delta m^2_{e\mu} = \Delta m^2_{e\tau} + \Delta m^2_{\mu\tau}$$

co jednak nie jest zgodne z wynikami doświadczeń.

Czy musimy wprowadzić dodatkowe neutrino ?...

Neutrina wciąż są zagadką, ale najbliższe lata powinny przynieść rozwiązanie...