

Neutrino sterylne nie istnieją (?) - wynik eksperymentu MiniBooNE

Agnieszka Zalewska

Seminarium IFJ PAN, 24.05.2007

Oscylacje neutrin - przegląd wyników pomiarów

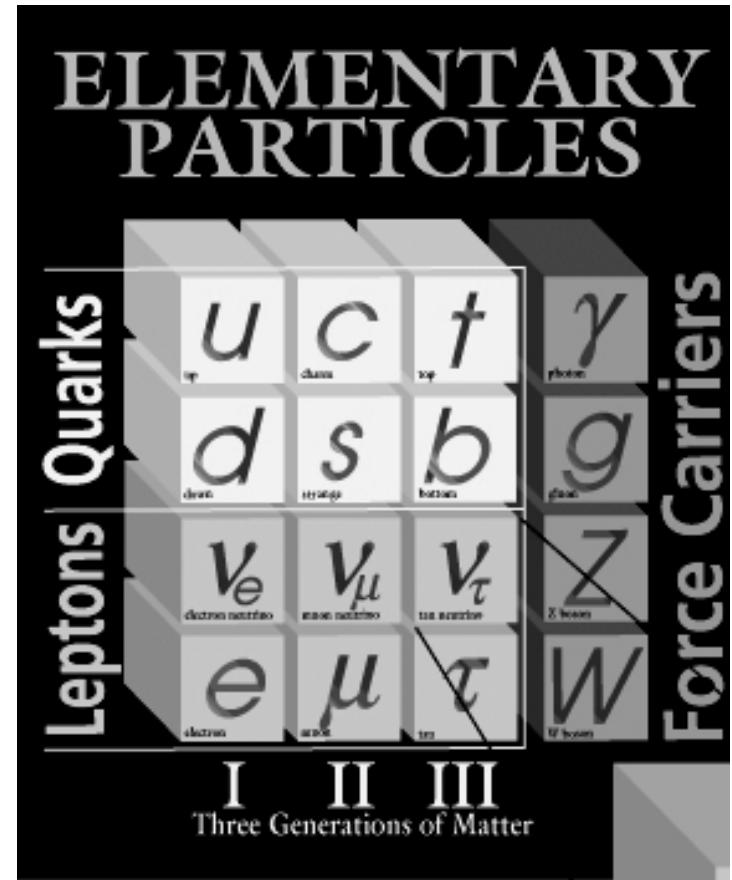
Efekt LSND i neutrin (neutrino) sterylne

Eksperyment MiniBooNE - pierwsze wyniki pomiarów
oscylacji neutrin

Czym są neutrina?

W Modelu Standardowym to elementarne cząstki materii

- są neutralnymi leptonami, które oddziałują wyłącznie słabo
 - np. średnia droga na oddziaływanie neutrin z rozpadu β neutronu w wodzie jest rzędu kilku tysięcy lat świetlnych
 - istnieją trzy rodzaje („zapachy”) lekkich neutrin
- wynik bardzo dokładnych pomiarów w eksperymentach przy zderzaczu LEP



Oscylacje neutrin

Przy założeniu dwu stanów zapachowych neutrin α i β oraz dwu stanów masowych 1 i 2, prawdopodobieństwo przejścia α w β w próżni:

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \Delta m^2 \frac{L}{E} \right)$$

gdzie $\Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$ wyrażone jest w $[\text{eV}^{-2}]$, L w $[\text{km}]$, a E w $[\text{GeV}]$

Δm^2 i θ (kąt mieszania stanów 1 i 2) to parametry teoretyczne, L (długość bazy pomiarowej) i E (energia neutrin) są dobierane eksperymentalnie

Wpływ materii: wzory na prawdopodobieństwa takie same jak dla oscylacji w próżni, ale efektywne masy i efektywne kąty mieszania - na razie ważny tylko w przypadku neutrin słonecznych

Oscylacje neutrin

Przykłady:

$L \sim 1 \text{ km}, E_\nu \sim 1 \text{ GeV} \Rightarrow \Delta m^2 \sim eV^2$ (eksp. NOMAD i CHORUS)

$L \sim 10^4 \text{ km}, E_\nu \sim 100 \text{ MeV} \Rightarrow \Delta m^2 \sim 10^{-5} eV^2$ (ν_{atm} niskiej en. i średnica Ziemi)

$L \sim 10^3 \text{ km}, E_\nu \sim 1 \text{ GeV} \Rightarrow \Delta m^2 \sim 10^{-3} eV^2$ (ν_{accel} i baza L rzędu kilkuset km)

$L \sim 10^8 \text{ km}, E_\nu \sim 10 \text{ MeV} \Rightarrow \Delta m^2 \sim 10^{-10} eV^2$ (ν_{ston} i odległość Słońce-Ziemia)

Oscylacje neutrin słonecznych i atmosferycznych są całkiem nieźle opisywane przez ten prosty model z udziałem dwu stanów zapachowych i dwu stanów masowych (z uwzględnieniem efektów masowych w przypadku neutrin słonecznych)

Aspekty eksperymentalne

Eksperymenty poszukujące sygnału β w wiązce α :

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) \geq 0$$

Eksperymenty mierzące osłabienie wiązki α :

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha) \leq 1$$

Liczba obserwowanych przypadków N_{obs} oddziaływań neutrin jest proporcjonalna do fizycznego przekroju czynnego na oddziaływanie σ [cm^2], wielkości strumienia neutrin Φ [cm^{-2}] oraz liczby atomów tarczy N na ich drodze:

$$N_{\text{obs}} \approx \sigma * \Phi * N \quad (\sigma < 10^{-40} \text{ cm}^{-2} \text{ dla energii rzędu MeV})$$

→ **Potrzebne jak najsilniejsze źródło neutrin i wielki oraz wydajny detektor; optymalizacja eksperymentów neutrinowych polega na łącznym traktowaniu źródła neutrin, bazy pomiarowej L i detektora**

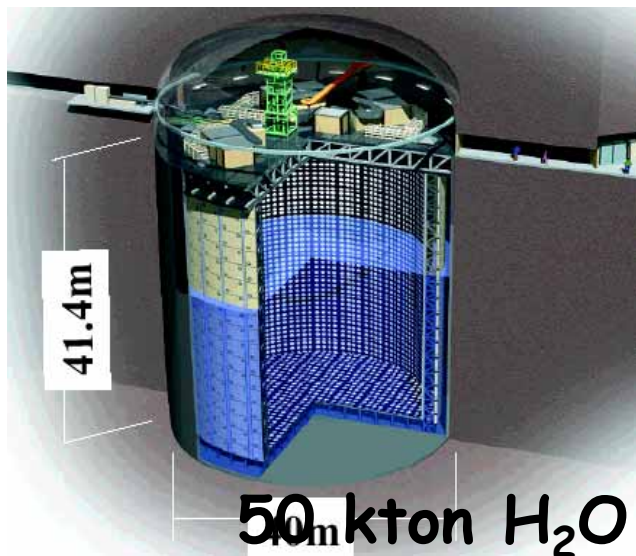
Pomiary oscylacji

1998-2002 wielkie odkrycia

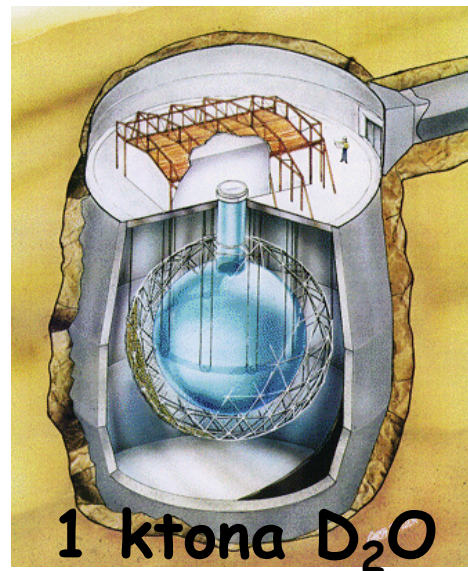
w eksperymentach SuperKamiokande (ν atmosferyczne), K2K (akceleratorowe), SNO (ν słoneczne) i KamLAND (ν reaktorowe)

2003

początek precyzyjnych pomiarów w badaniach oscylacji neutrin, akceleratorowy eksperyment MINOS - start w 2005 roku



SuperKamiokande



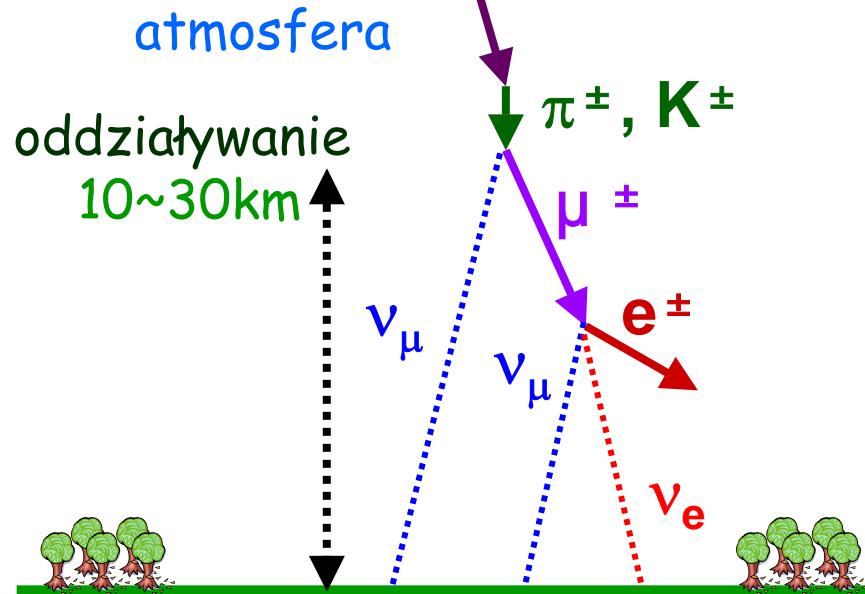
SNO



KamLAND

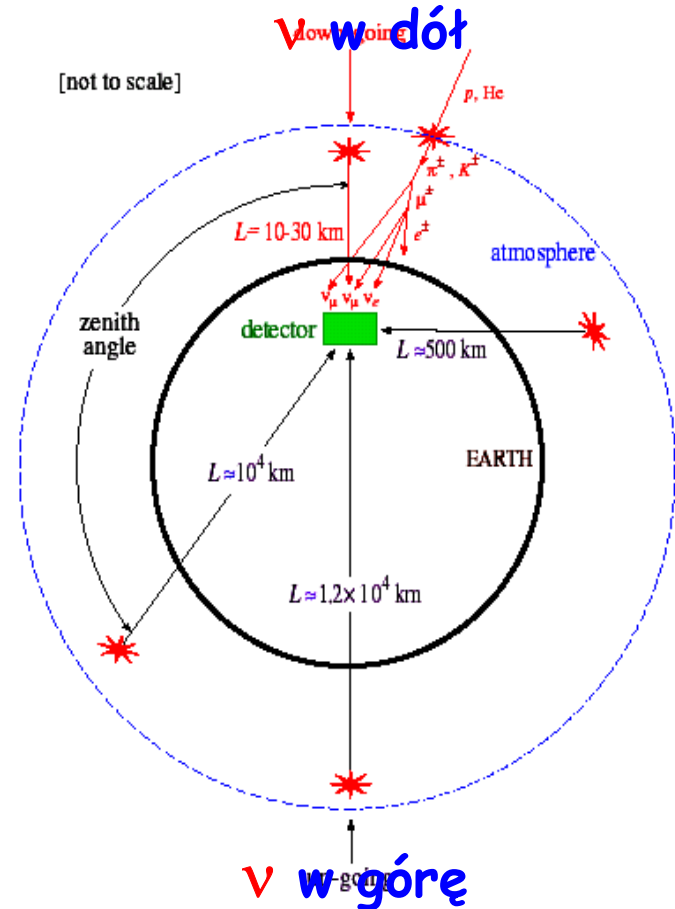
Neutrina atmosferyczne

Pierwotne promienie kosmiczne p, He ...



$$\frac{\phi(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu)}{\phi(\nu_e + \bar{\nu}_e)} \begin{cases} \sim 2 \text{ (dla } E_\nu < 1 \text{ GeV)} \\ > 2 \text{ (dla } E_\nu > 1 \text{ GeV)} \end{cases}$$

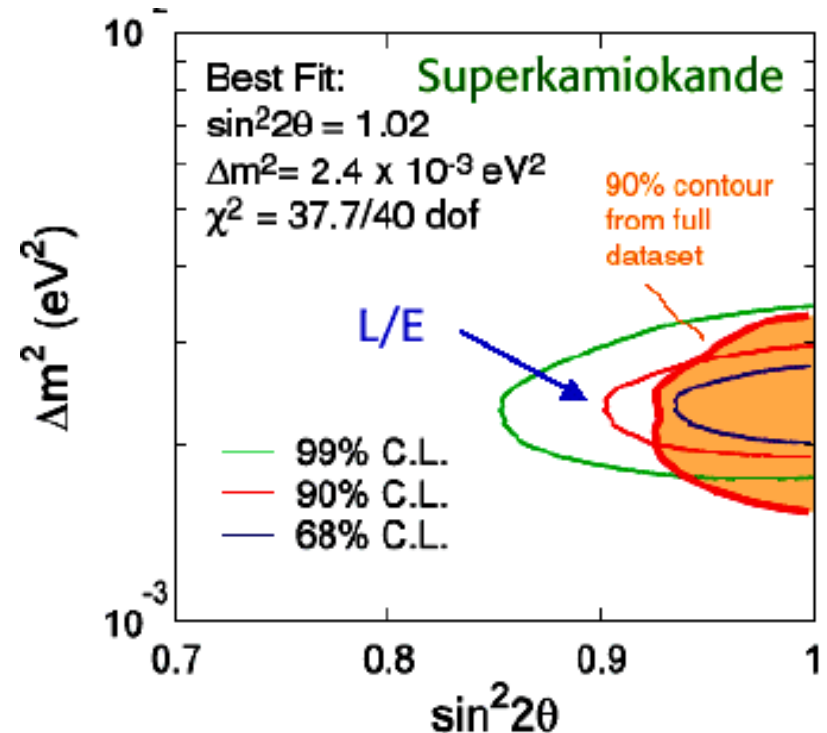
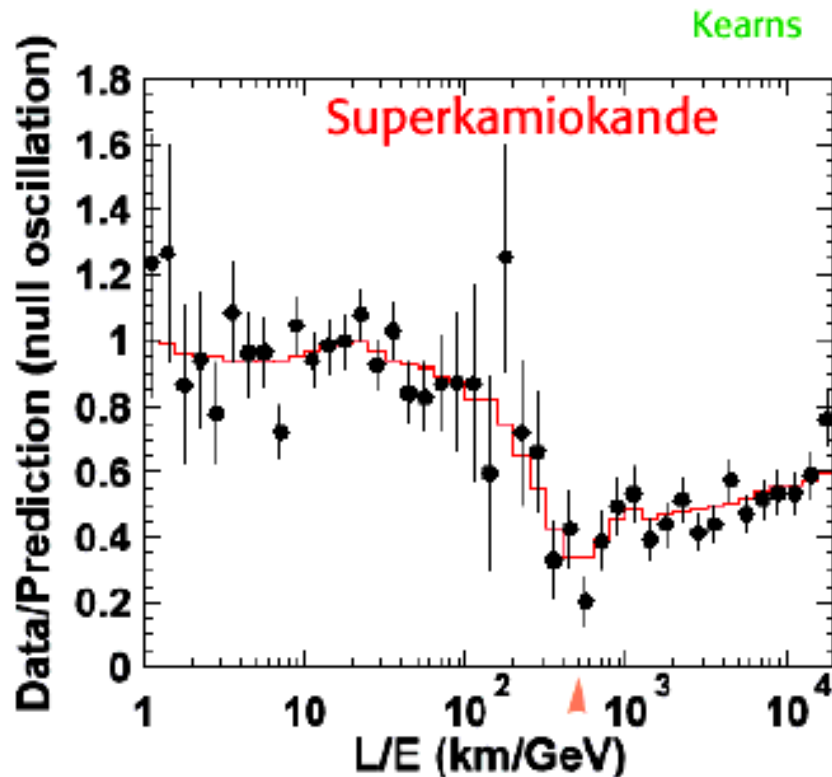
IFJ PAN, 24.05.2007



ν_{atm} - tło dla poszukiwań rozpadu protonu

SuperKamiokande - zależność L/E

Rozkład L/E - bezpośrednio wskazanie na oscylacje
PRL 93, 101801, 2004

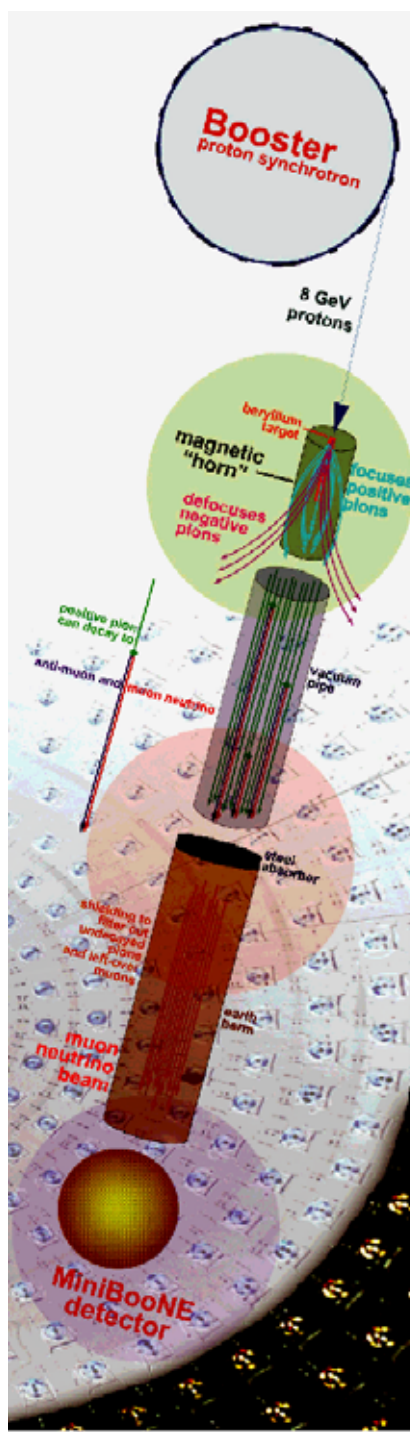


Wszystkie pomiary SuperK wskazują na oscylacje $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$

Neutrino akceleratorowe

W przypadku neutrin akceleratorowych rolę promieni kosmicznych pełnią protony przyspieszone w akceleratorze

Obecnie wykorzystywane są tylko ν_{μ} z rozpadów π i K
→ Lepsza kontrola strumienia i energii neutrin

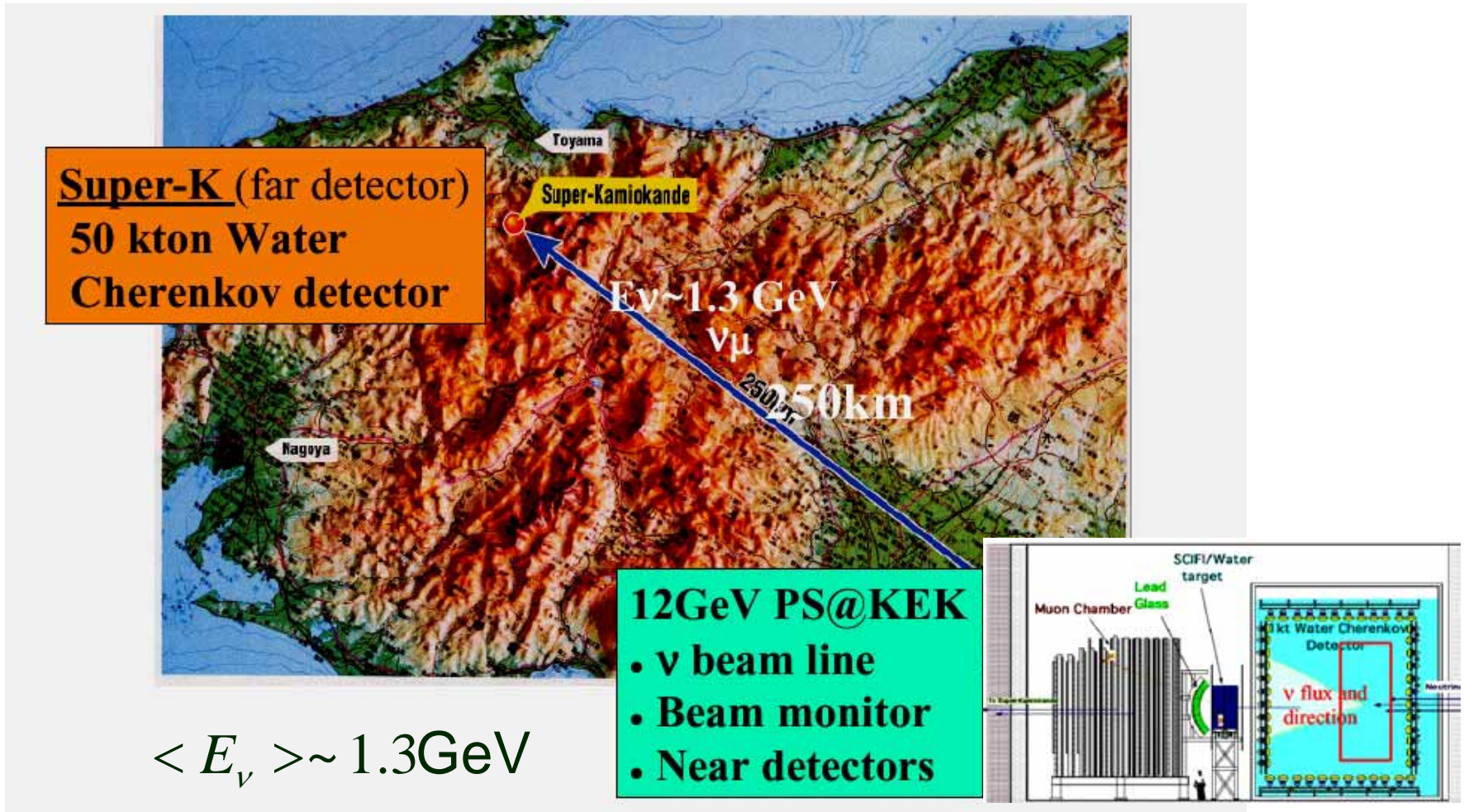


Pierwsza wiązka ν_{μ} – 1961 rok
K2K – pierwszy eksperyment z długą bazą pomiarową

Eksperyment K2K

pierwszy eksperyment akceleratorowy
z długą bazą pomiarową

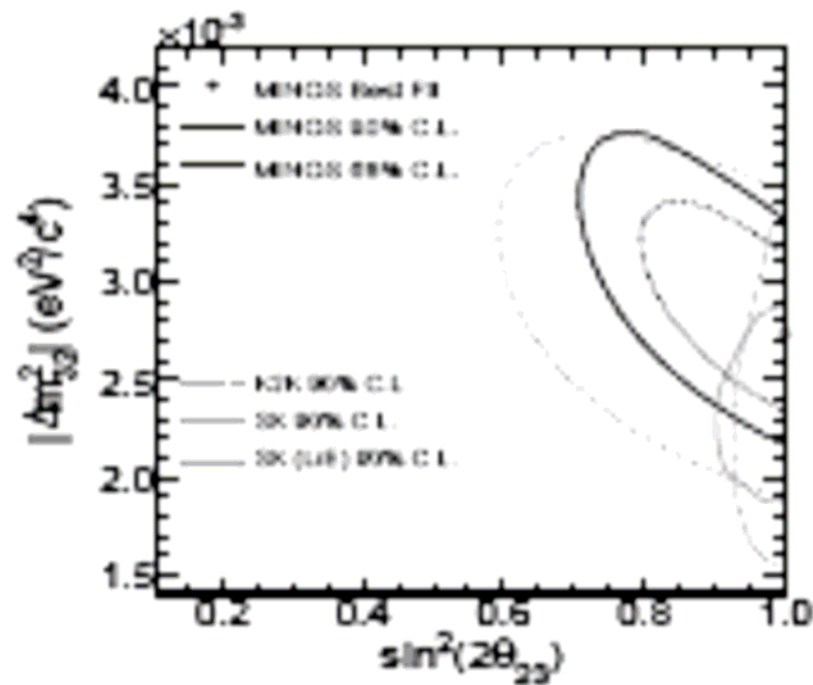
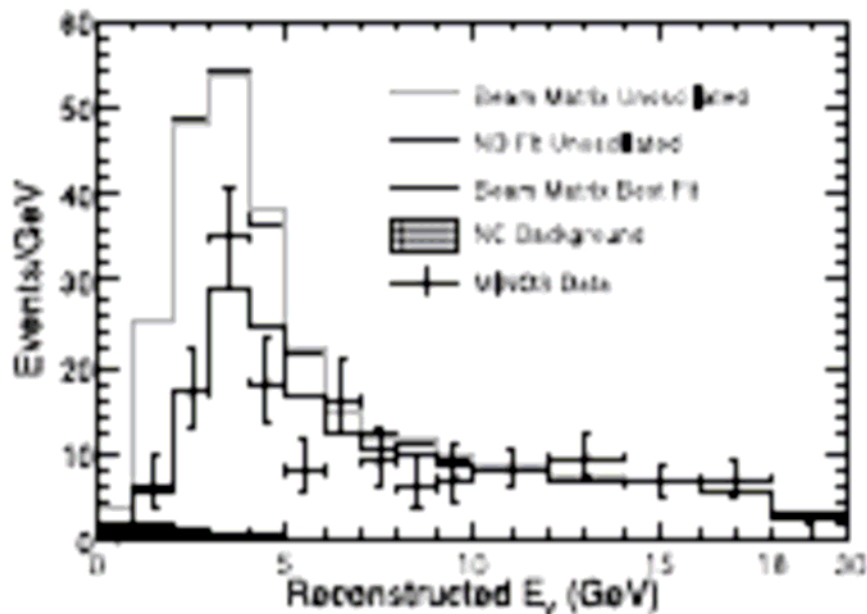
→ Zgodność wyników z SuperKamiokande



Eksperyment MINOS

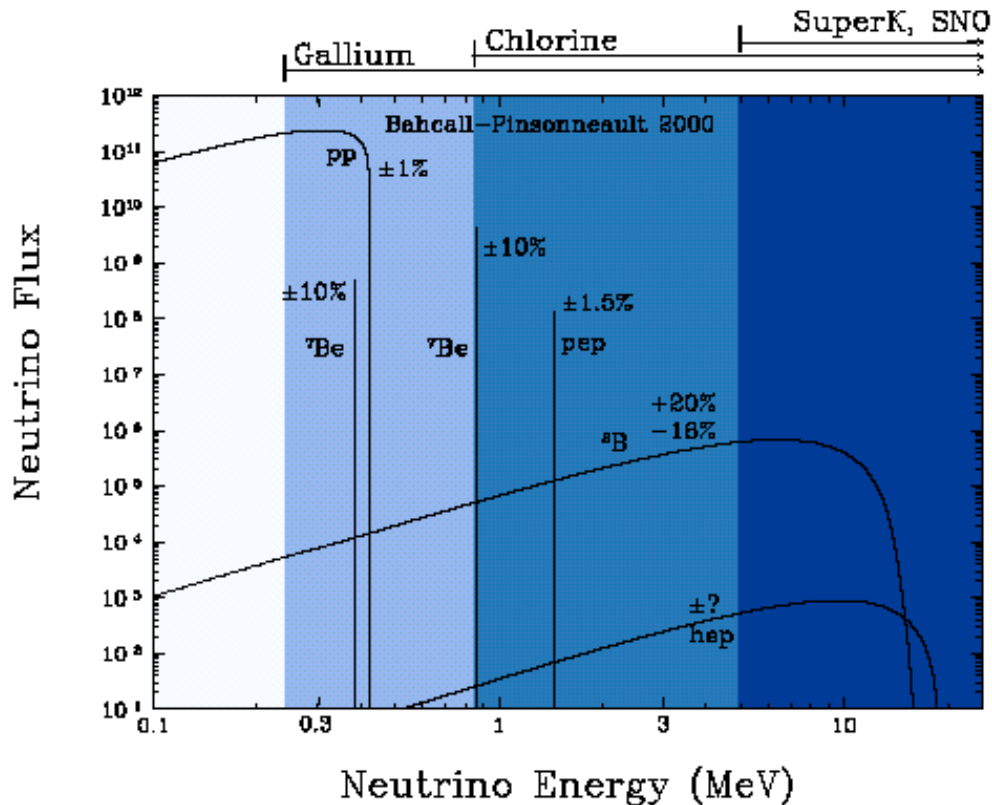
Już jest poprawa w wyznaczeniu Δm_{23}^2

3

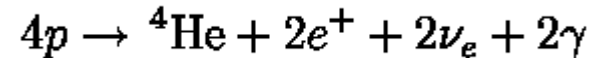


$$|\Delta m_{23}^2| = 2.74^{+0.44}_{-0.26} \times 10^{-3} \text{eV}^2 / c^4$$

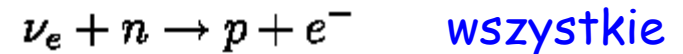
Neutrina słoneczne



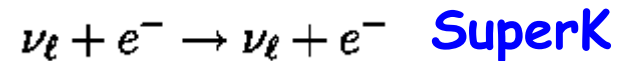
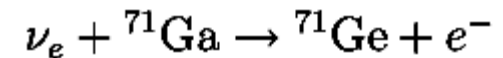
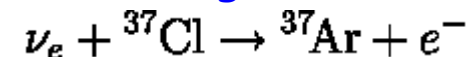
Większość neutrin słonecznych pochodzi z reakcji pp



Eksperymenty (od 1969 r) mierzą reakcje:



W szczególności:



- Słoneczne ν_e powstają w samym środku Słońca
- Przez ponad 30 lat obserwowano na Ziemi niedobór ν_{ston} względem przewidywań modelu Słońca (od 40% do blisko 70%)
- **Całkowite wyjaśnienie niedoboru w eksperymencie SNO**

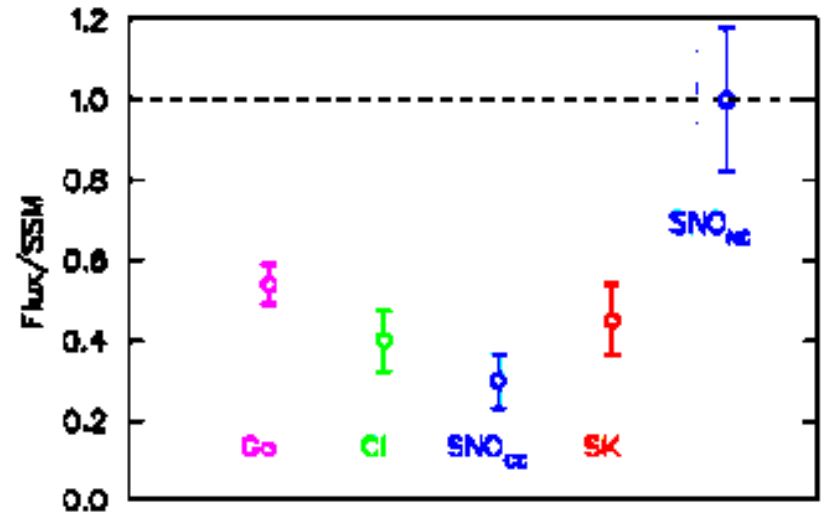
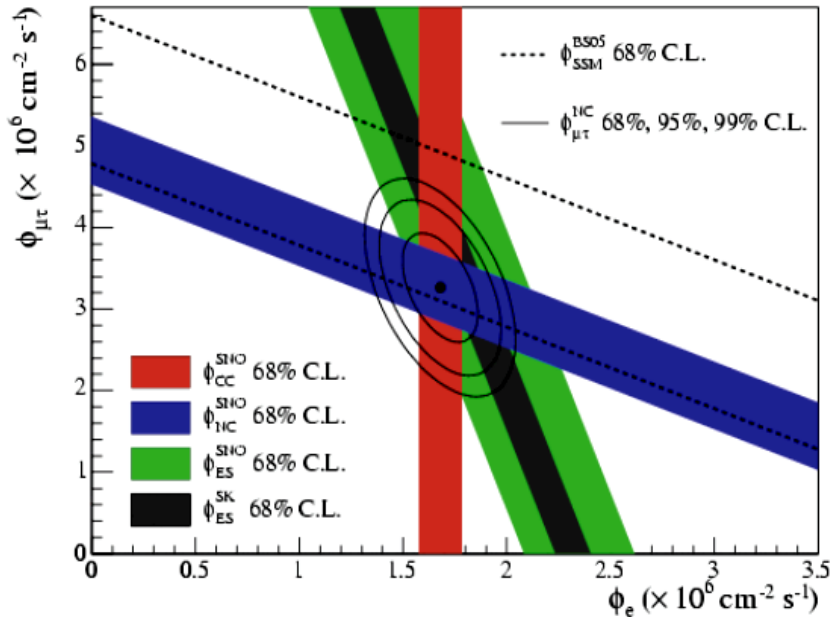
SNO - wyniki

2002

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

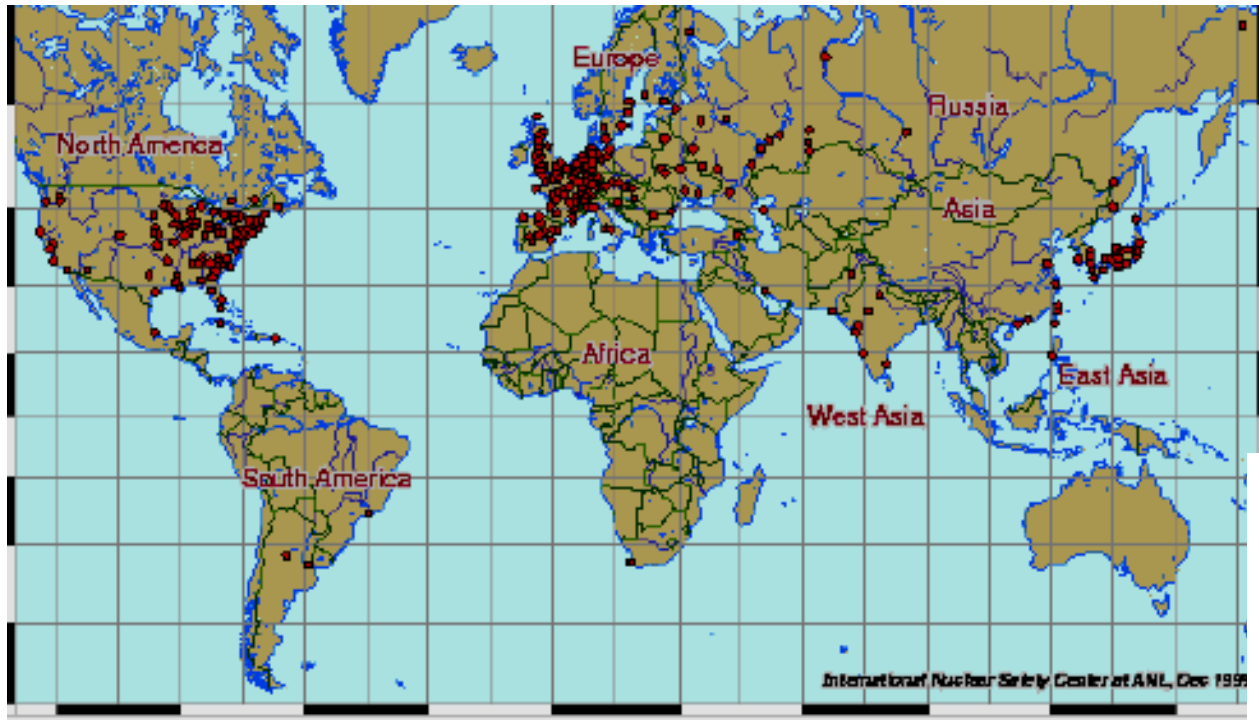
2005

Flavor content of solar flux.



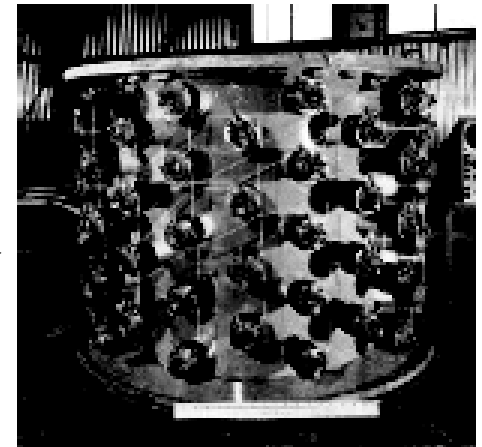
Całkowity strumień neutrin zgodny z przewidywaniami Modelu Słońca, niedobór ν_e spowodowany ich przejściem w $\nu_{\mu,\tau}$ w drodze z wnętrza do powierzchni Słońca

Antyneutrino z reaktorów



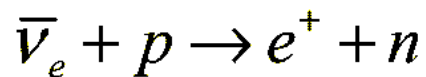
Duża siłownia
jądrowa daje
 6×10^{20} anty- ν /sek
i 3 GW mocy
cieplnej

Detector at the Savannah River
nuclear reactor



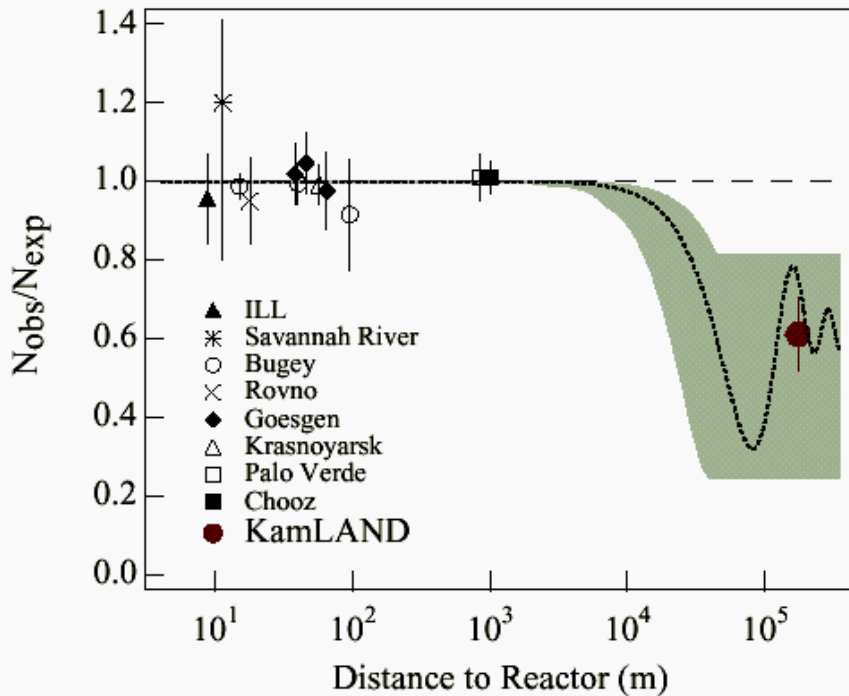
Pierwsza obserwacja oddziaływań
(anty)neutrin w eksperymencie Reinesa-
Cowana (1955) przy siłowni jądrowej

IFJ P



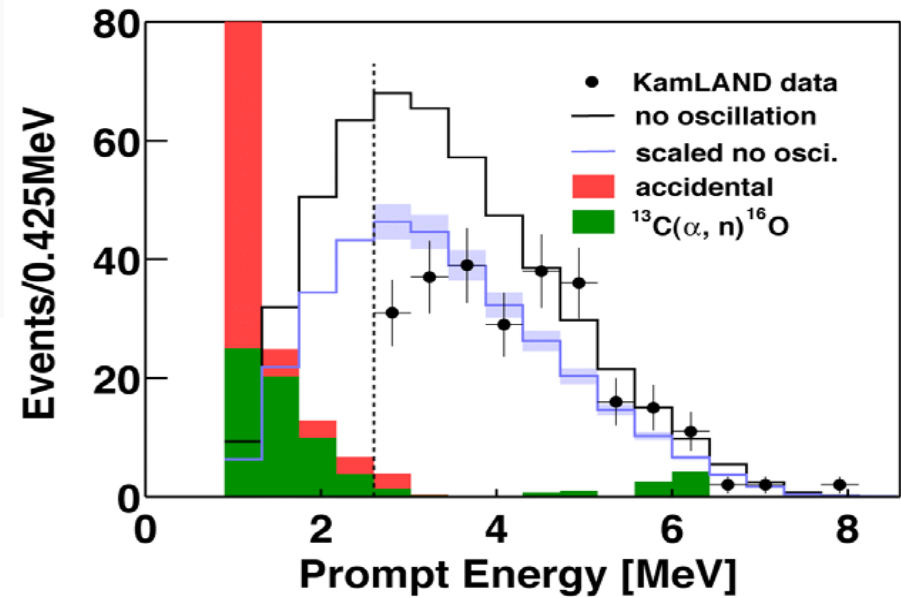
"We are happy to inform you [Pauli]
that we have definitely detected neutrinos"

Eksperyment KamLand - strumień i widmo energii



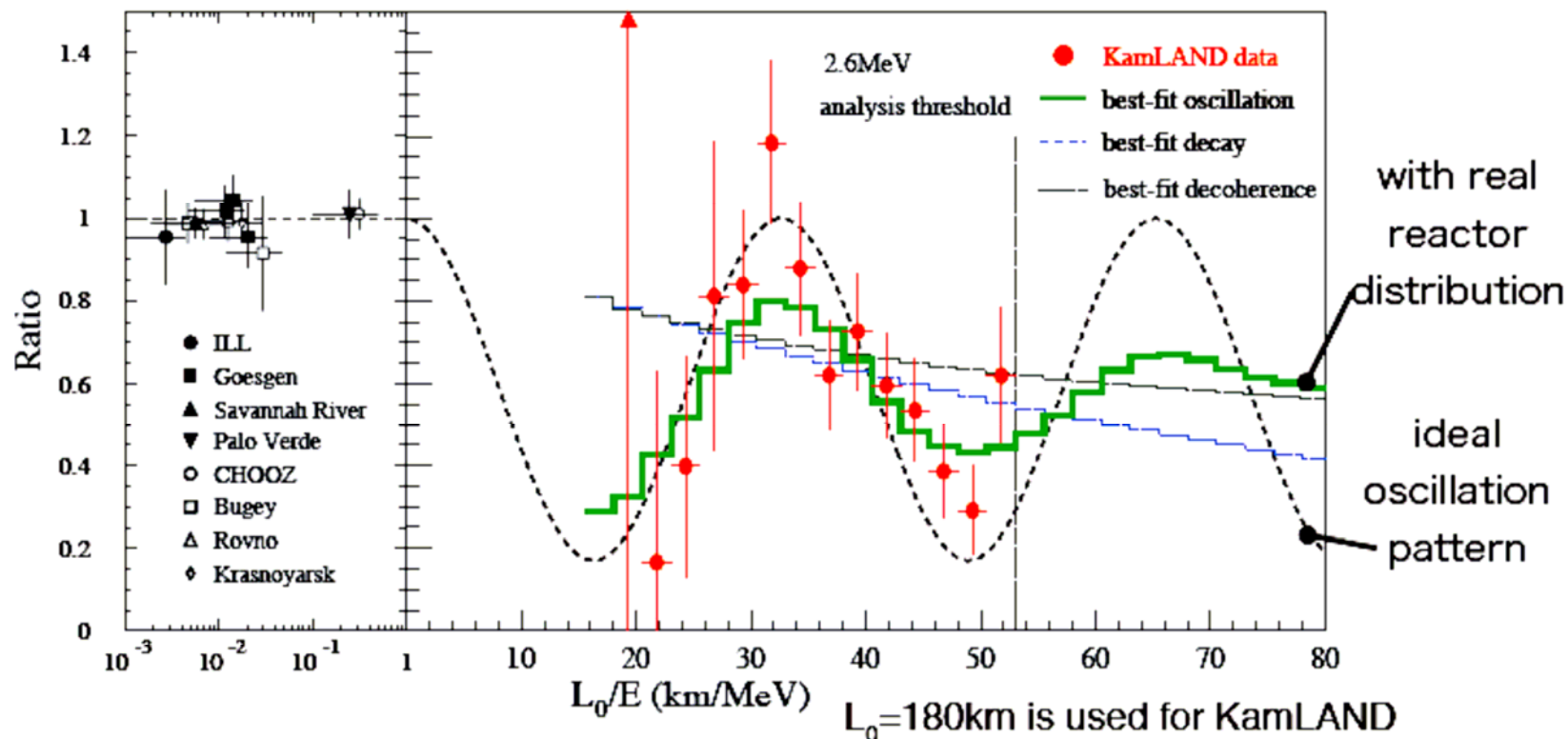
258 zaobserwowanych oddziaływań
 365.2 ± 23.7 oczekiwanych
 17.8 ± 7.3 zdarzeń tła

KamLAND, PRL 94, 2005



Oslabienie strumienia neutronów
i widmo energii
wykluczają brak oscylacji na
poziomie ufności 99.999995%

KamLAND - zależność strumienia od L/E



Bardzo dobra zgodność wyników dla neutronów słonecznych i antyneutronów reaktorowych:
 $\Delta m_{st}^2 \sim 8 \times 10^{-5} \text{eV}^{-2}$, kąt mieszania duży, ale nie maksymalny

Wiemy jednak, że są trzy rodzaje neutrin

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

5 parametrów oscylacyjnych: dwie niezależne różnice kwadratów mas, trzy kąty mieszania, faza odpowiedzialna za zachowanie/łamianie symetrii CP

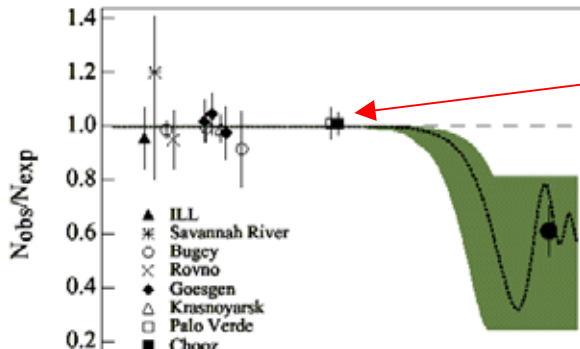
neutrino atmosferyczne

faza łamiąca CP

neutrino słoneczne

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{-i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

wiąże sektor atmosferyczny i słoneczny



Bardzo ważne pytania

Kąt $\theta_{23} = 45^\circ$ (maksymalny), $\theta_{12} = 33^\circ$ (duży), $\theta_{13} < 10^\circ$ (mały), inaczej niż dla kwarków

→ Czy to przejaw jakiejś nowej symetrii przyrody?

$$\Delta m_{23}^2 \approx 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2, \Delta m_{12}^2 \approx 8 \times 10^{-5} \text{ eV}^2,$$
$$|\Delta m_{13}^2| = |\Delta m_{23}^2 - \Delta m_{12}^2|$$

→ Czy symetria CP w sektorze leptonowym jest zachowana czy jest łamana?

Pomiar możliwy, jeśli θ_{13} nie jest zbyt mały

Bardzo ważne pytanie, bo dotyczy wyjaśnienia asymetrii między materią i antymaterią

„Efekt LNSD” - dodatkowy obszar oscylacji?

Trzeci obszar na rozkładzie parametrów oscylacji

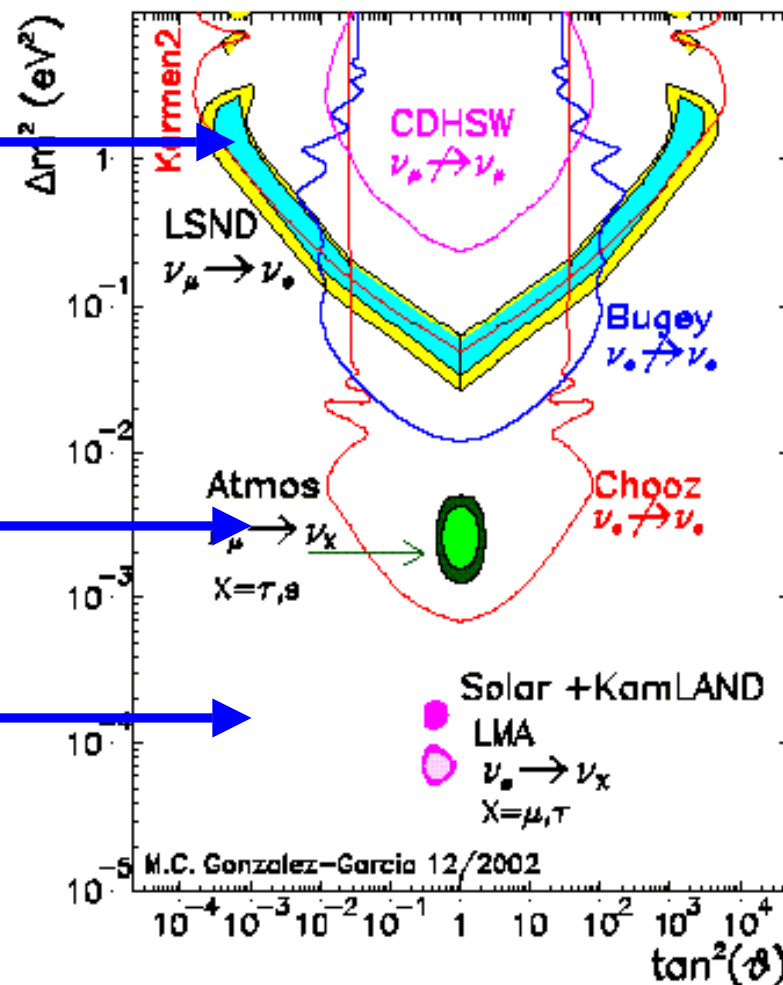
$\Delta m^2 \cong 1 \text{eV}^2$, kąt mieszania bardzo mały

Trzy skale dla różnicy kwadratów mas \rightarrow cztery stany zapachowe neutrin

Problem: istnieją tylko trzy stany zapachowe lekkich neutrin (wynik z LEP-u) \rightarrow czwarte neutrino jakiegoś inne, nazwane „sterylnym”

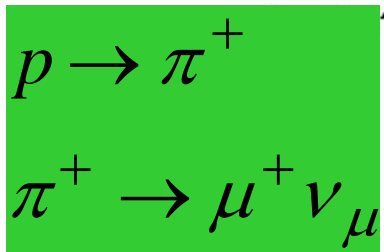
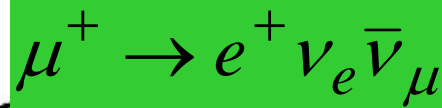
Sprawdzenie w eksperymencie MiniBoone, pierwsze wyniki mają być ogłoszone wkrótce

IFJ PAN, 24.05.200



Jeśli zostałyby potwierdzone, to rewolucja!

Eksperyment LSND (Liquid Scintillator Neutrino Detector)



Proton beam from LANSCE accelerator

Copper beam stop

Neutrinos



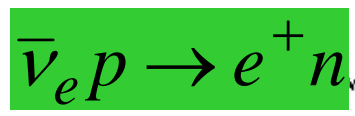
Shielding blocks (salvaged relics of the cold war)

Cosmic-ray veto shield

Steel

A thousand-eyed detector

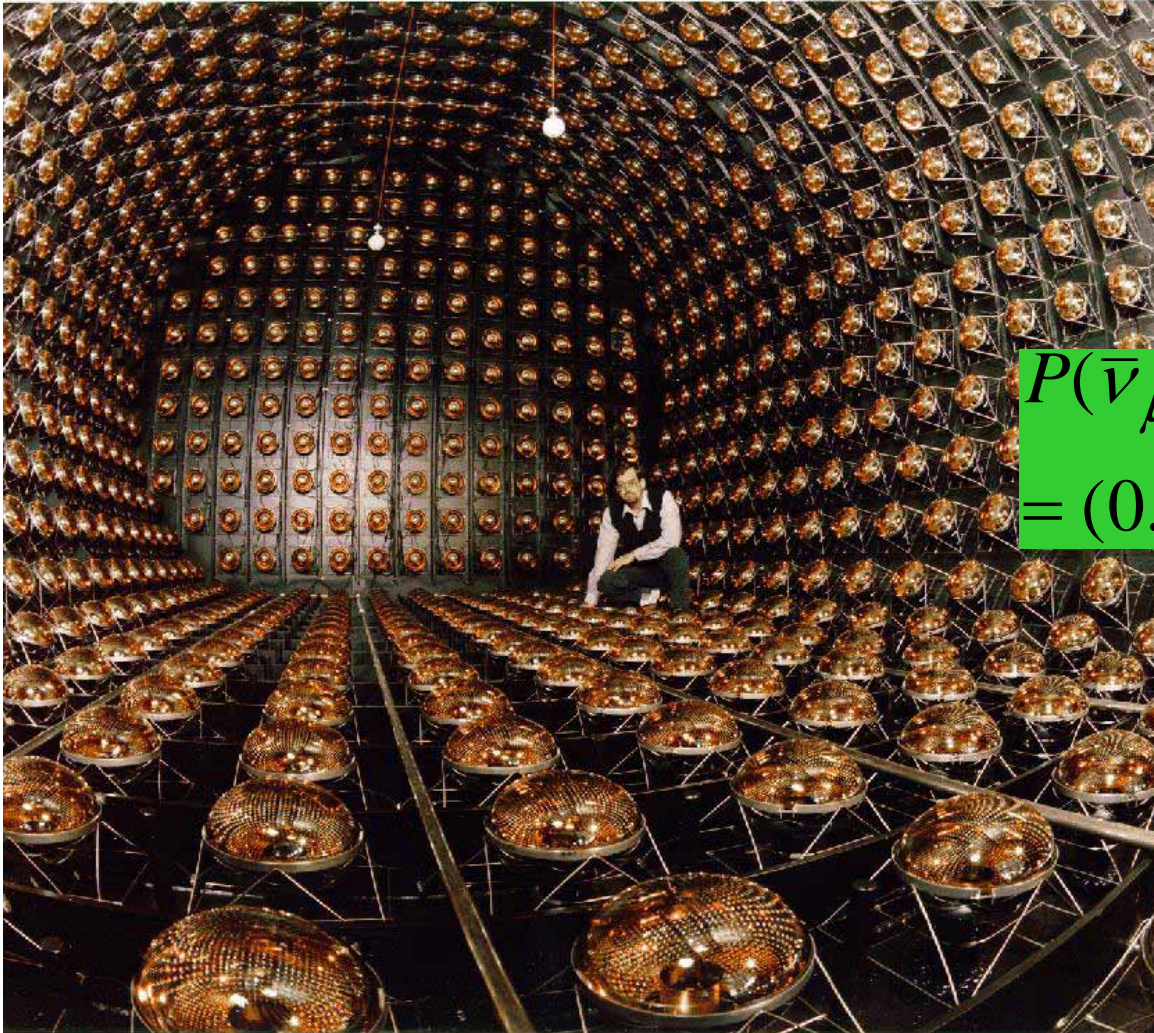
Water plug (more shielding)



→ wiązka protonowa o pędzie 800 MeV, dane z okresu 1993-1998, głównie dla rozpadów π i μ w spoczynku,

→ detektor: 30 m od tarczy, 167 ton ciekłego scyntylatora, 1220 fotopowielaczy, sygnał: pozyton w koincydencji z opóźnionym sygnałem od fotonu z wychwytu neutronu

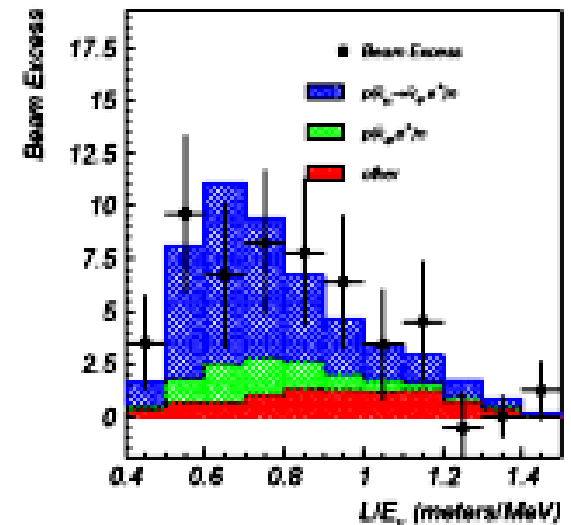
„Efekt LSND”



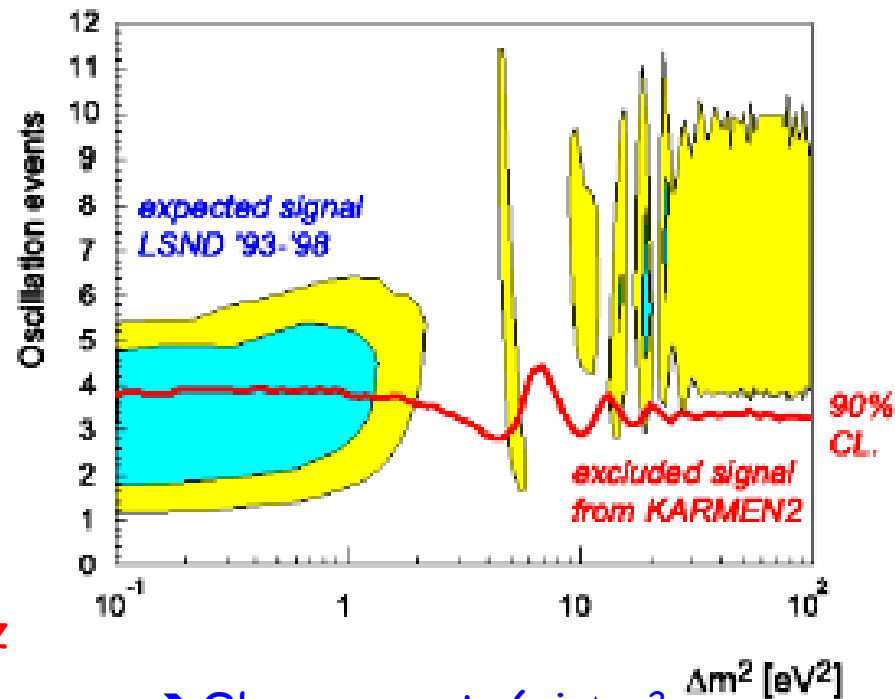
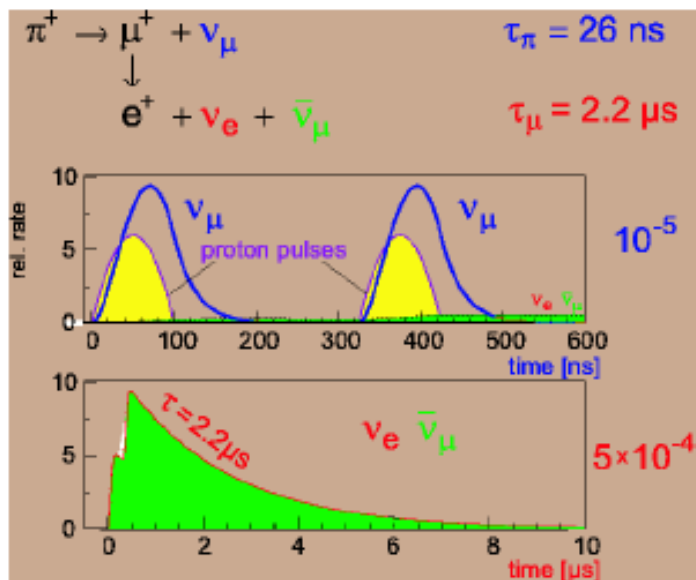
Obserwowany nadmiar e^+
($87.9 \pm 22.4 \pm 6.0$) (3.8σ)
interpretowany jako
pochodzący od $\bar{\nu}_{e,\mu}$,
będących wynikiem oscylacji
między $\bar{\nu}_{\mu}$ i $\bar{\nu}_e$
LSND Collab, PRD 64,112007

$$P(\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e)$$

$$= (0.264 \pm 0.067 \pm 0.045)\%$$



Eksperyment KARMEN - częściowe wykluczenie efektu LSND



→ znakomita struktura czasowa impulsów z akceleratora: 2 impulsy 100 ns w odstępie 330 ns, a po nich 20 ms przerwy

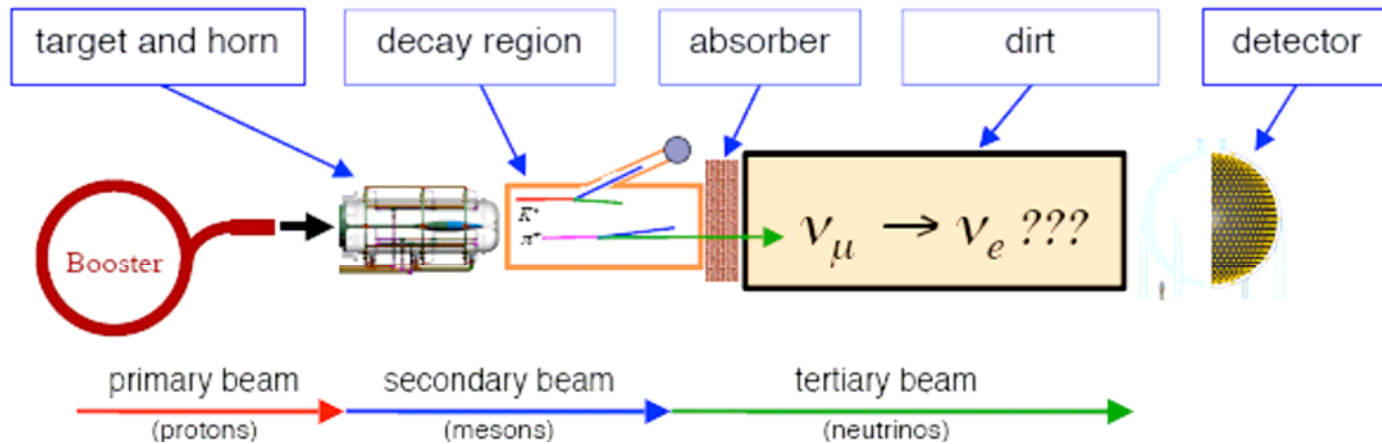
→ neutrina z rozpadów π w krótkich impulsach (<150 ns), a neutrina z rozpadów μ z długim rozkładem czasowym, charakterystycznym dla czasu życia μ

→ bardzo dobra kontrola i redukcja tła

→ Obszar wartości Δm^2 dozwolonych przez LSND został tylko częściowo wykluczony przez eksperyment KARMEN

Wspólna analiza z KARMEN2, Church et al. PDR 66, 013001

Eksperyment MiniBooNE sprawdzenie efektu LSND



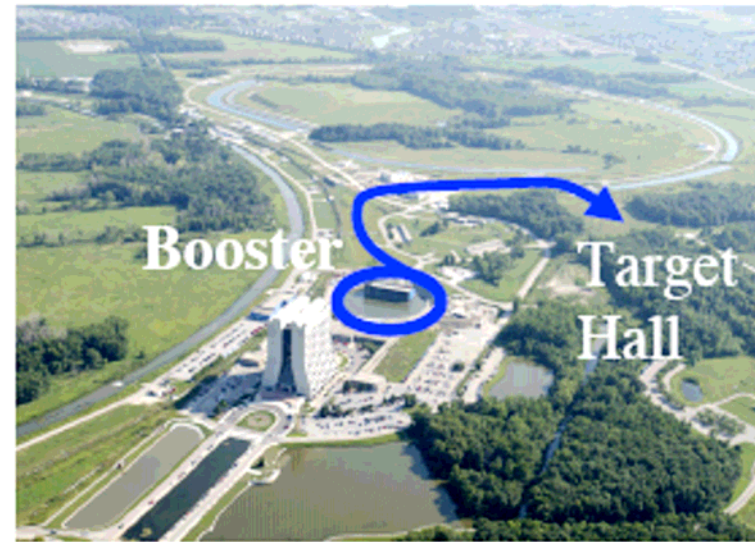
→ Eksperyment prowadzony w FermiLAB-ie
- 8 GeV-owe protony z boostera

→ wiązka neutrin o energii ~500 MeV (~30 MeV w LSND)

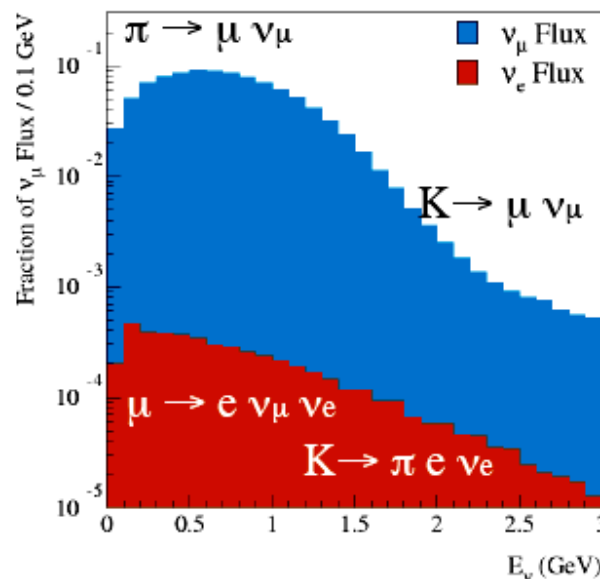
→ detektor w odległości ~500 m od tarczy (~30 m w LSND)

→ L/E takie samo w obu eksperymentach, ale zupełnie inne błędy systematyczne i sygnał

→ dla ~10²¹ p.p.t. wystarczająca czułość, aby wykluczyć lub potwierdzić efekt LSND



Wiązka protonów, tarcza, wiązka neutrin



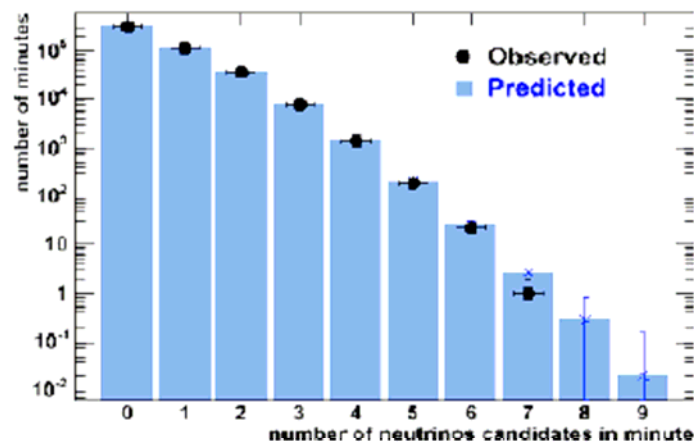
4×10^{12} protonów/impuls
 czas impulsu $1.6 \mu\text{s}$
 częstotliwość do 5 Hz

Tarcza berylowa o grubości 1.7λ
 Modelowanie produkcji π w oparciu o
 dane z eksperymentu HARP

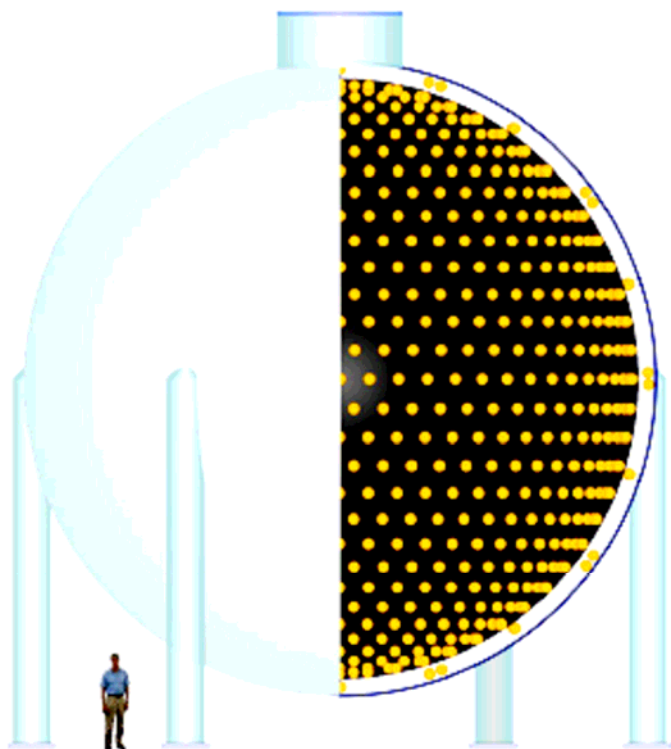
Zebraane dane: 6.3×10^{20} pot

Analiza w oparciu o $5.58 \pm 0.12 \times 10^{20}$ pot

$$\nu_e/\nu_\mu = 0.5\%$$



Detektor MiniBooNE



- 541 meters downstream of target
- 3 meter overburden
- 12 meter diameter sphere
 - (10 meter “fiducial” volume)
- Filled with 800 t
 - of pure mineral oil (CH_2)
 - (Fiducial volume: 450 t)
- 1280 inner phototubes,
 - 240 veto phototubes
- Simulated with a GEANT3 Monte Carlo

- 10% pokrycia powierzchni fotopowielaczami
- Bardzo dokładna analiza światła (model z 39 parametrami, bazujący na stałej kalibracji i zewnętrznych pomiarach)

System wyzwalania eksperymentu

Podstawowy tryger bazuje na impulsie wiązki

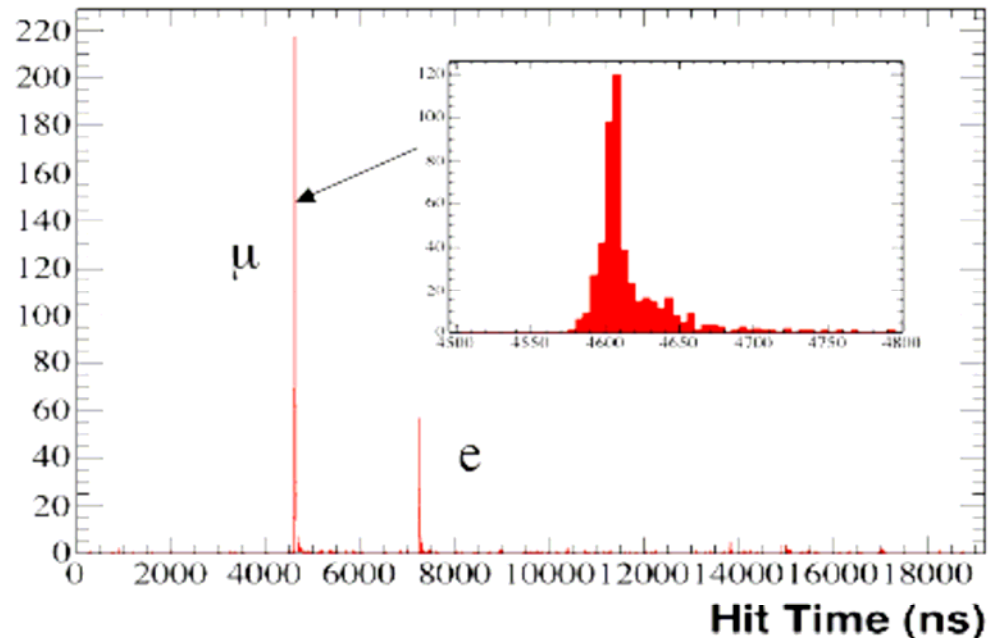
- okno czasowe trygera wynosi $19.2 \mu\text{s}$,

- otwiera się na $4 \mu\text{s}$ przed początkiem impulsu o długości $1.6 \mu\text{s}$

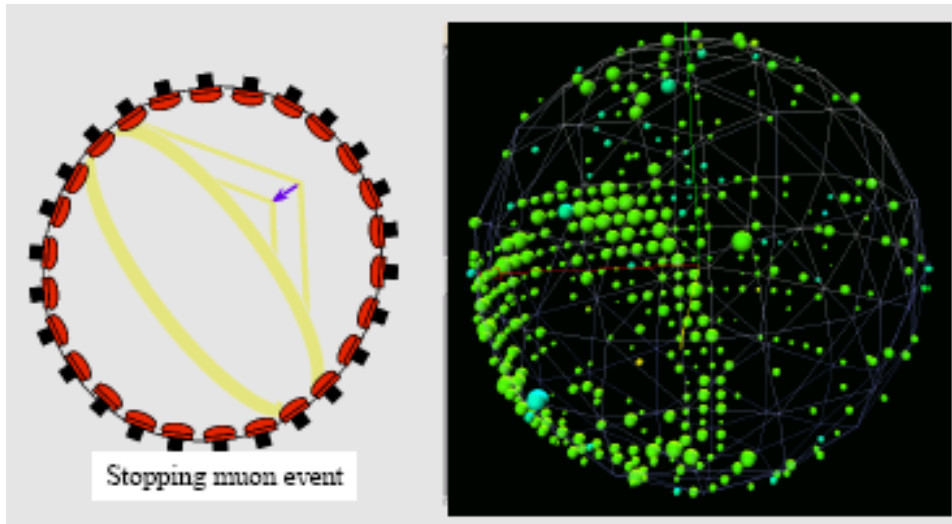
Definiuje się tak zwane „podzypadki” czyli oddzielne impulsy w ramach 100 ns przedziałów, na jakie dzieli się okno

Tank Hits

Example Event

$$\nu + n \rightarrow \mu + p$$
$$\mu \rightarrow \nu_{\mu} \nu_e e$$


MiniBooNE - przykłady typowych przypadków



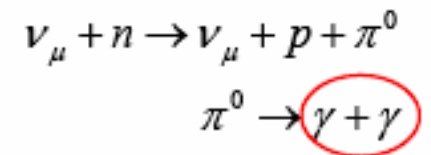
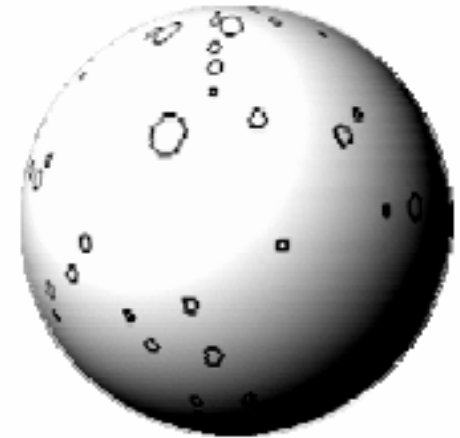
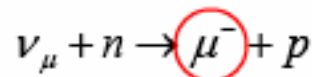
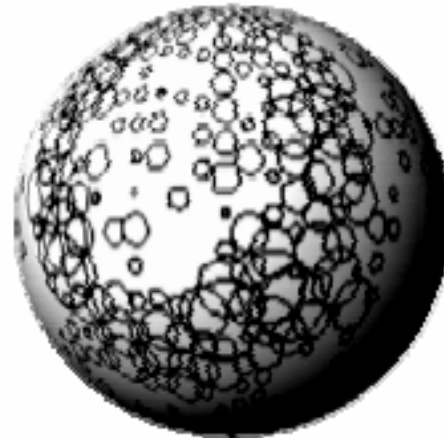
e^- Sygnał oscylacji
1 „podzypadek”



Na ogół 2 „podzypadki”
lub μ wychodzący z detektora



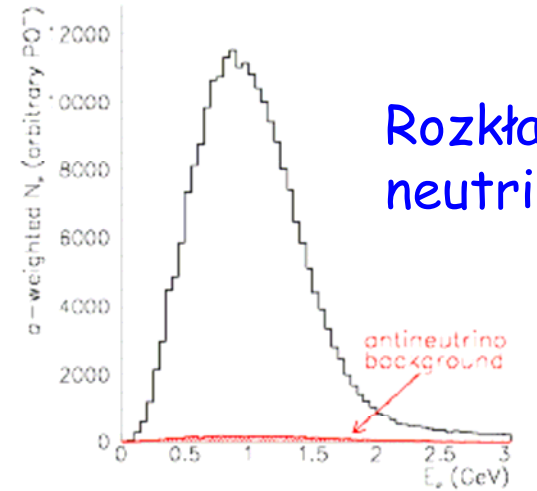
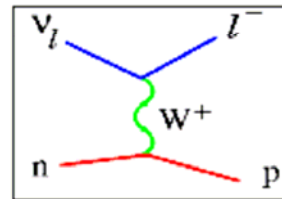
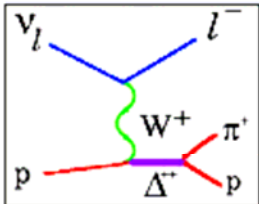
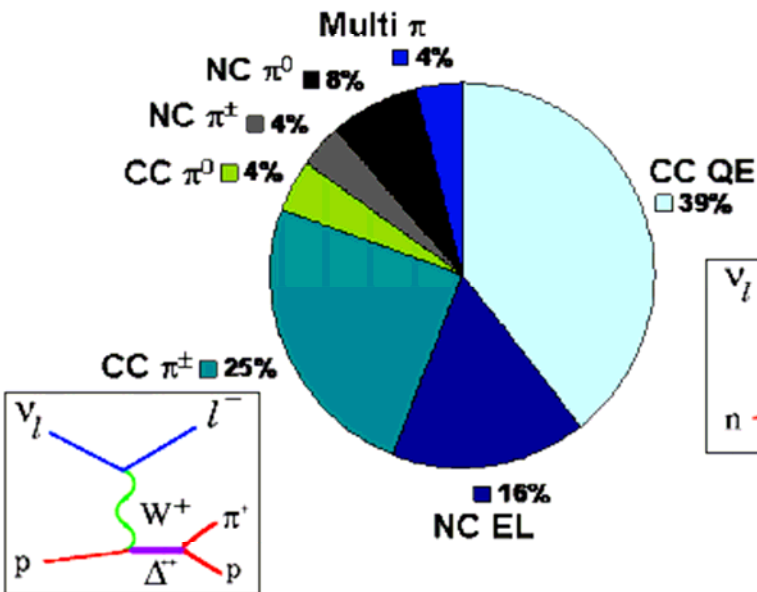
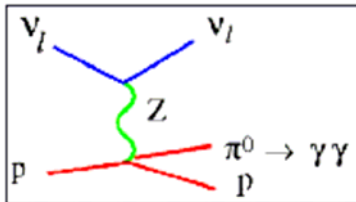
π^0 , jeśli 1 foton słaby lub
wychodzi z detektora



Przewidywane udziały poszczególnych reakcji

Predicted event rates before cuts
(NUANCE Monte Carlo)

D. Casper, NPS, 112 (2002) 161



Rozkład energii
neutrino

Najważniejsza reakcja
(bardzo czysta), gdy $l=e$,
to poszukiwany sygnał
oscylacji

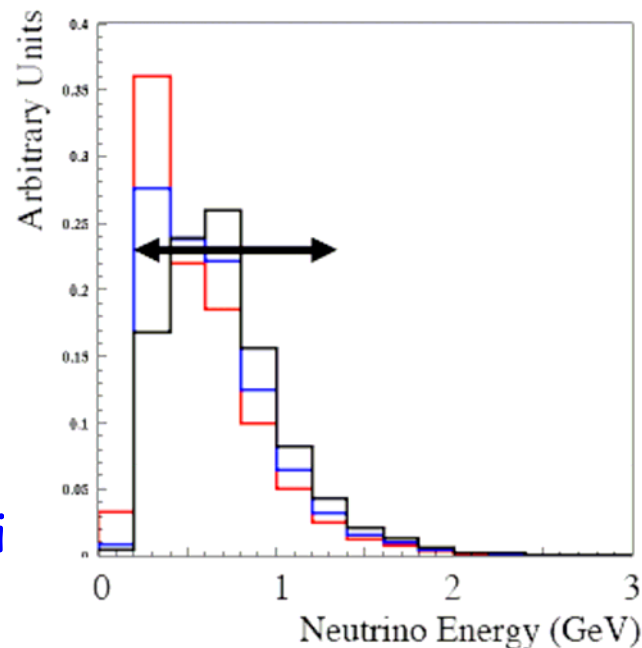
Dwie niezależne, „ślepe” analizy danych

→ „Ślepa” analiza - niedostępne przypadki sygnału (rzędu 1% wszystkich przypadków), pozostałe są cały czas analizowane pod kątem zrozumienia tła, kalibracji detektora, poprawiania symulacji Monte Carlo, „pudełko sygnałowe” otwiera się, kiedy jest wystarczająca liczba przypadków i analiza jest dopracowana

→ Cele obu analiz: maksymalna redukcja tła i maksymalizacja wydajności poszukiwania sygnału

→ „Obszar sygnału E_ν^{QE} między 300 MeV a 1500 MeV

→ Patrzy się na całkowity nadmiar przypadków oddziaływań ν_e i na zależność energetyczną



MiniBooNE signal examples:

$$\Delta m^2 = 0.4 \text{ eV}^2$$

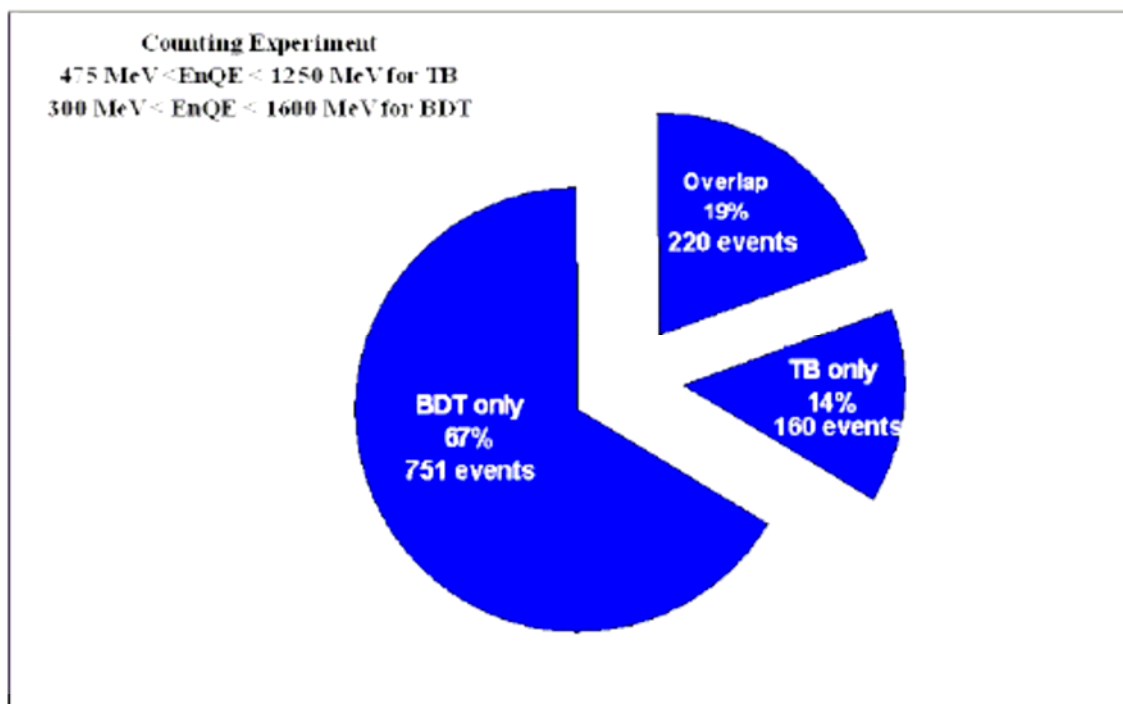
$$\Delta m^2 = 0.7 \text{ eV}^2$$

$$\Delta m^2 = 1.0 \text{ eV}^2$$

Dwie niezależne, „ślepe” analizy danych

→ Analiza 1 (TB): bazuje na dokładnej rekonstrukcji torów cząstek i na prawdopodobieństwach identyfikacji cząstek

→ Analiza 2 (BDT): „Boosted Decision Trees - zaawansowana statystyczna analiza, polegająca na budowaniu zestawu drzew decyzyjnych, startując z poziomu informacji o pojedynczych sygnałach poprzez zmienne fizyczne po wartość prawdopodobieństwa identyfikacji przypadku



Otwarcie „pudełka sygnałowego” - 26 marca 2007



Wyniki analizy 1

- Sprawdzenie wartości χ^2 porównania danych z MC dla 12 zmiennych kontrolnych, problem z energią neutrina E_{ν}^{QE} , więc podniesienie dolnej granicy energii do wartości 475 MeV
- Dla E_{ν}^{QE} powyżej 475 MeV liczba przypadków i rozkład energii zgodne z brakiem oscylacji

data: 380 events

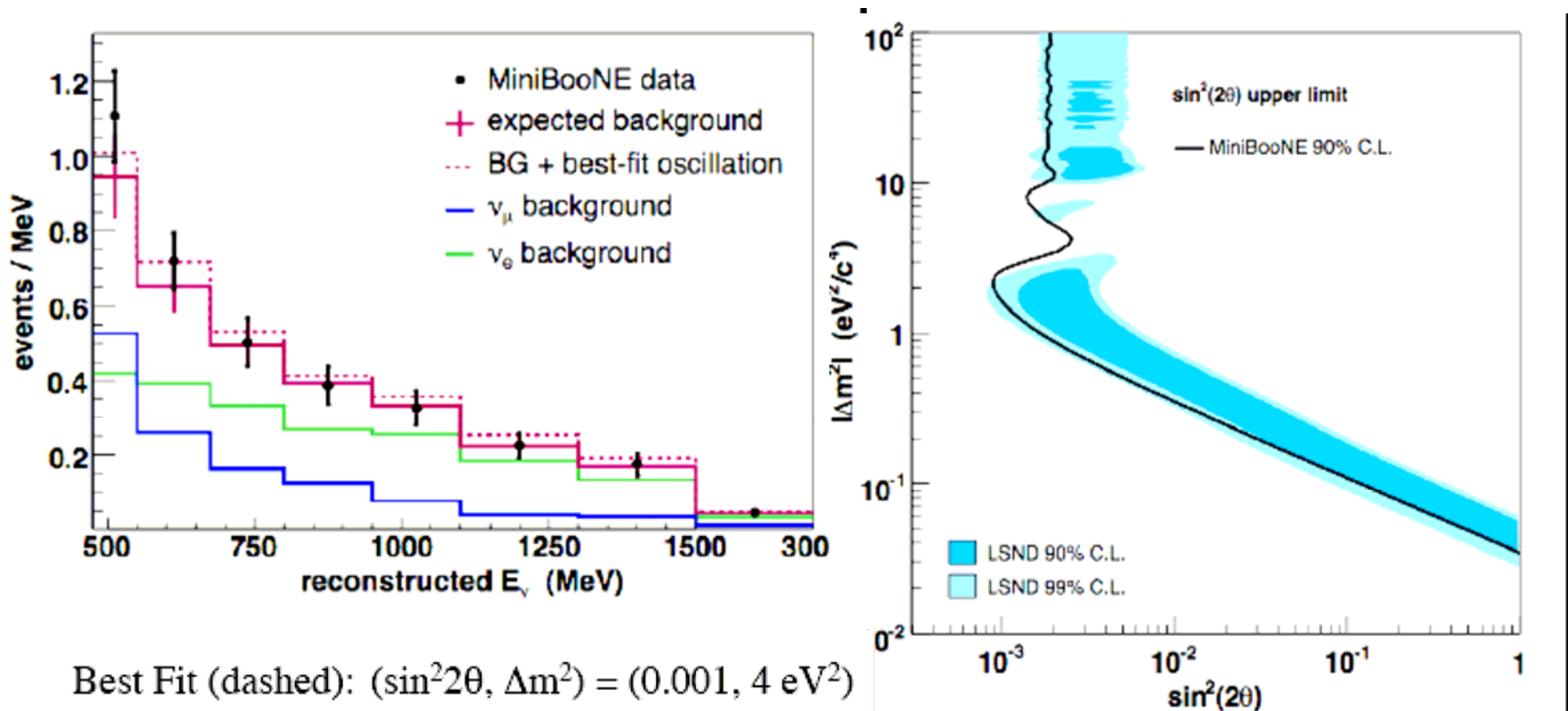
expectation: 358 ± 19 (stat) ± 35 (sys) events

significance:

0.55σ

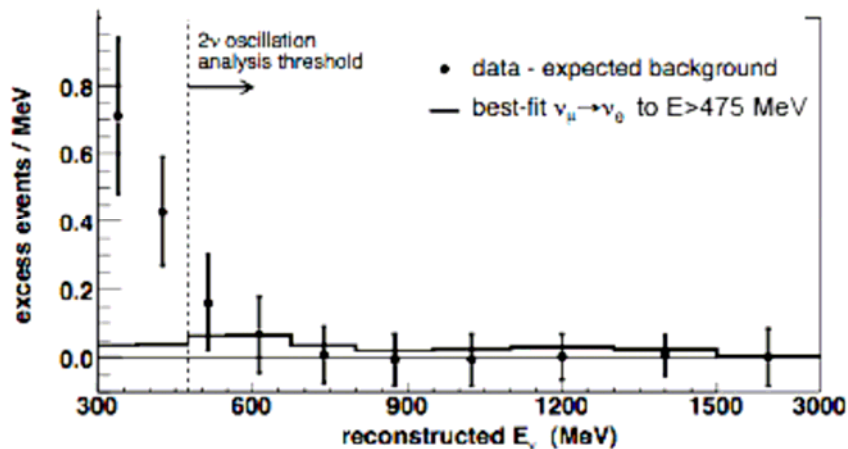
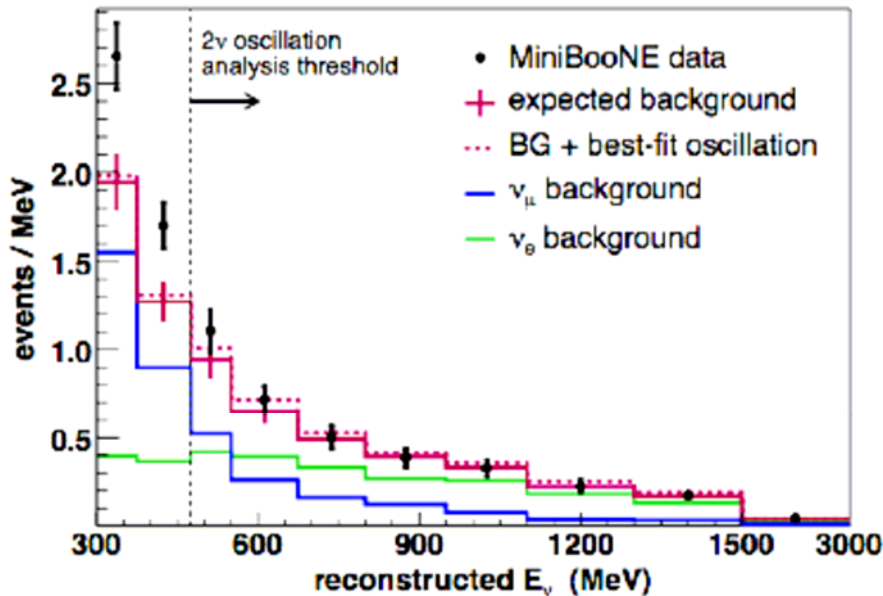
Wyniki analizy 1

Zależność energetyczna i ograniczenie dla oscylacji $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$



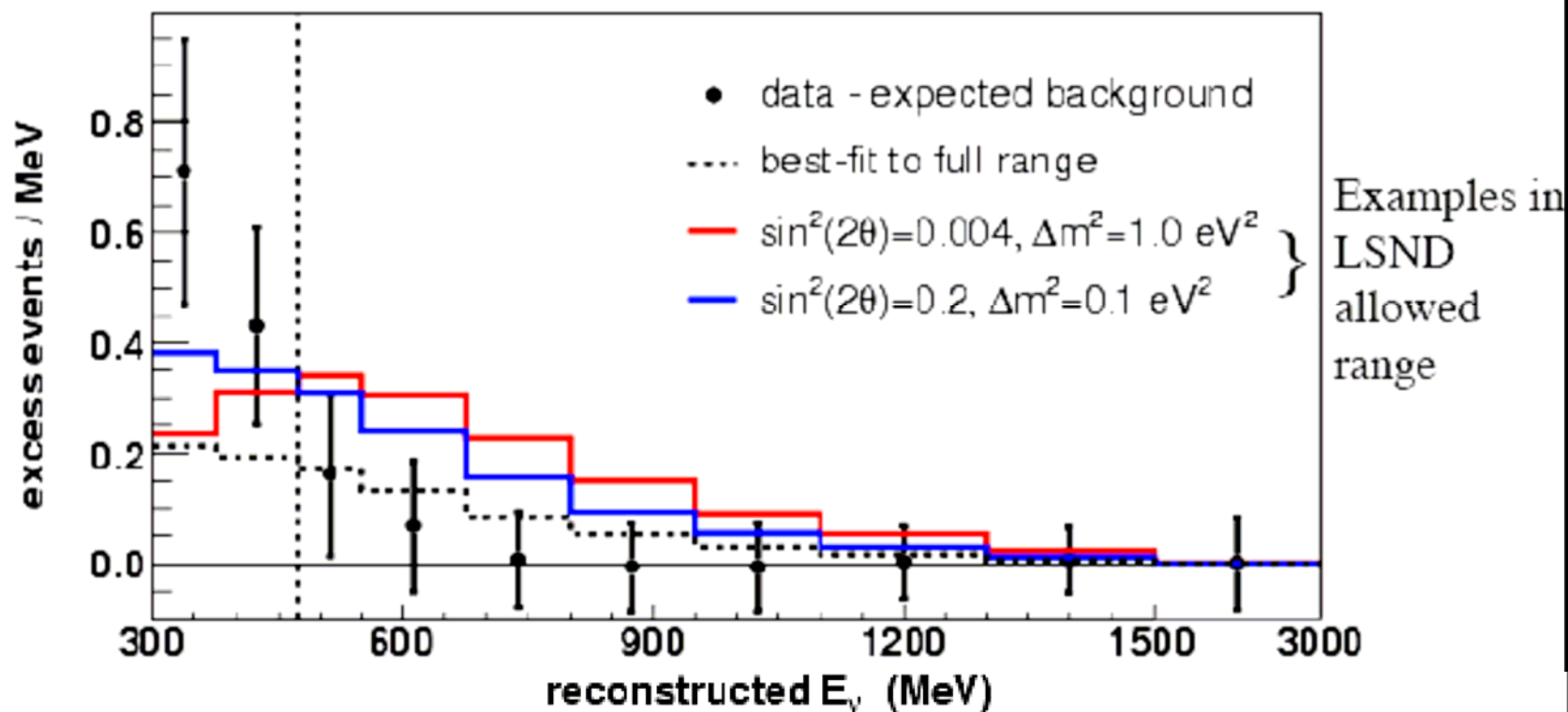
Prawdopodobieństwo χ^2 równe 93%
dla hipotezy braku oscylacji

Wyniki analizy 1 - pełny zakres energii



$96 \pm 17 \pm 20$ events
above background,
for $300 < E_\nu^{QE} < 475$ MeV

Wyniki analizy 1 - pełny zakres energii



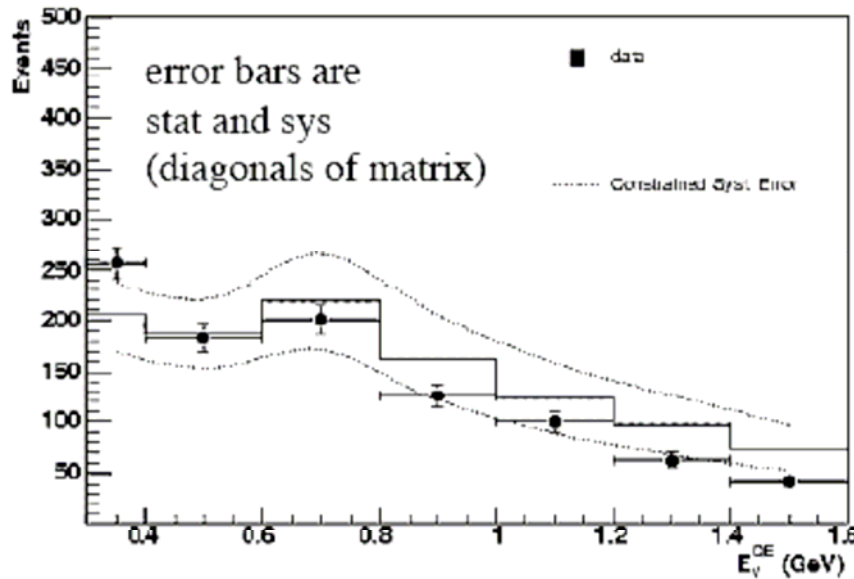
Best Fit (dashed): $(\sin^2 2\theta, \Delta m^2) = (1.0, 0.03 \text{ eV}^2)$

χ^2 Probability: 18%

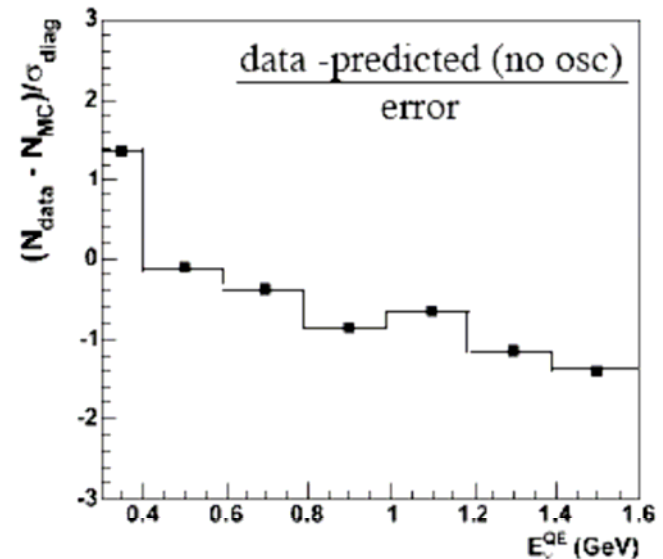
Nadmiar przypadków nie daje się wytłumaczyć oscylacjami

Wyniki analizy 2

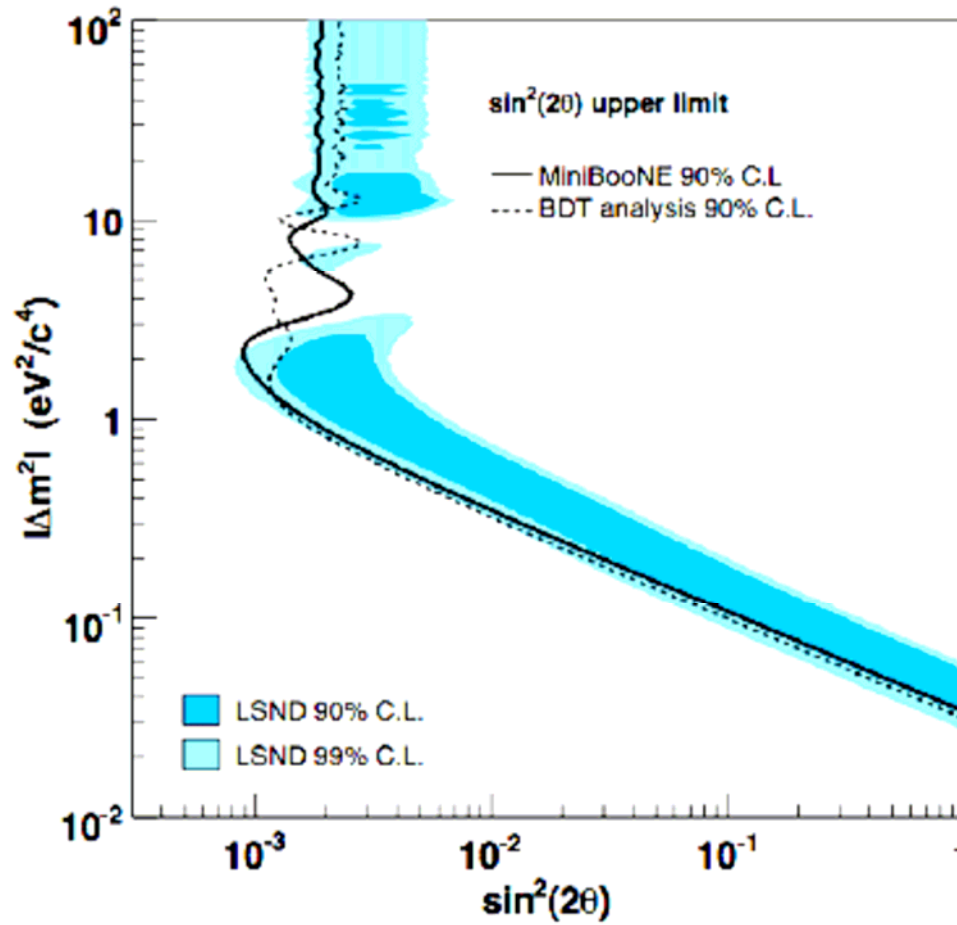
Nie ma problemu niezgodności danych i MC przy niskich energiach neutrin



(sidebands used for constraint not shown)



Porównanie czułości obu analiz w wykluczeniu oscylacji $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$



Energy-fit analysis:
solid: TB
dashed: BDT

Independent analyses
are in good agreement.

Wnioski

Eksperyment MiniBooNE osiągnął czułość konieczną do sprawdzenia „efektu” LSND

Dla E_ν^{QE} powyżej 475 MeV dane są zgodne z hipotezą braku oscylacji $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ czyli nie potwierdzają efektu LSND i konieczności istnienia neutrina sterylnego

Dla E_ν^{QE} między 300 MeV i 475 MeV występuje nadmiar przypadków w porównaniu z MC, ale niewytłumaczalny na gruncie oscylacji

Niezwykle ważna będzie analiza aktualnie zbieranych danych MiniBooNE z wiązką antyneutrino mionowych

Zasadnicza jest też lepsza znajomość przekrojów czynnych na oddziaływanie neutrino przy niskich energiach, w szczególności zrozumienie wpływu efektów jądrowych