

Neutrino (2)

Elementy fizyki cząstek elementarnych

Wykład IX

- Oscylacje neutrin atmosferycznych i słonecznych
- Eksperyment K2K
- Eksperyment Minos
- Eksperyment Kamland
- Perspektywy badań neutrin

Neutrina atmosferyczne

Eksperyment Super-Kamiokande

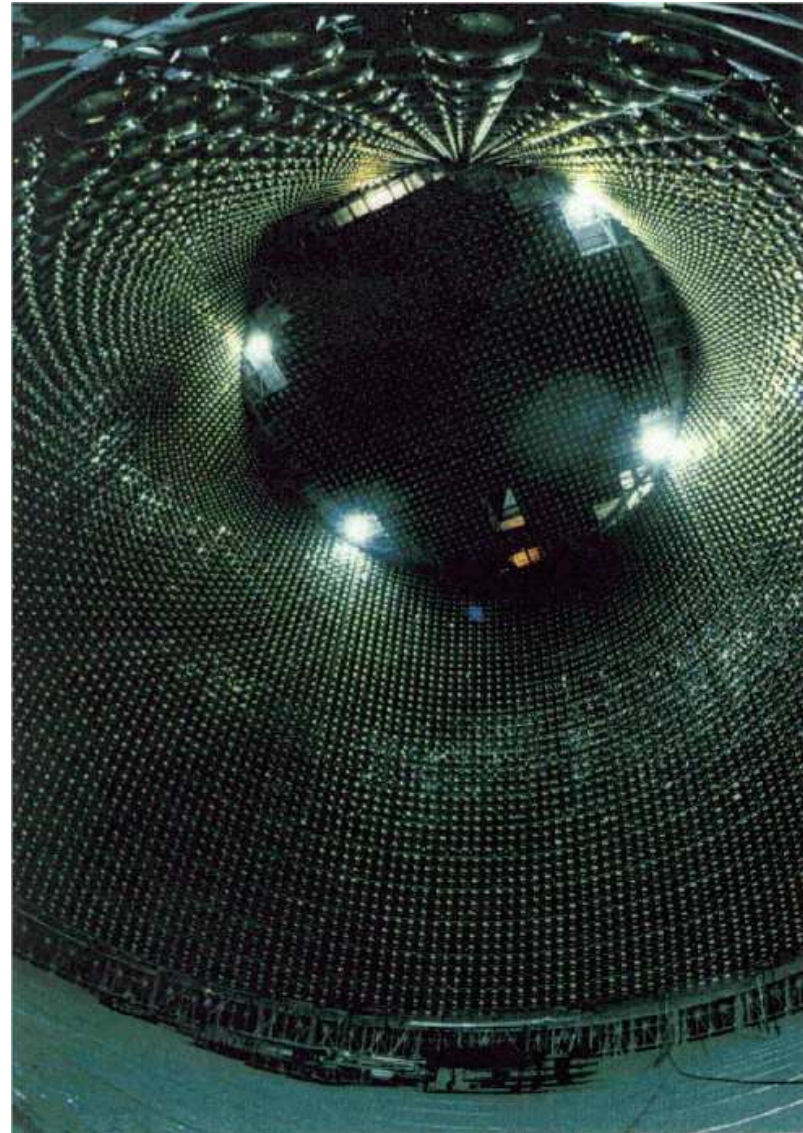
Japonia, w starej kopalni, 1 km pod górą Kamioka, komora o wysokości 40 m i średnicy 40 m, wypełniona **wodą**

11'000 fotopowielaczy (50 cm średnicy!) rejestruje przechodzące cząstki

rejestrowane jest

promieniowanie Czerenkowa

emitowane w kierunku ruchu przez cząstki poruszające się z prędkością większą od prędkości światła (w wodzie)



Super-Kamiokande

Wyniki

Zależność liczby obserwowanych przypadków **elektronowych** i **mionowych** od kierunku (przypadki typu FC) \Rightarrow

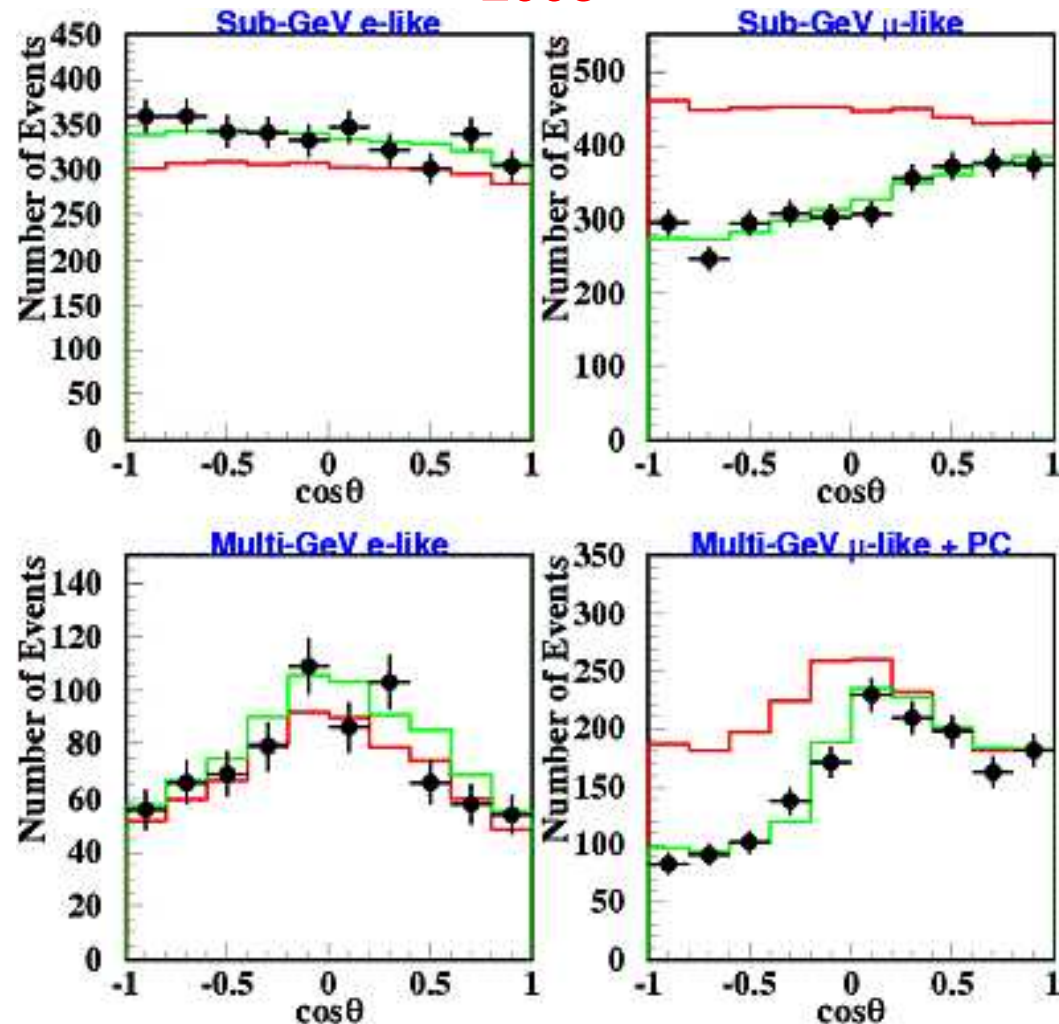
Zgodnie z oczekiwaniami **tyle samo** neutrin **elektronowych** leci **do dołu** ($\cos \theta > 0$) i **do góry** ($\cos \theta < 0$).

Neutrin mionowych **mniej** niż oczekujemy (**czerwona linia**) !

Wyraźnie **mniej** ν_μ lecących **od dołu** niż z góry !

zielona linia - dopasowanie modelu oscylacji

2003



Super-Kamiokande

Wyniki

Przedstawione wyniki Super-Kamiokande (i innych pomiarów neutrin atmosferycznych) można wytłumaczyć przyjmując, że ν_μ “znikają” na skutek oscylacji w inny rodzaj neutrina.

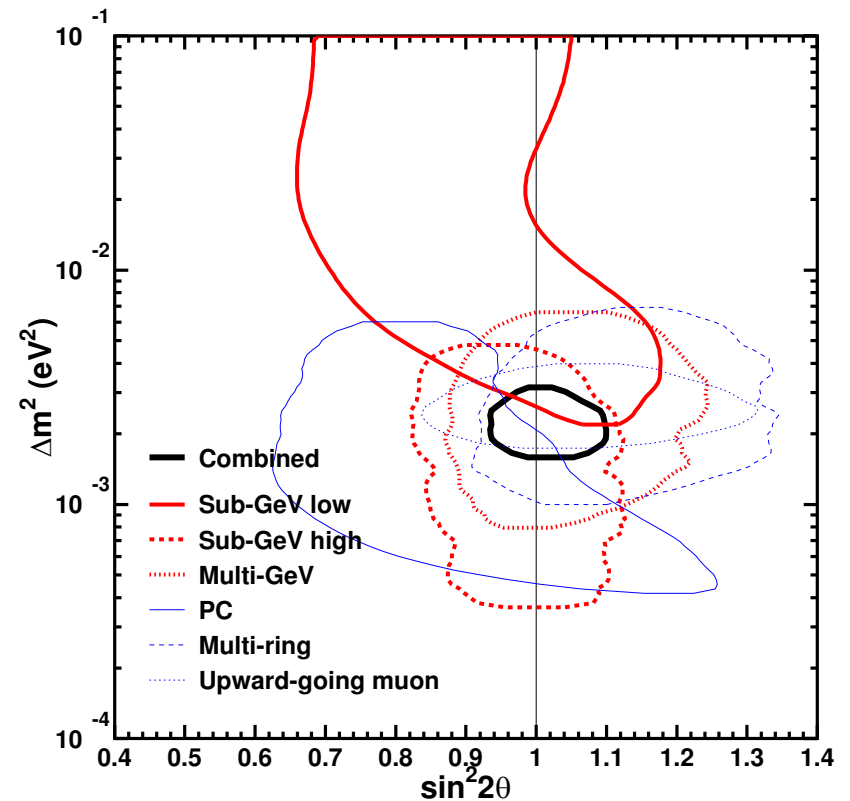
Oscylacje w ν_e wykluczamy (strumień zgodny z modelem)

⇒ najlepszym kandydatem **neutrino taonowe**

Dopasowanie parametrów mieszania do wszystkich danych:

$$\sin^2 2\theta_{23} = 1.00$$

$$\Delta m_{23}^2 = 0.0021 \text{ eV}^2$$



Zgodne wyniki dla różnych próbek

Oscylacje neutrin

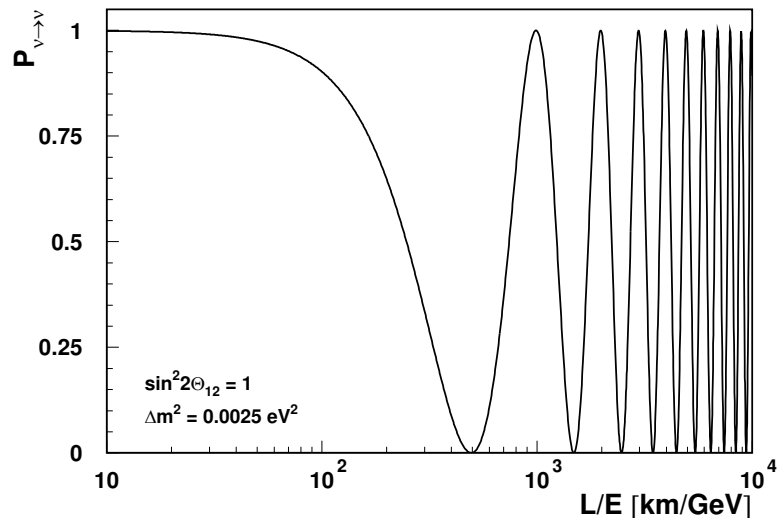
Prawdopodobieństwo przejścia

Prawdopodobieństwo, że po czasie t wyprodukowana cząstka ν_μ oddziała jako ν_μ , zakładając, że masy i różnice mas są małe ($\Delta m \ll m_1 \sim m_2 \ll E_\nu$):

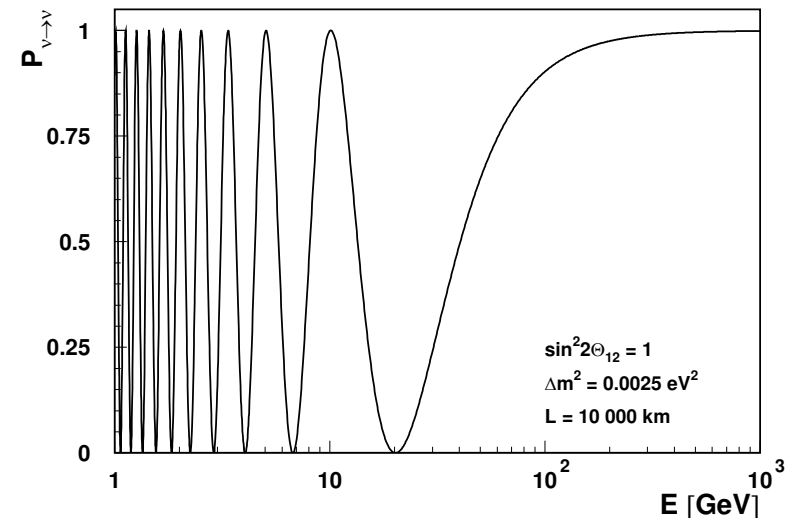
$$P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu}(t) = 1 - \sin^2(2\theta_{23}) \sin^2\left(1.27 \cdot \Delta m_{23}^2 \frac{L}{E}\right)$$

gdzie $L = ct$ [km], Δm^2 [eV²] i E [GeV].

W funkcji odległości:

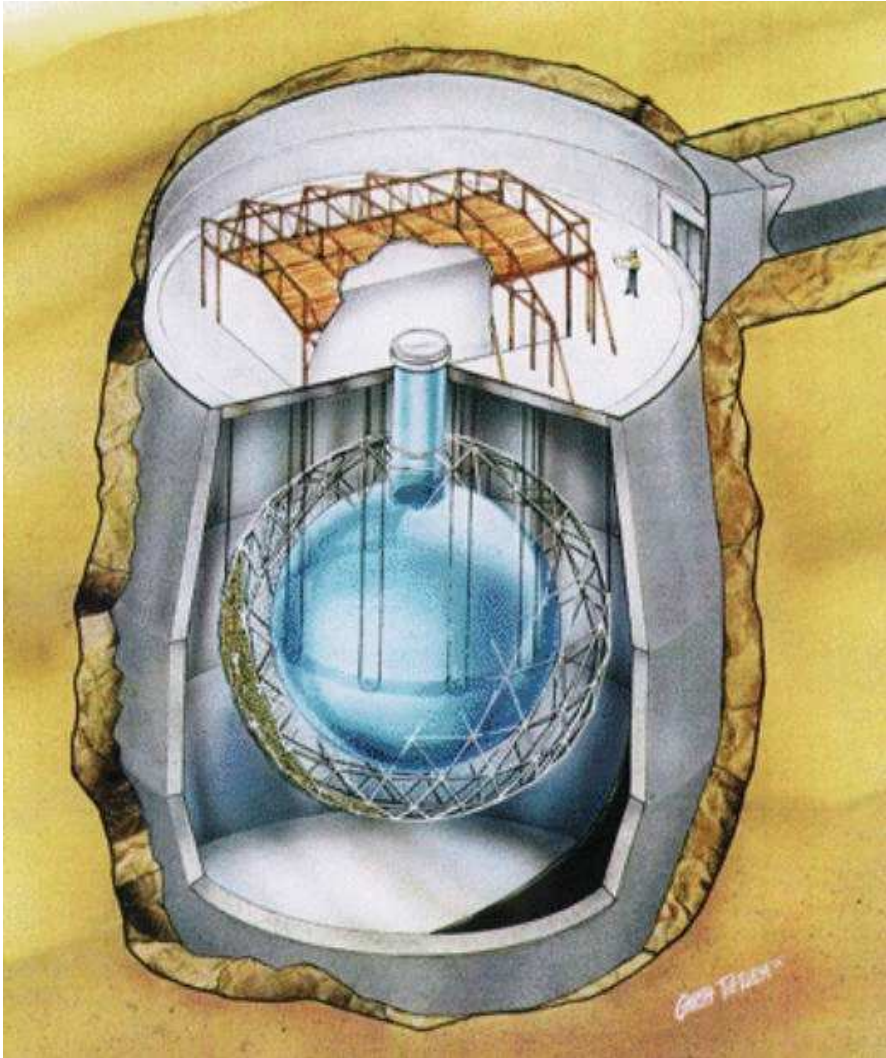


W funkcji energii neutrina:



SNO

Eksperyment SNO (Sudbury Neutrino Observatory)



- ogromny zbiornik wypełniony 7000 t wody (H_2O)
- w środku kula wypełniona 1000 t ciężkiej wody (D_2O)
- promieniowanie Czerenkowa mierzone przez ok. 9500 fotopowielaczy.
- całość umieszczona na głębokości ponad 2000 m

SNO

Wyniki (Phase I + Phase II)

Z łącznego dopasowania
(w jednostkach $10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$):

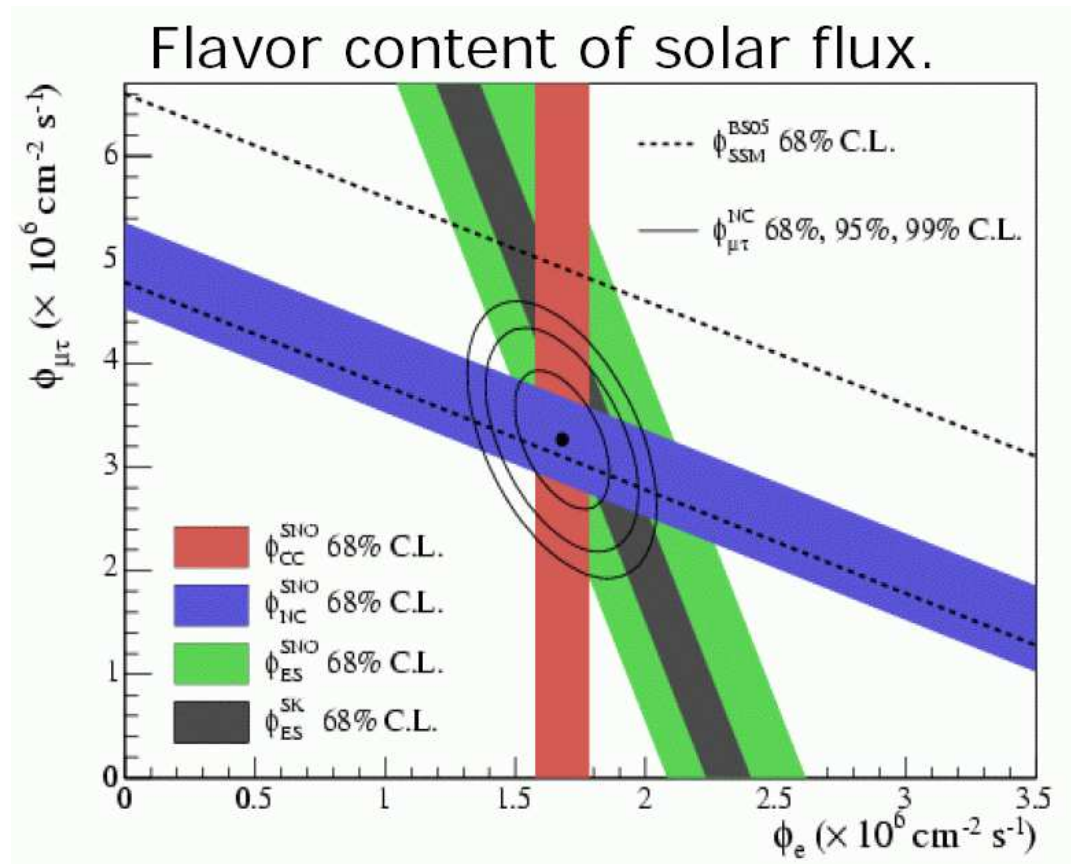
$$\Phi_{CC} = 1.68 \pm 0.06 \pm 0.09 = \Phi_{\nu_e}$$

$$\begin{aligned} \Phi_{ES} &= 2.35 \pm 0.22 \pm 0.15 \\ &= \Phi_{\nu_e} + \varepsilon(\Phi_{\nu_\mu} + \Phi_{\nu_\tau}) \\ &\quad (SK : 2.32 \pm 0.09) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi_{NC} &= 4.94 \pm 0.21 \pm 0.36 \\ &= \Phi_{\nu_e} + \Phi_{\nu_\mu} + \Phi_{\nu_\tau} \end{aligned}$$

Przewidywania SSM (nowe)

$$\Phi^{SSM}(\nu_e) = 5.82 \pm 1.34$$



Oscylacje neutrin

Podsumowanie (I)

Stany fizyczne neutrin są mieszankami stanów o ustalonym zapachu.

Prowadzi to do oscylacji neutrin, które zostały dokładnie zmierzone w dwóch “sektorach”:

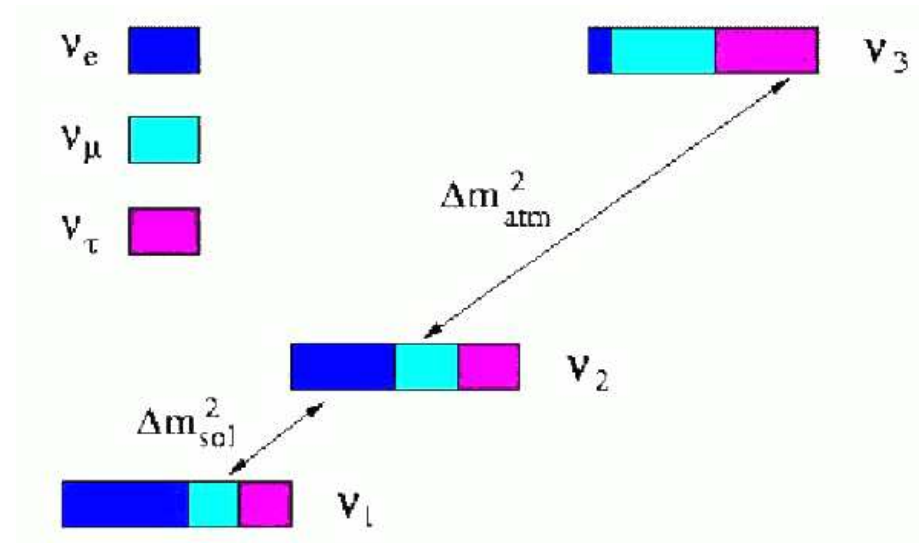
- neutrina atmosferyczne

$$\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau: \quad \Delta m_{\mu\tau}^2 \sim 0.002 \text{ eV}^2$$

- neutrina słoneczne

$$\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu (?): \quad \Delta m_{e\mu}^2 \sim 0.00006 \text{ eV}^2$$

Widmo mas (jedna z możliwości):



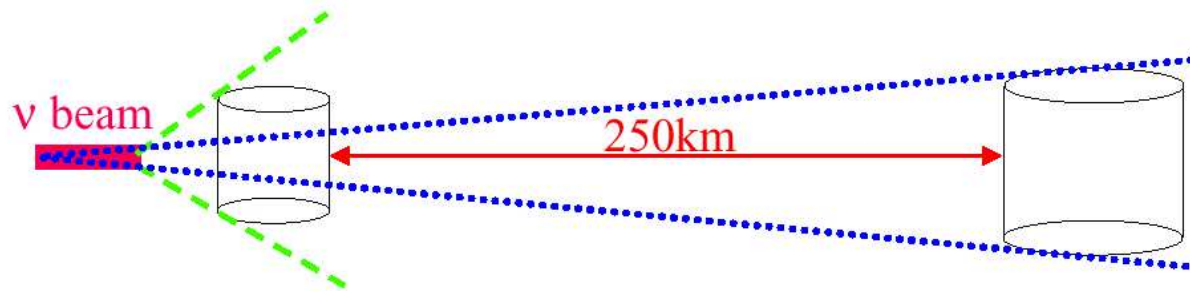
K2K

Doświadczenia z “długą bazą”

Wyniki pomiarów neutrin atmosferycznych obarczone są różnymi niepewnościami (promieniowanie kosmiczne, skład i gęstość atmosfery, struktura Ziemi)

Dlatego ostatecznego rozstrzygnięcia szukamy w doświadczeniach 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...

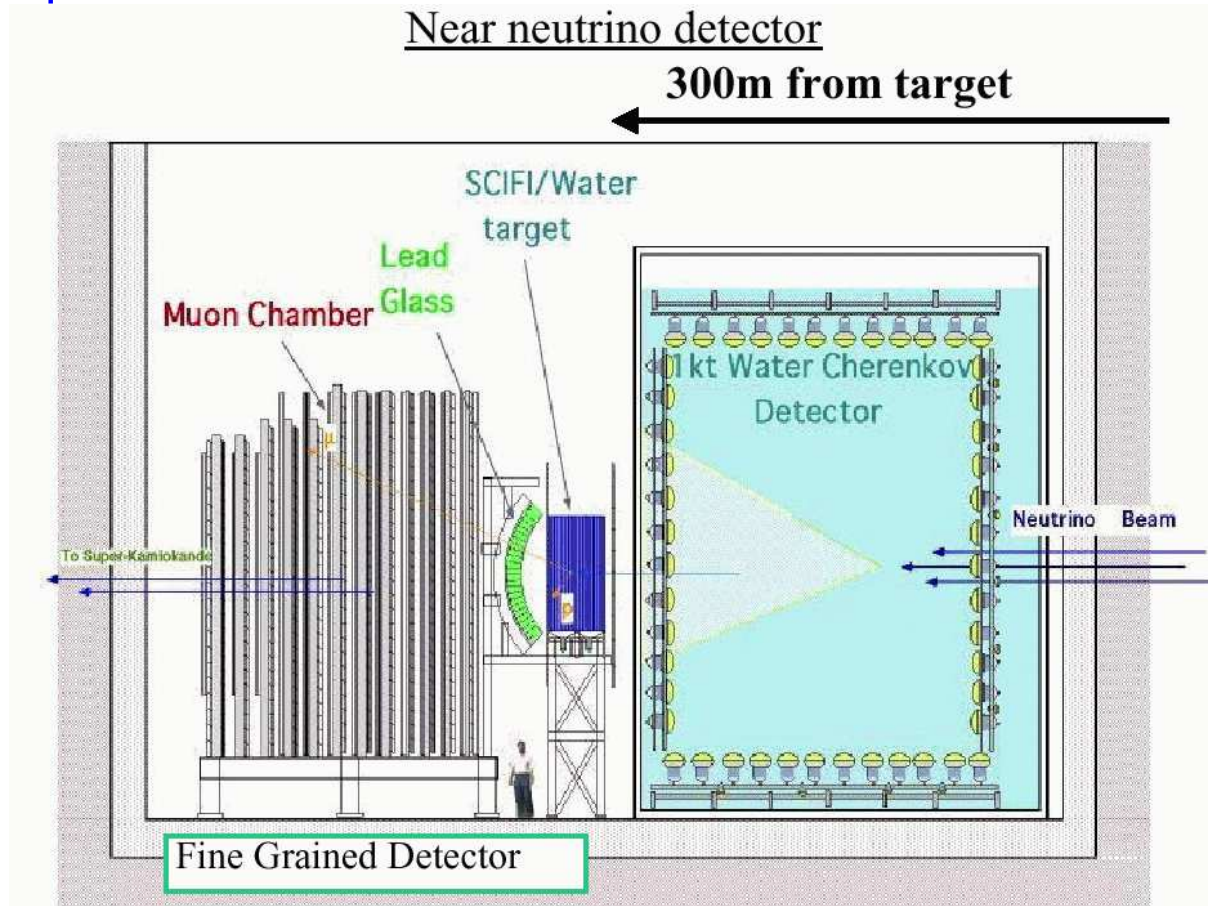
K2K

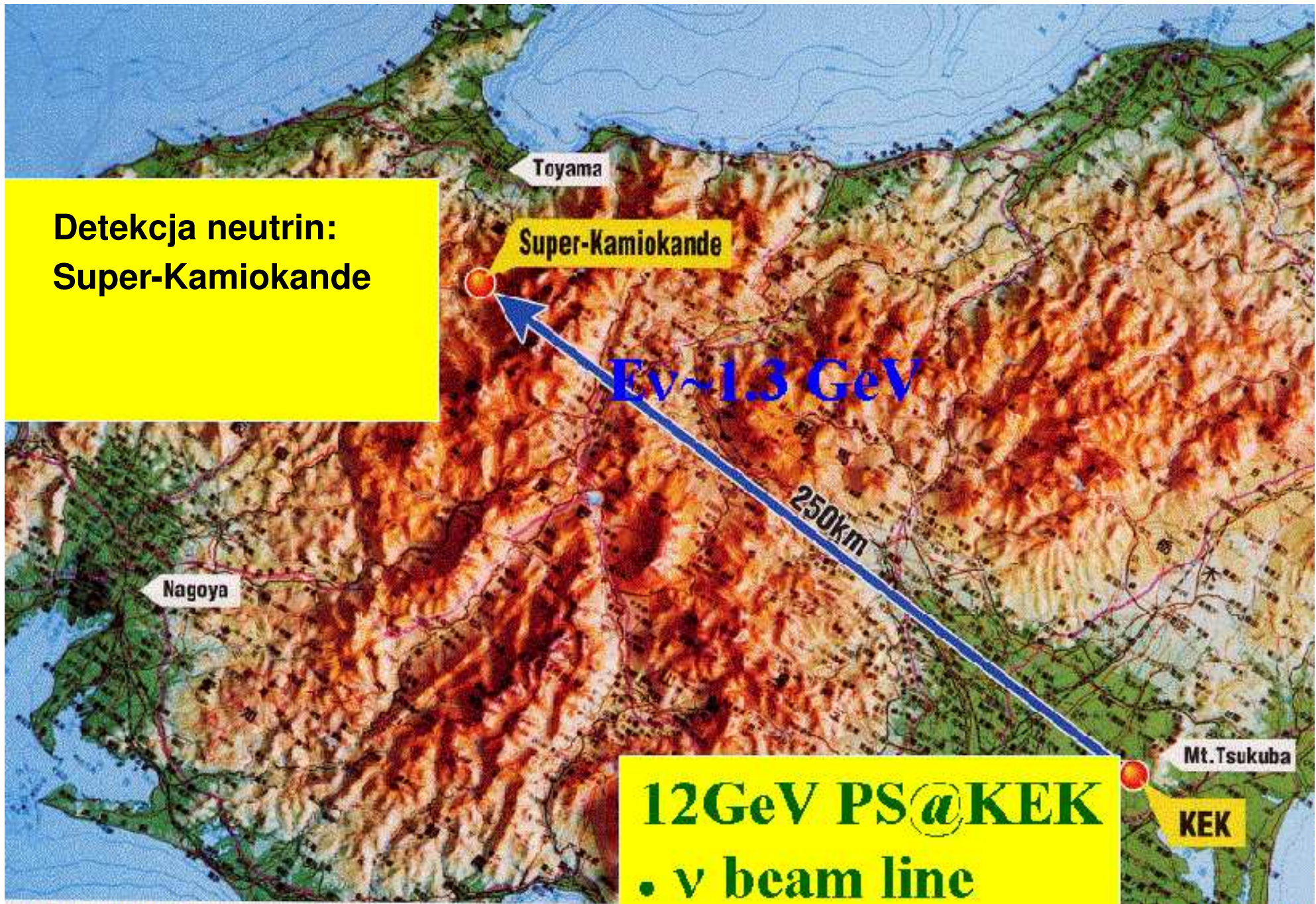
Eksperyment K2K

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

Wiązka ν_μ z laboratorium KEK ($\langle E_\nu \rangle \sim 1 \text{ GeV}$) 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 “miniaturę” Super-Kamiokande + detektor elektroniczny

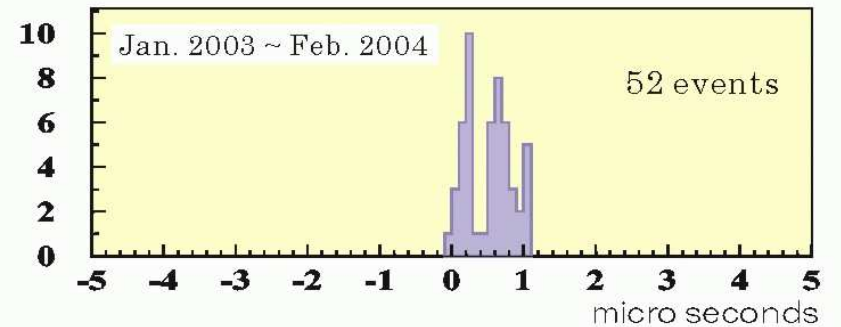
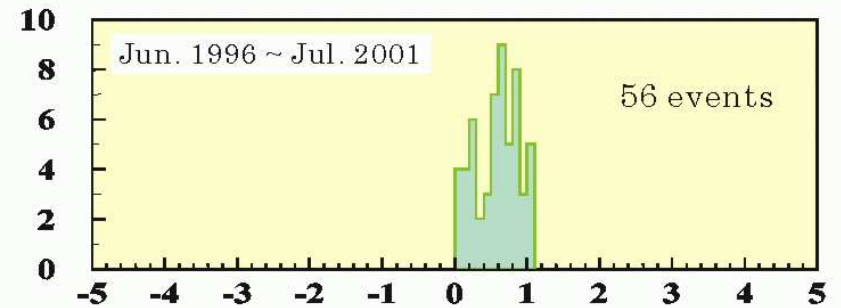
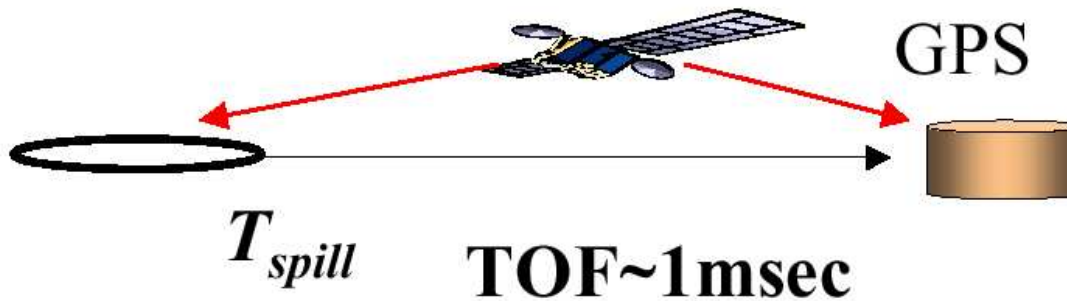




K2K

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

Wyniki pomiarów przeprowadzonych w okresie od czerwca 1999 do maja 2004:

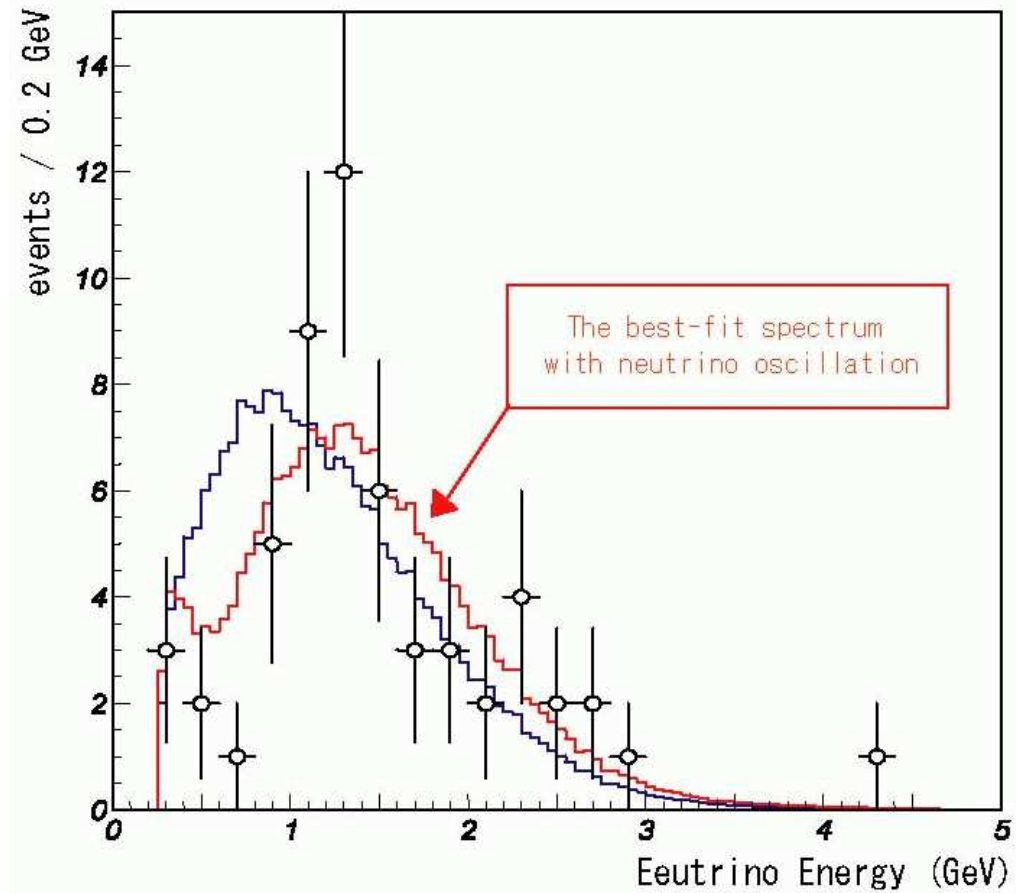
$$N_{obs} = 108$$

$$N_{exp} = 150.9_{-10.0}^{+11.6} \text{ (bez oscylacji)}$$

Prawdopodobieństwo fluktuacji
statystycznej: $\sim 10^{-4}$

Także kształt rozkładu energii wskazuje na
oscylacje \Rightarrow

Rozkład energii (po normalizacji)



K2K

Wyniki

Dopasowanie parametrów mieszania:

$$\sin^2 2\theta_{23} = 1.5$$

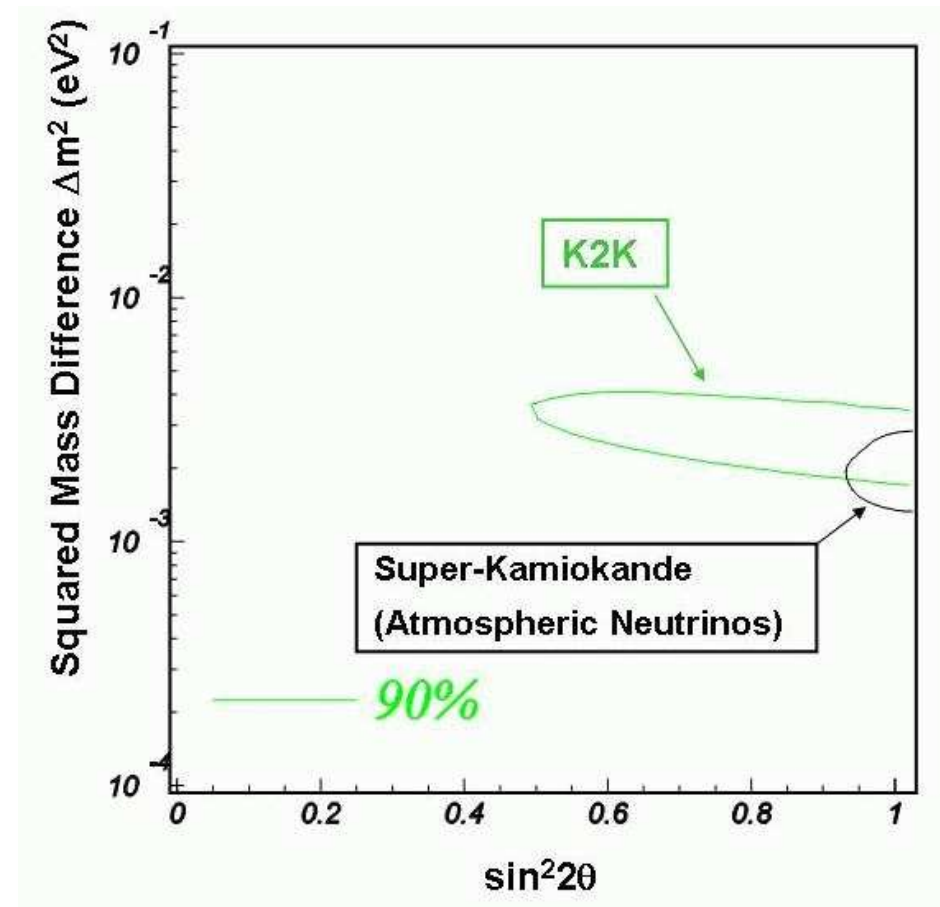
$$\Delta m_{23}^2 = 0.0022 \text{ eV}^2$$

Ograniczając się do wartości $\sin^2 2\theta_{23} \leq 1$:

$$0.0019 \text{ eV}^2 < \Delta m_{23}^2 < 0.0036 \text{ eV}^2$$

W bardzo dobrej zgodności z wynikami SK.

Porównanie wyników SK i K2K



MINOS

Nowy eksperyment z “długą bazą”.

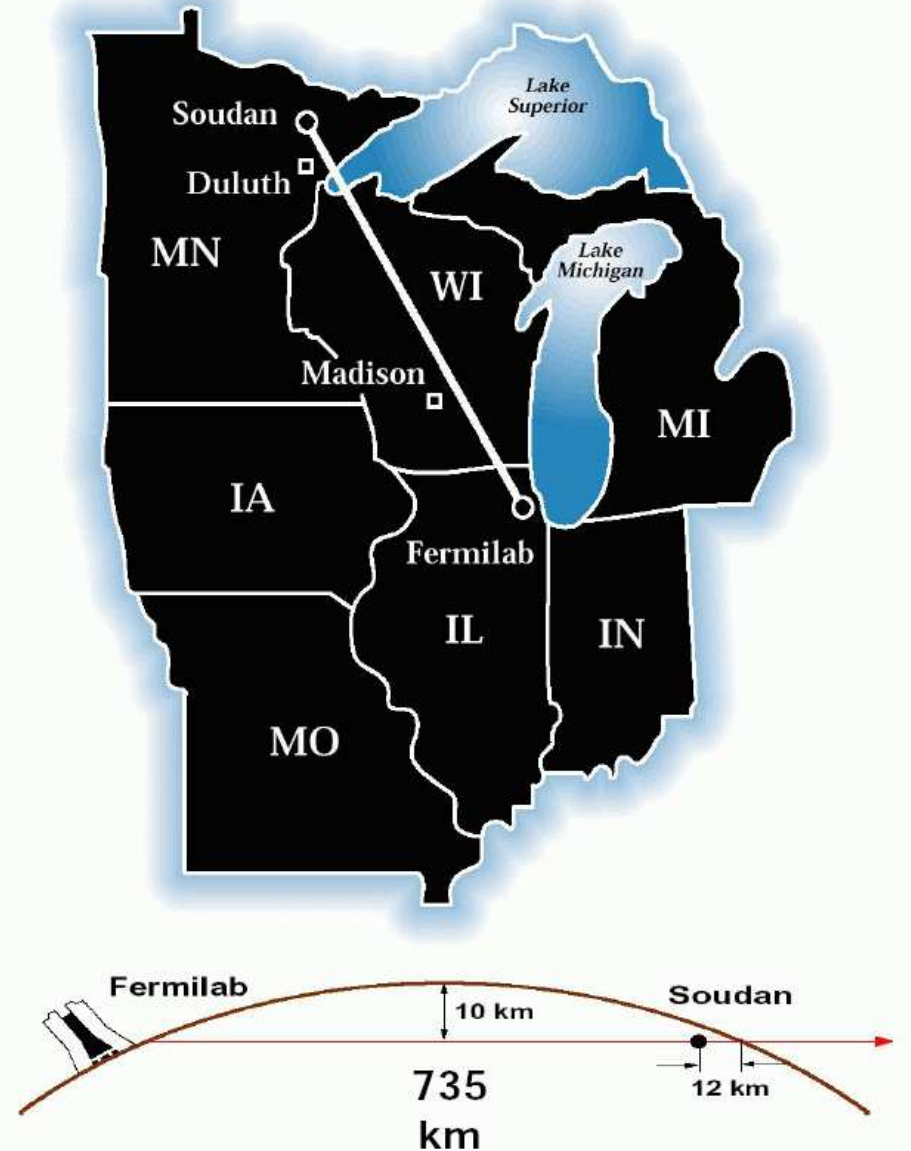
Uruchomiony 4 marca 2005 !

Wiązka neutrin z Fermilab

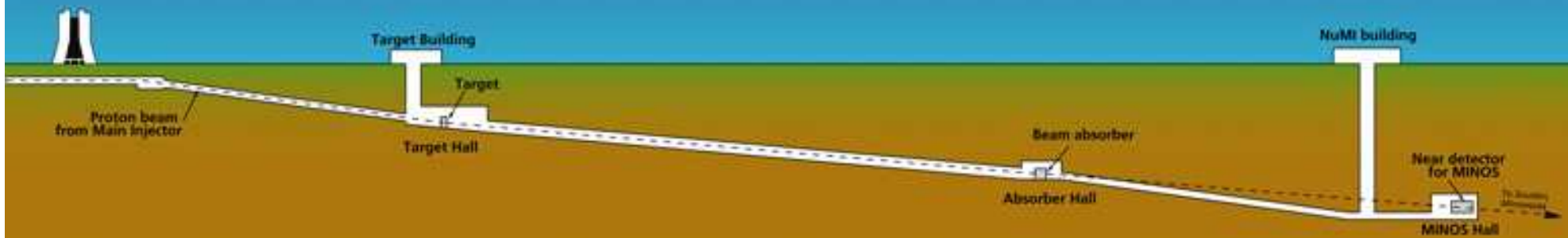
z rozpadów pionów powstających w zderzeniach protonów o energii 120 GeV skierowana do detektora w odległej o

735 km kopalni Soudan, Minesota

Drugi detektor o tej samej konstrukcji umieszczony bezpośrednio za układem tworzącym wiązkę.

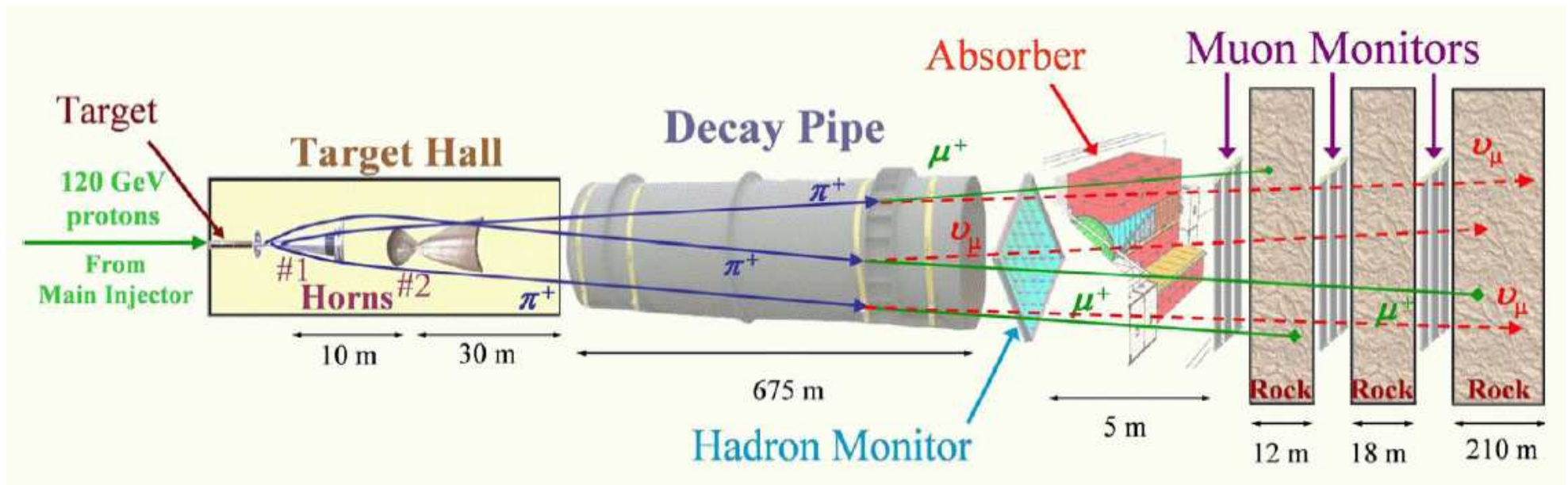


NuMI Tunnel Project



MINOS

Produkcja neutrin



Ruchoma tarcza pozwala na zmienianie energii wybieranych pionów \Rightarrow energii neutrin

MINOS

Detektory

Far Detector



Near Detector



“Daleki”

masa 5.4 kiloton

$8 \times 8 \times 30$ m

484 płyt stalowych / warstw scyntylatora

“Bliski”

masa 1 kiloton

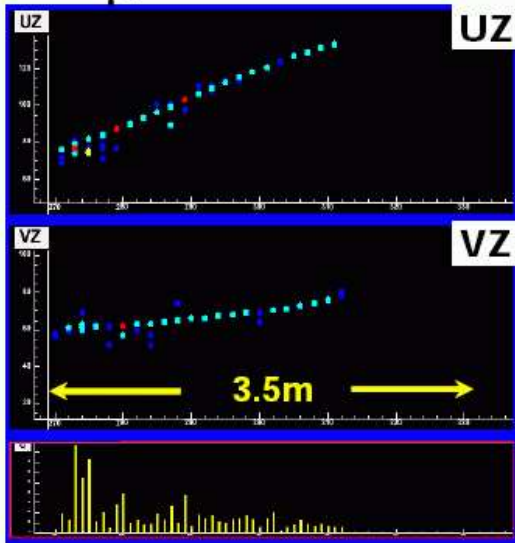
$3.8 \times 4.8 \times 15$ m

282 płyty stalowe + 153 warstwy scynt.

MINOS

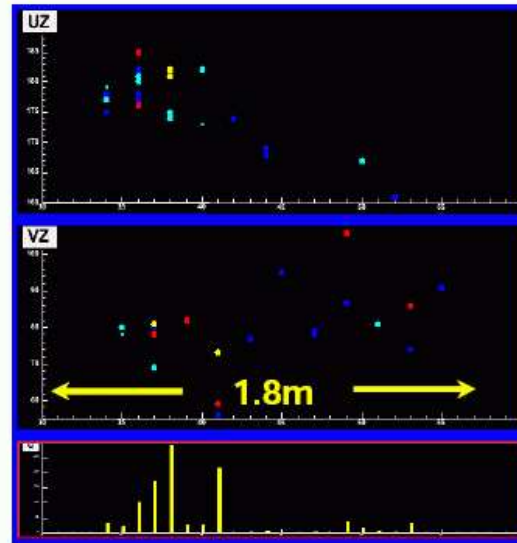
Przypadki

ν_μ CC Event



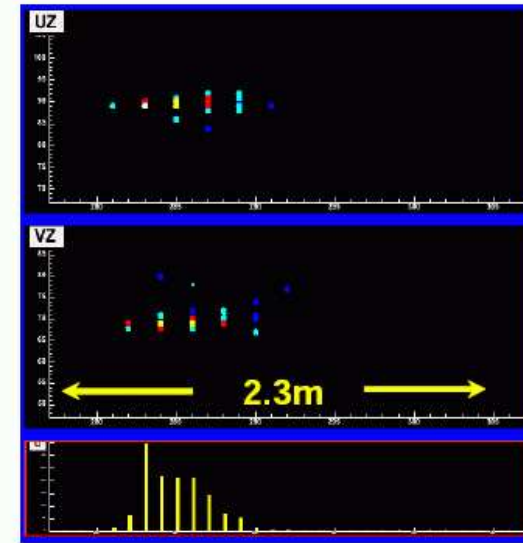
- long μ track + hadronic activity at vertex

NC Event



- short event, often diffuse

ν_e CC Event



- short, with typical EM shower profile

$$E_v = E_{\text{shower}} + P_\mu$$

55%/√E

6% range, 10% curvature

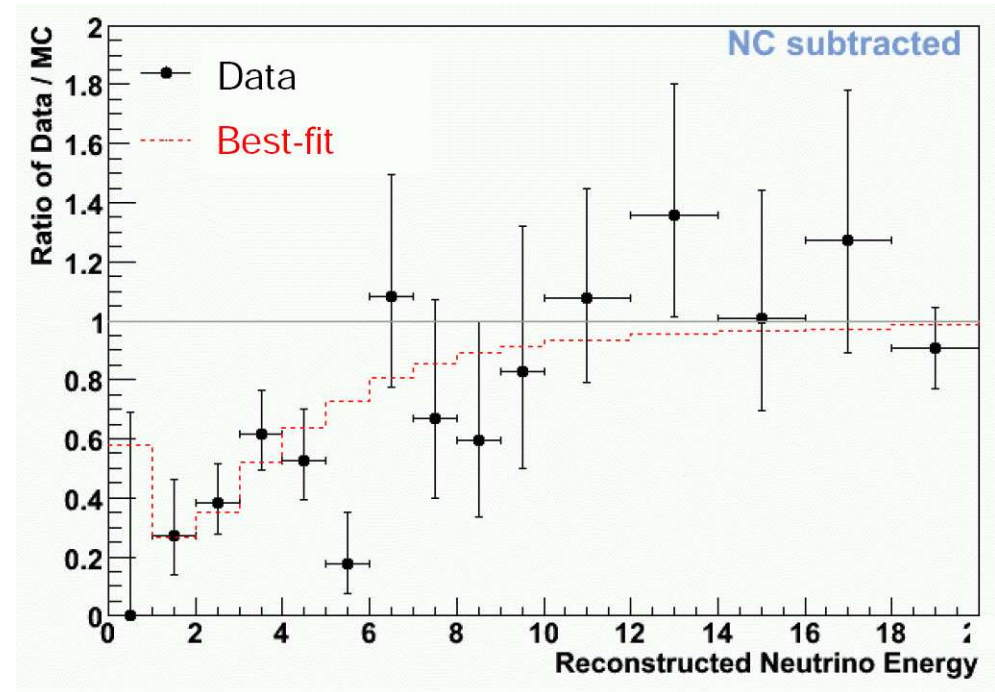
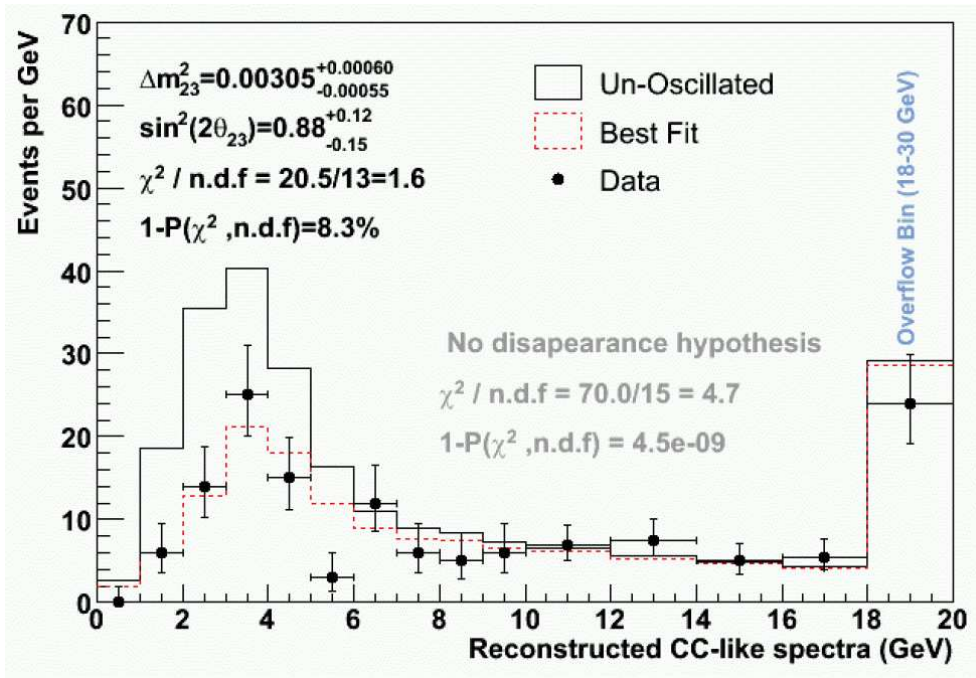
MINOS

Wyniki 30 marca 2006 !

Wszystkie przypadki CC: 298 ± 15 oczekiwanych (ν_μ i $\bar{\nu}_\mu$), 204 obserwowane (69%)

ν_μ poniżej 10 GeV: 177 ± 11 oczekiwanych, 92 obserwowane (52%) - efekt 5σ !

Rozkłady energii:



MINOS

Wyniki

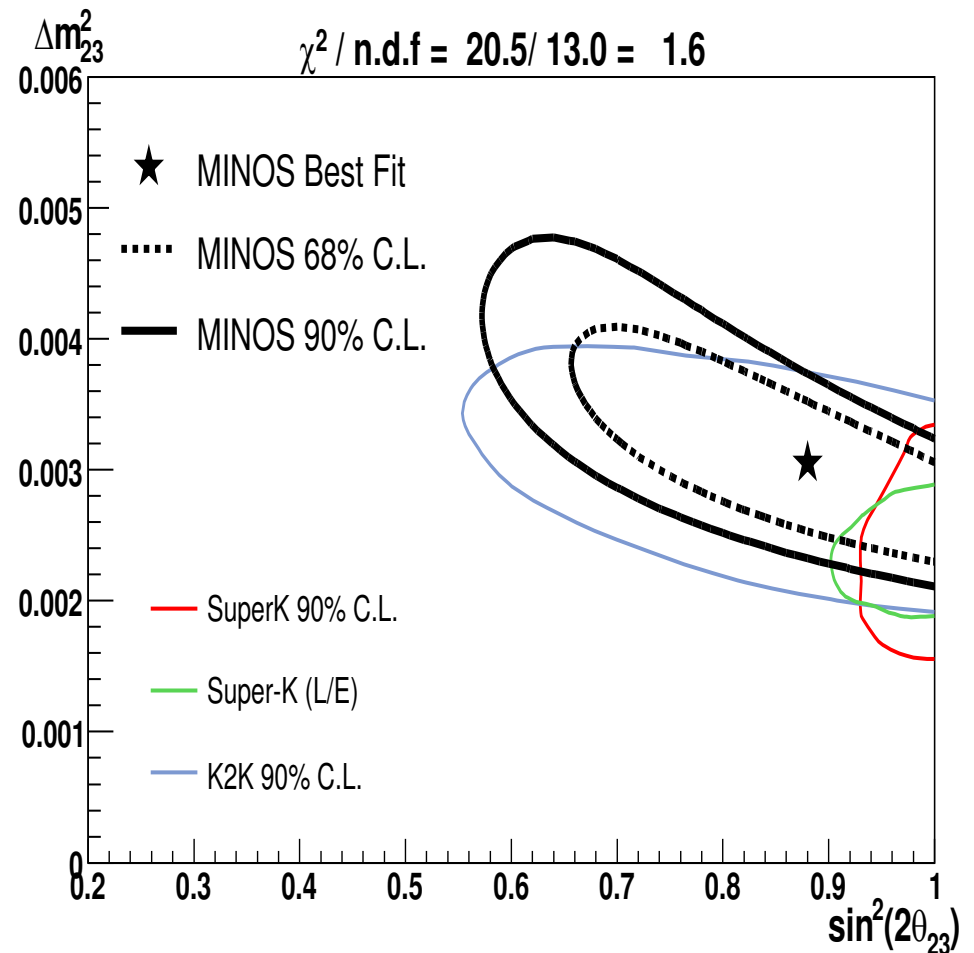
Dopasowanie parametrów mieszania neutrin:

$$\sin^2 2\theta_{23} = 0.88^{+0.12}_{-0.15} \pm 0.06$$

$$\Delta m_{23}^2 = 3.05^{+0.60}_{-0.55} \pm 0.12 \cdot 10^{-3} \text{ eV}$$

Zgodne z wynikami SK i K2K

Już po roku zbierania danych precyzja porównywalna z K2K...



Kamland

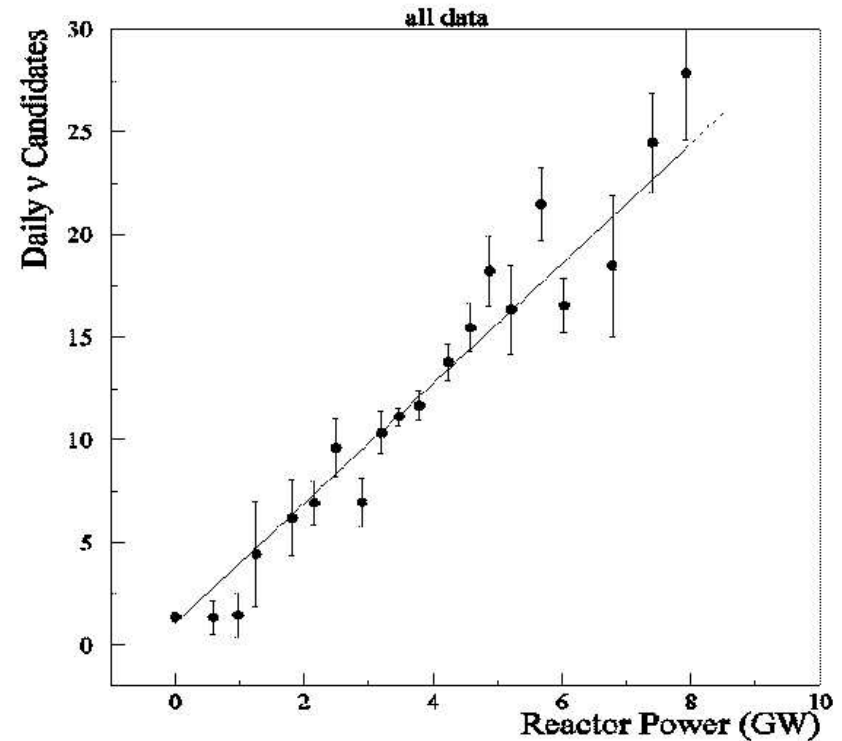
Wyniki SK i SNO wskazują, że obserwowany **deficyt** neutrin słonecznych jest rezultatem **oscylacji** - “przemiany” ν_e w inne rodzaje neutrin (ν_μ i ν_τ).

Chcielibyśmy jednak **sprawdzić** obserwowany efekt w warunkach “laboratoryjnych”, podobnie jak w przypadku neutrin atmosferycznych (**doświadczenia z “długą bazą”**).

Intensywną “wiązkę” **anty-neutrin** elektronowych otrzymujemy z **reaktorów jądrowych** (z rozpadów neutronów).

Strumień neutrin jest **proporcjonalny do mocy** reaktora i można go dość dokładnie wyliczyć.

Wyniki eksperymentu **CHOOZ** \Rightarrow



Kamland

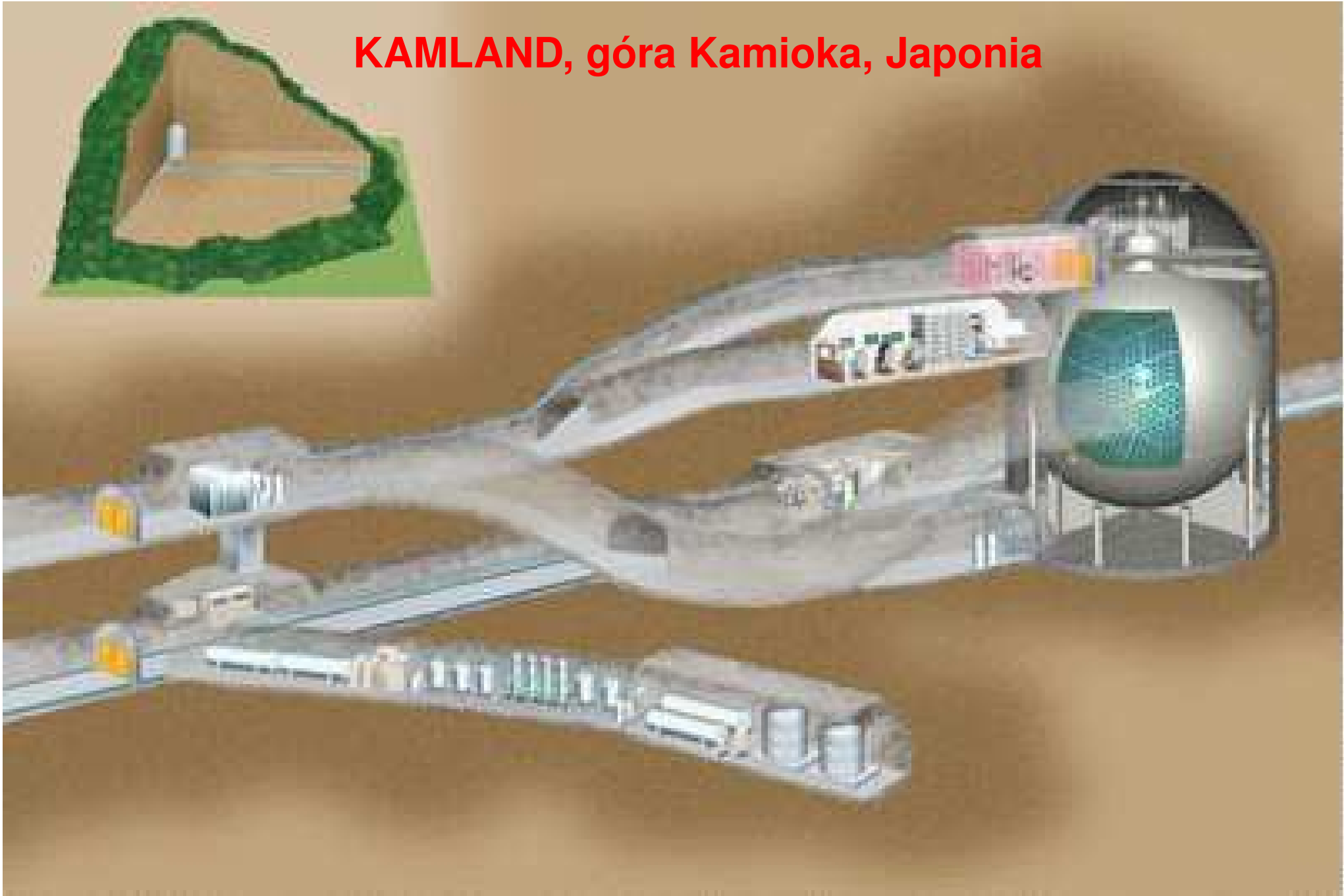
Eksperyment Kamland



“Wymarzonym” miejscem na tego typu eksperyment jest **Japonia** - “mocarstwo” energetyki atomowej.

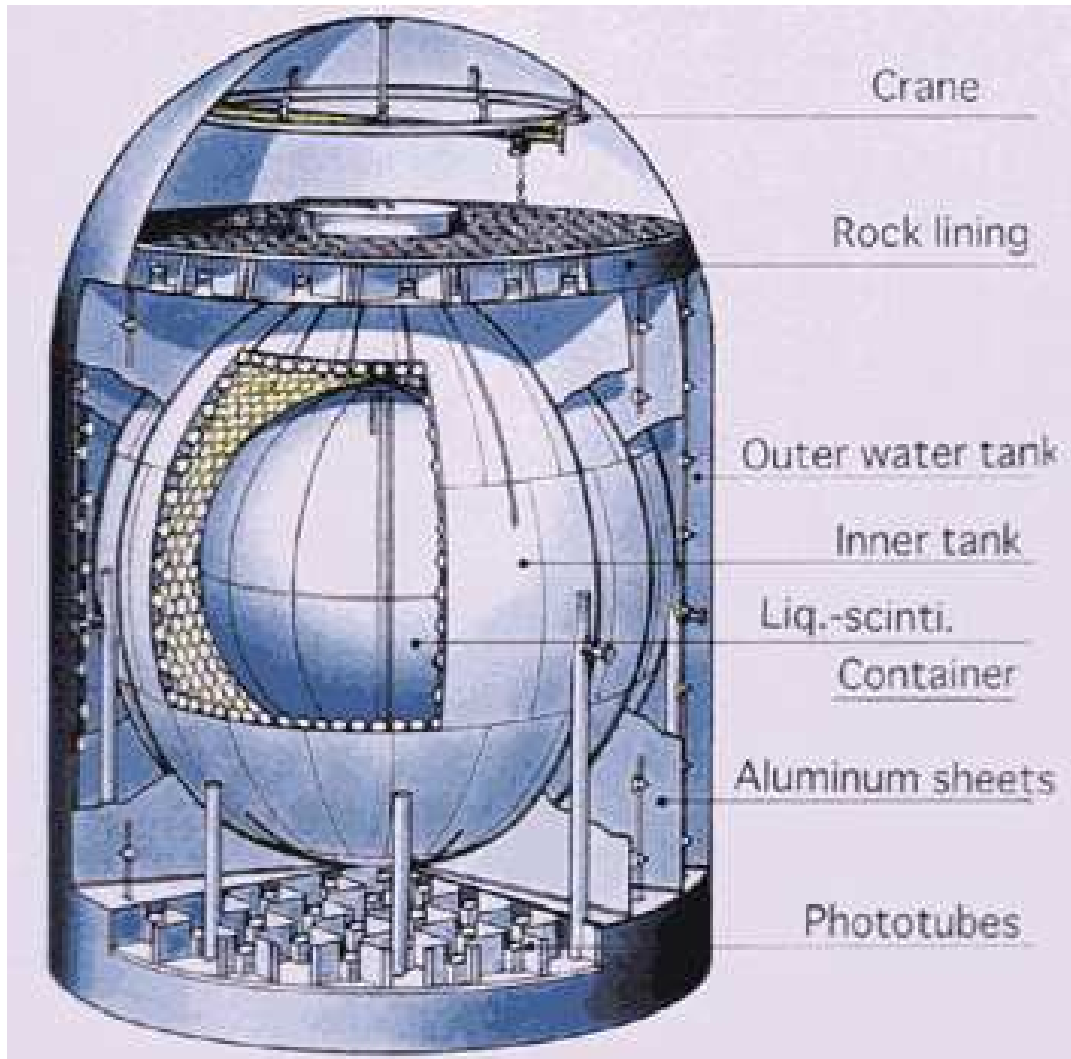
Eksperyment **Kamland** został zbudowany w miejscu starego eksperymentu **Kamiokande**, poprzednika **Super-Kamiokande**.

KAMLAND, góra Kamioka, Japonia



Kamland

Detektor Kamland



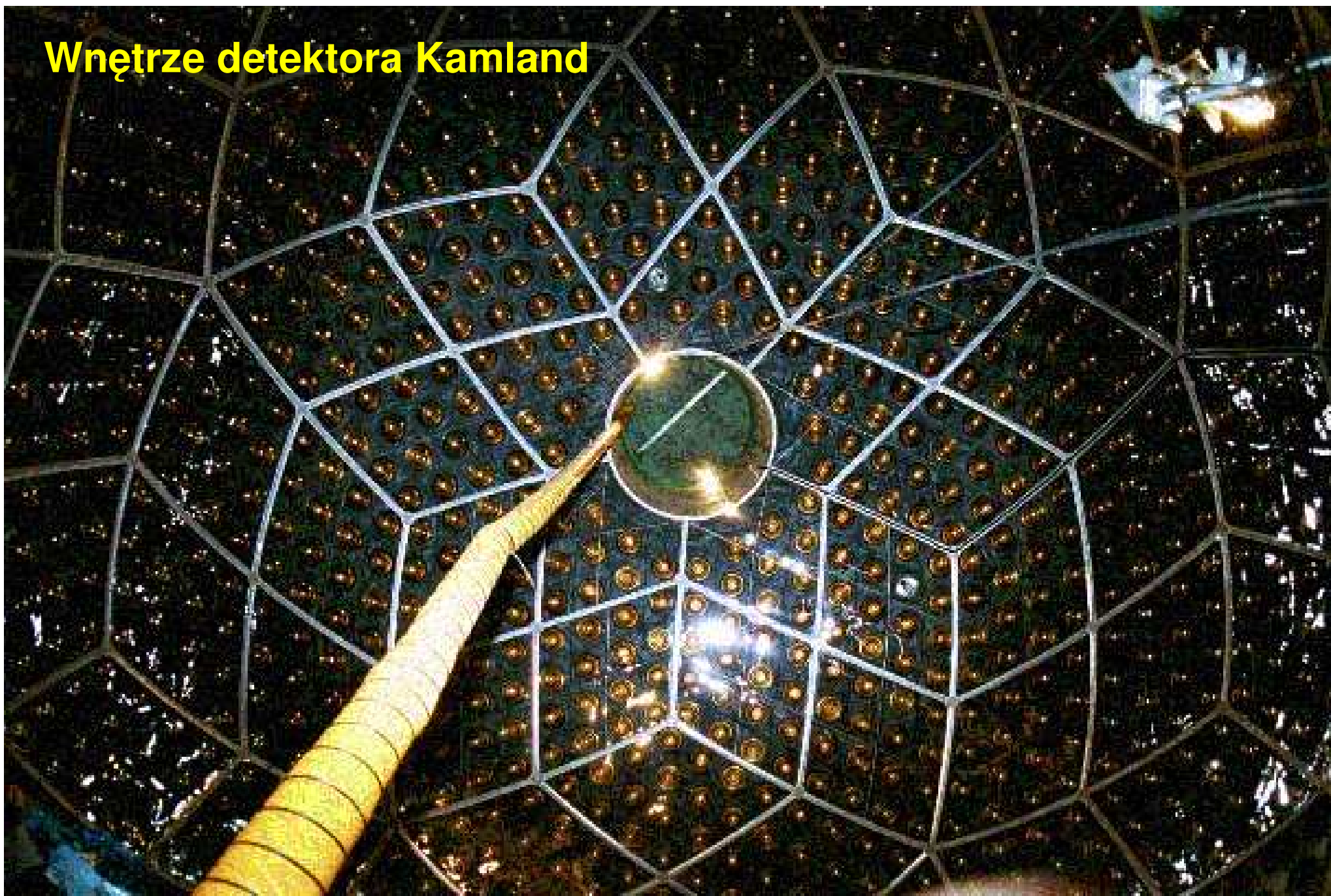
Budowa podobna do SNO:

- 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



Wnętrze detektora Kamland



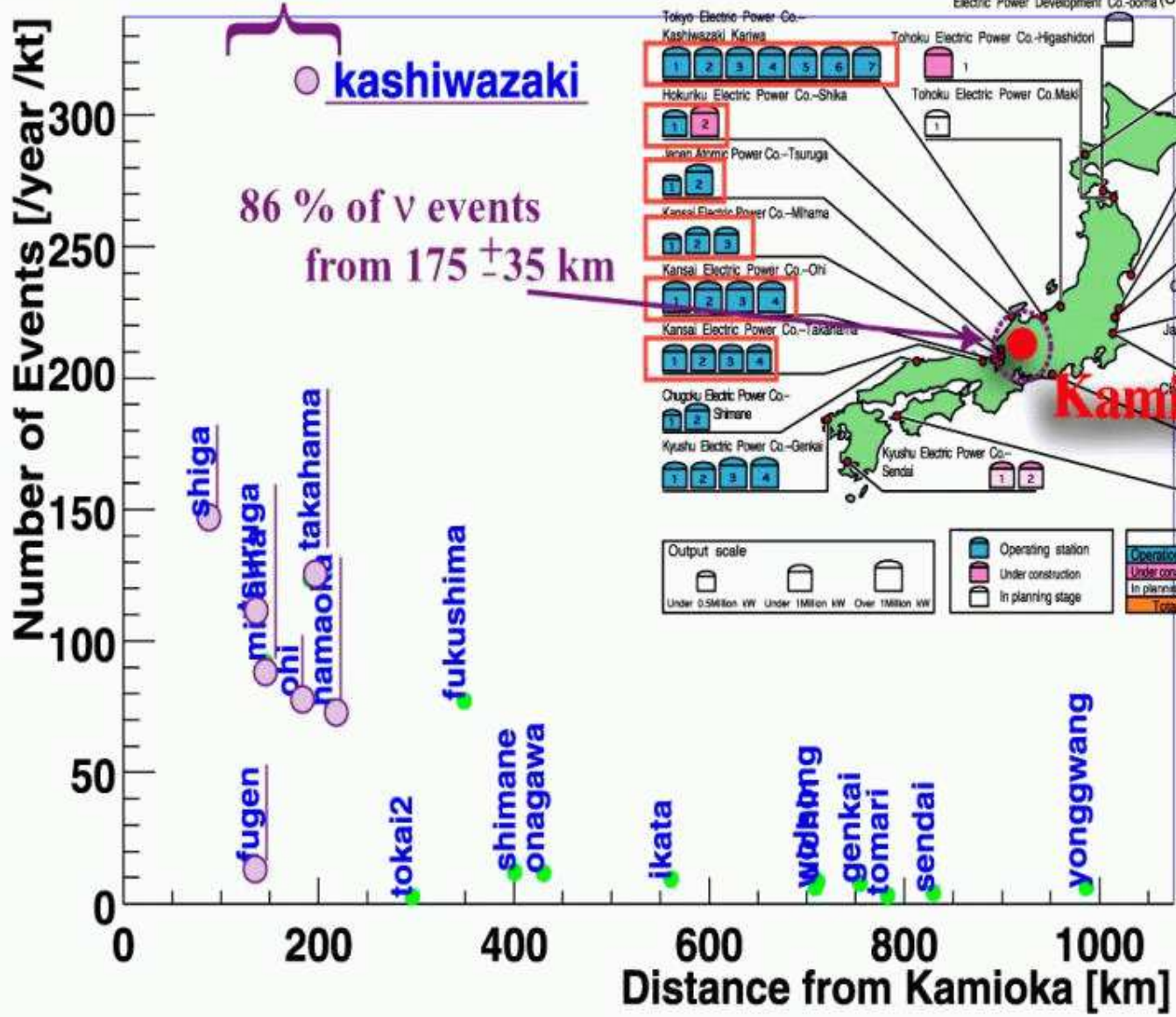
Większość neutrin
 przychodzi z
 odległości
 140–210 km.

Bliżej:
 brak reaktorów

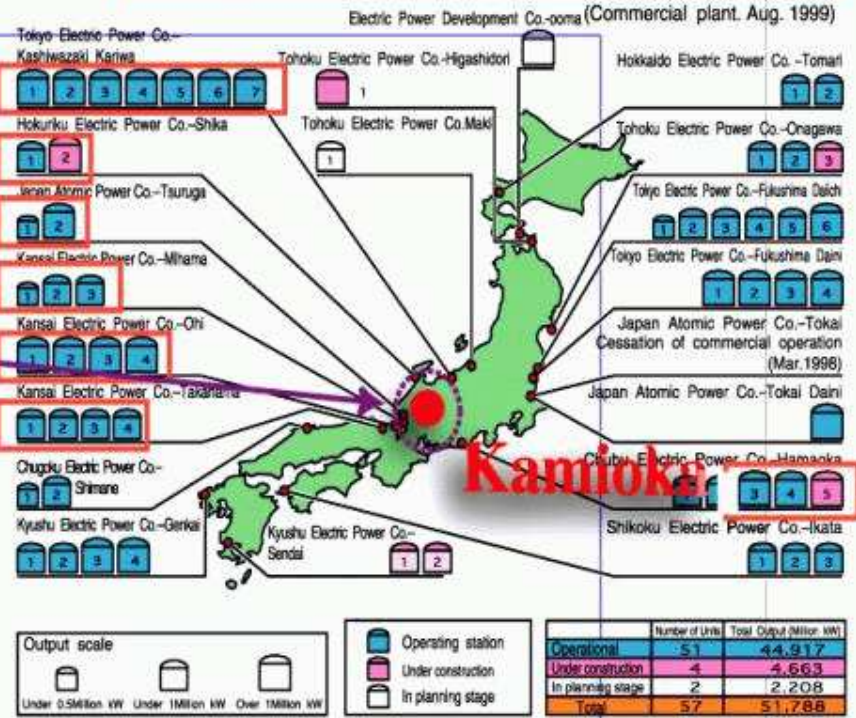
Dalej:
 strumień $\sim \frac{1}{R^2}$

20 % of world nuclear power

~ 70 GW



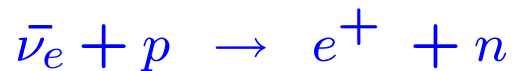
Nuclear Power Stations in Japan



Kamland

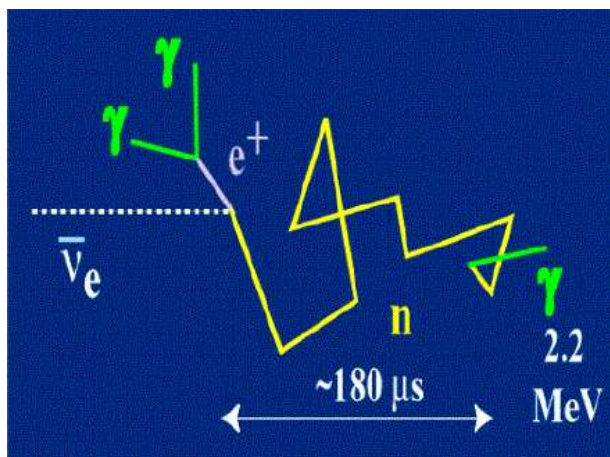
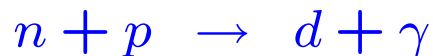
Selekcja przypadków

W oddziaływaniach **antyneutrino**

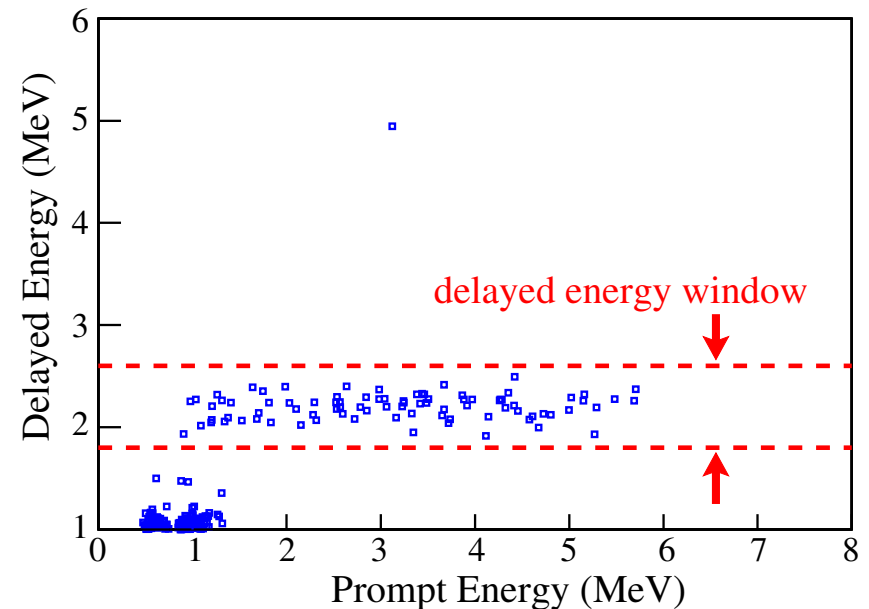


spodziewamy się:

- 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

Kamland

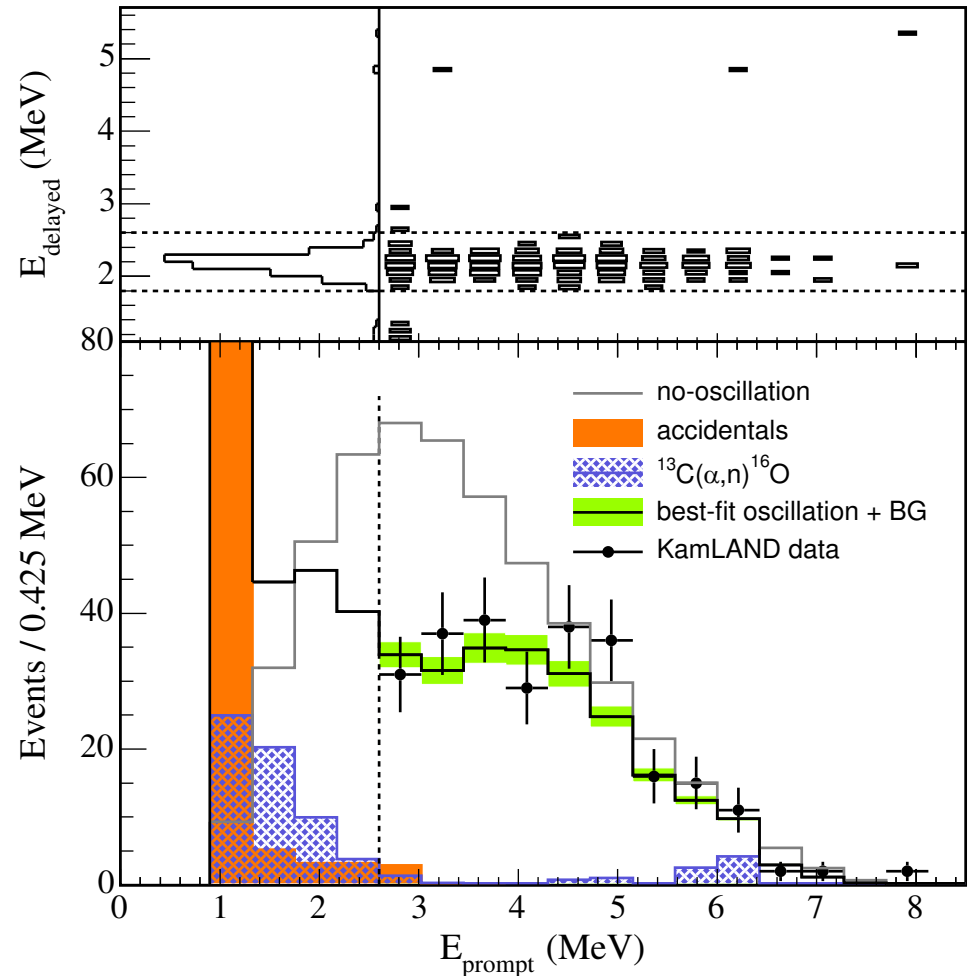
Wyniki

Liczba zarejestrowanych przypadków oddziaływania anty-neutrino elektronowych po 2 latach działania detektora

- oczekiwana: 365.2 ± 23.7
- w tym tła: 17.8 ± 7.3
- zmierzona: 258

$$\frac{N_{obs} - N_{BG}}{N_{exp}} = 0.658 \pm 0.044 (stat) \pm 0.047 (sys)$$

Wyraźny efekt “znikania” $\bar{\nu}_e$



Kamland

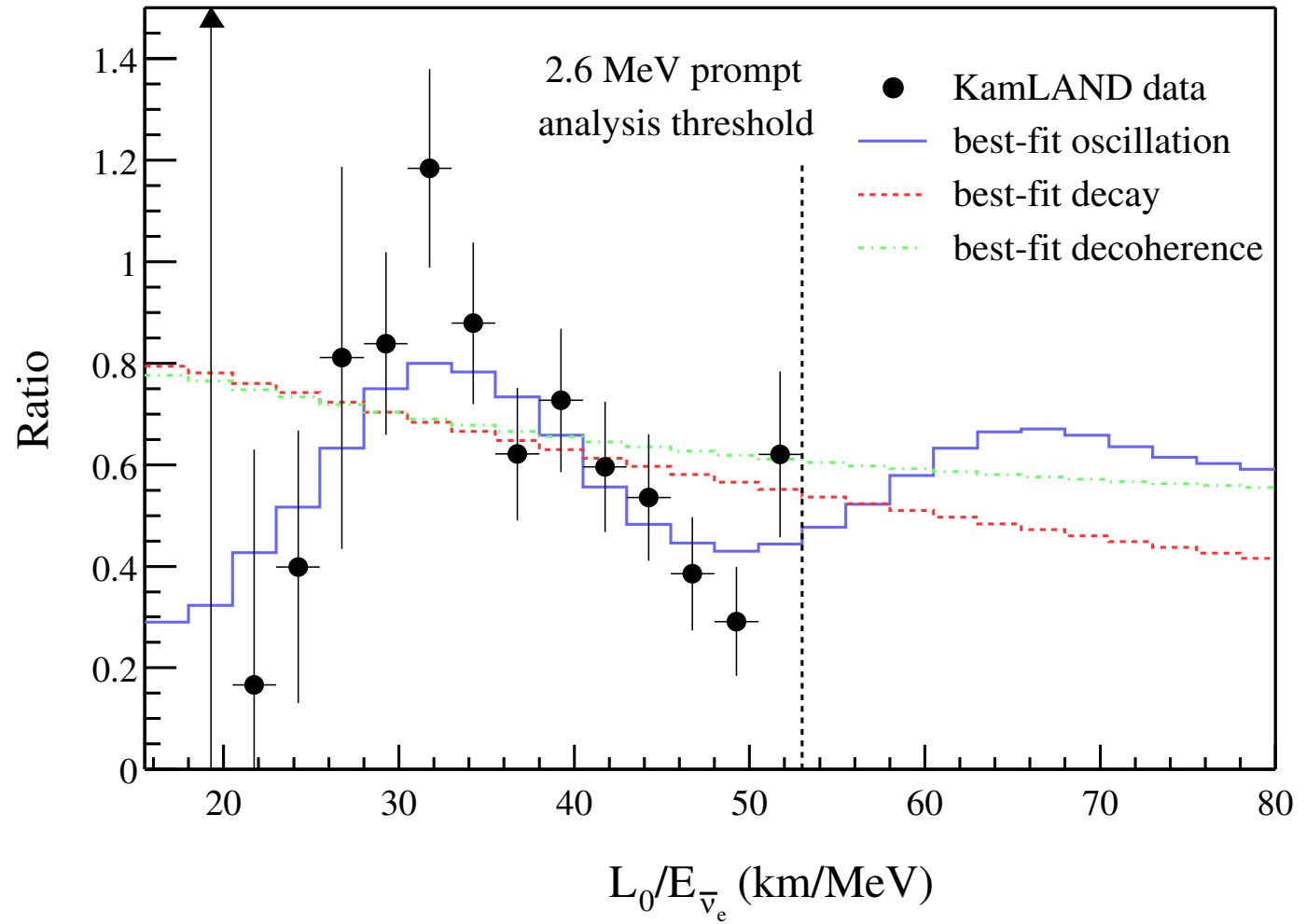
Wyniki

Wyraźne oscylacje
widoczne w stosunku
mierzonego do oczeki-
wanego rozkładu $L/E \Rightarrow$

Dopasowanie:

$$\Delta m^2 = 7.9 \cdot 10^{-5} eV^2$$

$$\tan^2 \theta = 0.46$$

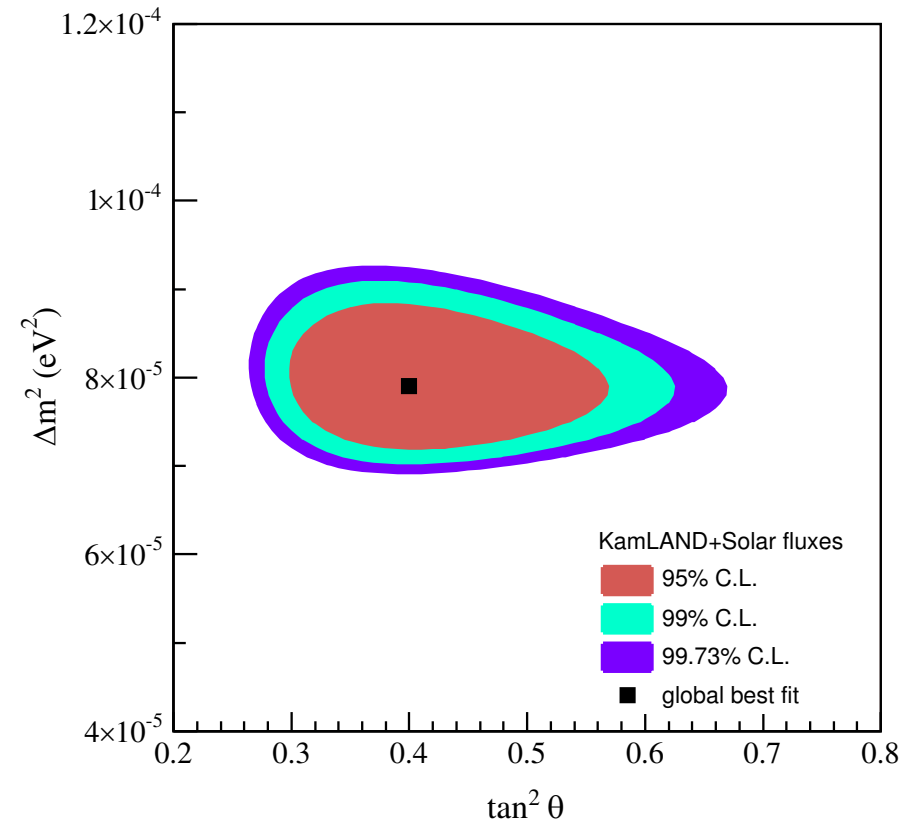
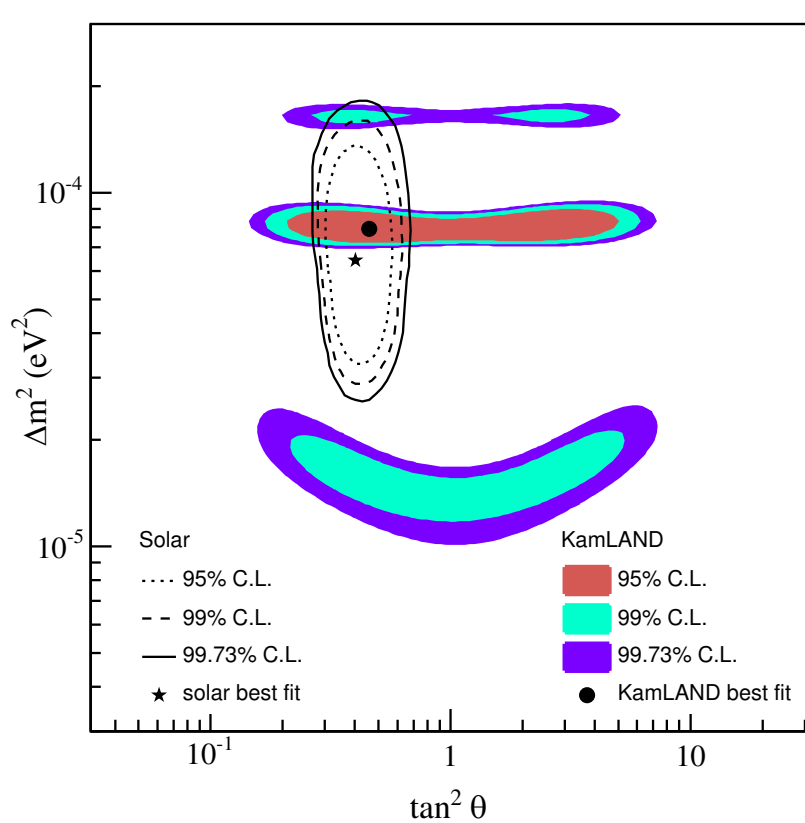


Kamland

Wyniki

Łączna analiza danych KamLAND i pomiarów neutrin słonecznych

$$\Delta m^2 = 7.9_{-0.5}^{+0.6} \cdot 10^{-5} eV^2, \quad \tan^2 \theta = 0.40_{-0.07}^{+0.10}$$



Badania neutrin

Perspektywy

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).

Nowe eksperymenty

AMANDA

(Antarctic Muon And Neutrino Detector Array)

677 modułów na 19 “strunach”,
1500–2000 m pod lodem (biegun południowy)

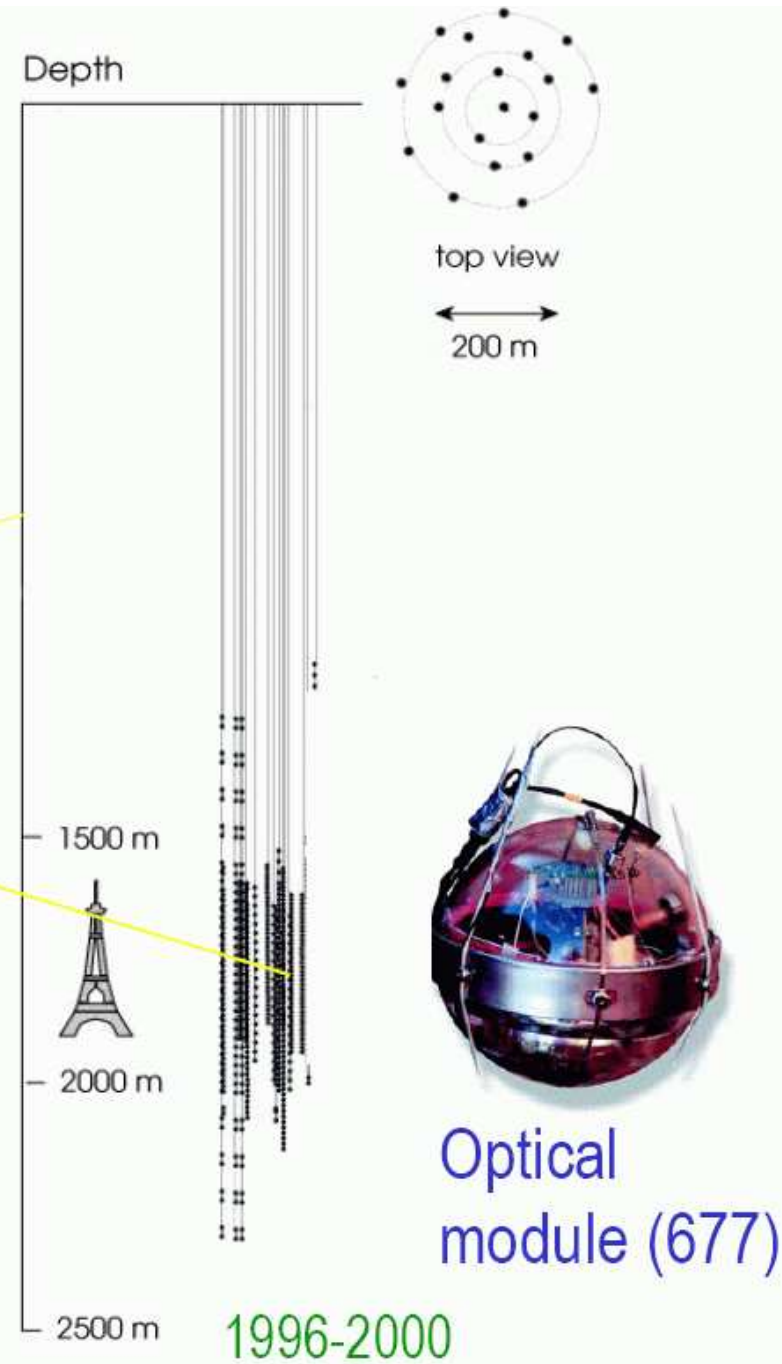
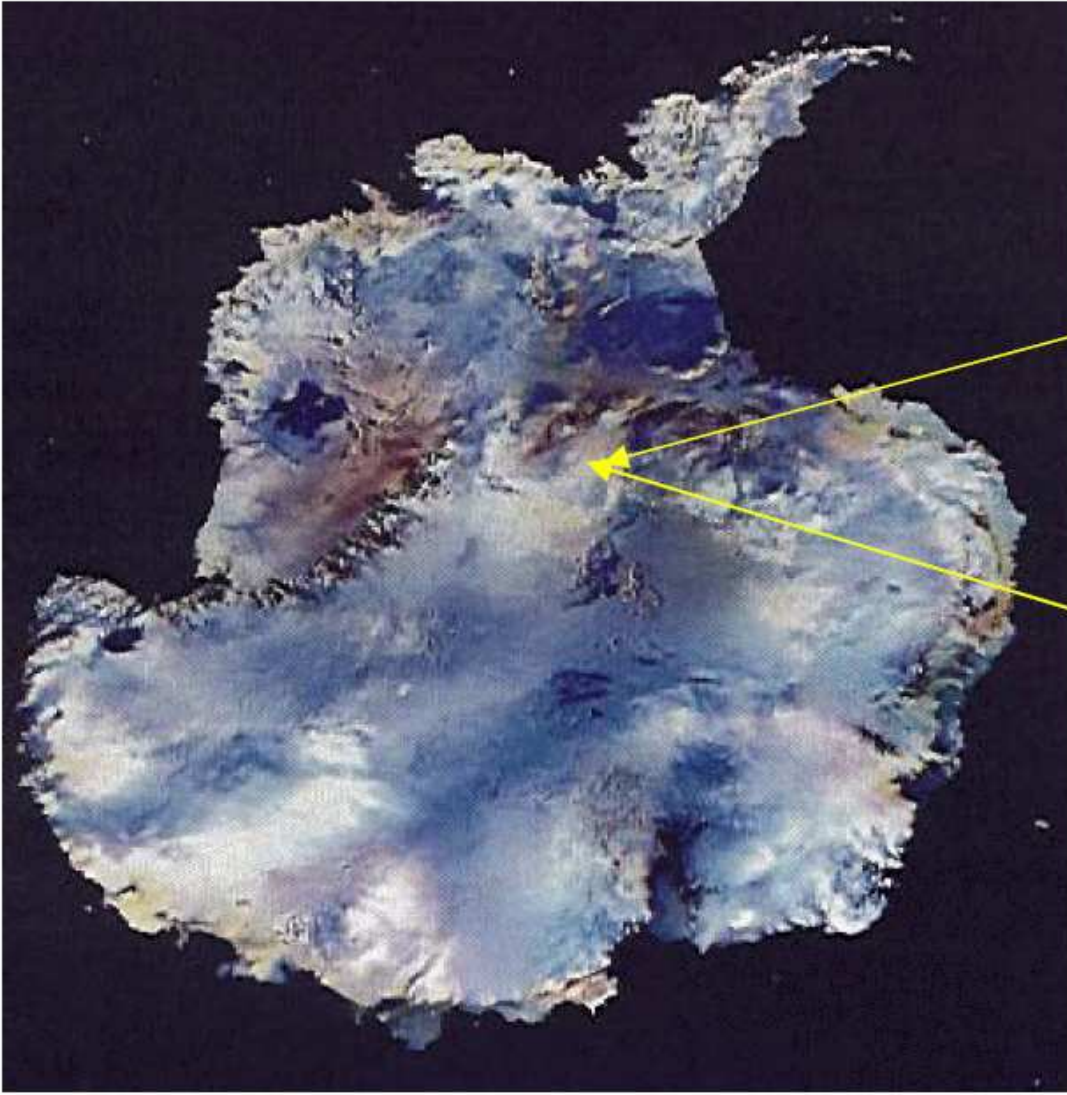
promieniowanie Czerenkowa mierzone przez
skierowane do dołu fotopowielacze

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

Rejestracja mionów o energiach ≥ 50 GeV.



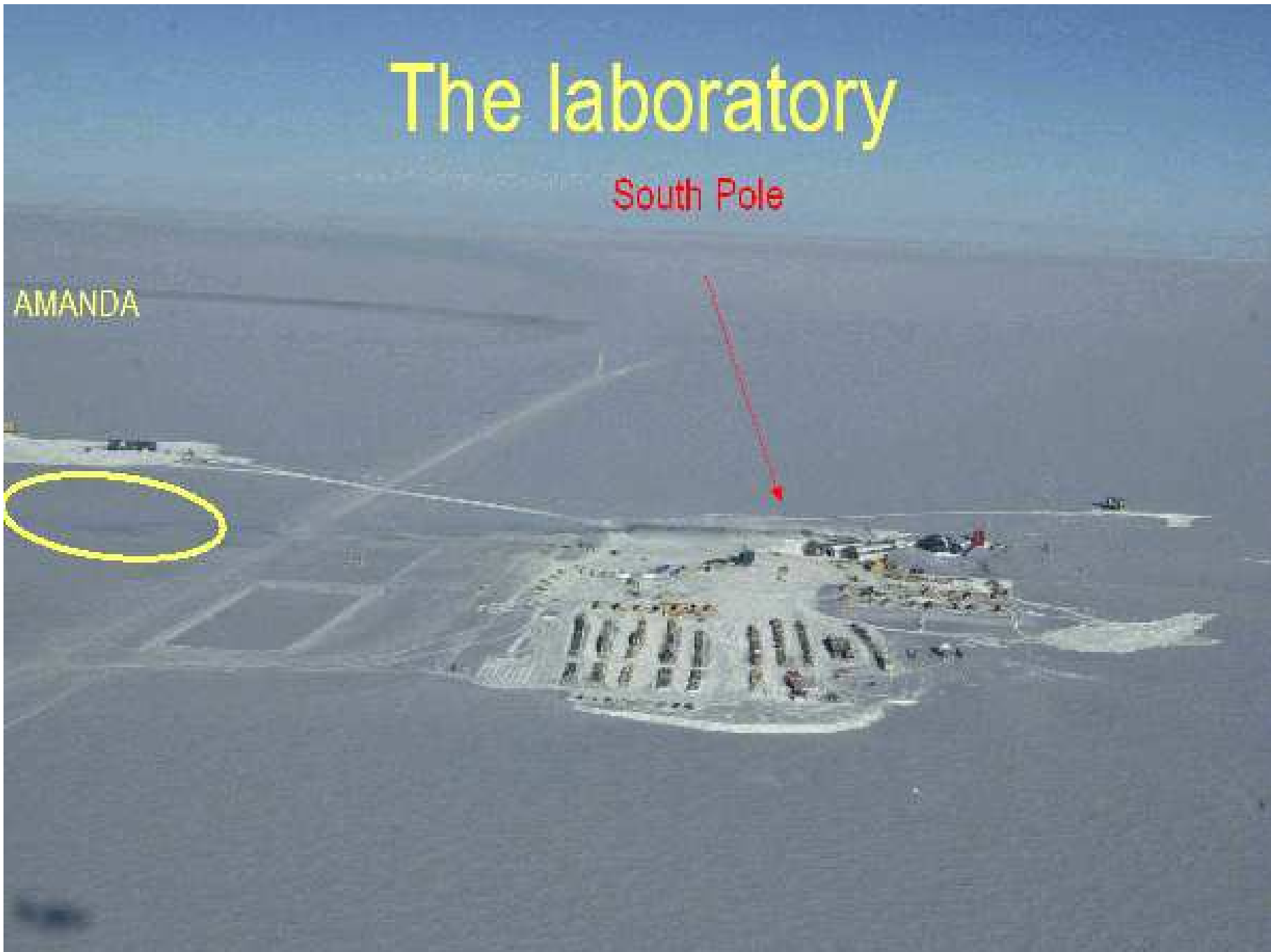
Eksperyment AMANDA w Amundsen-Scott Station South Pole



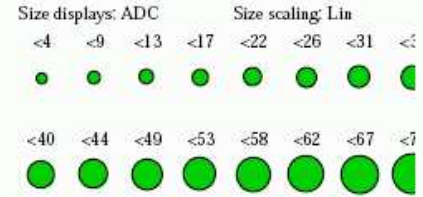
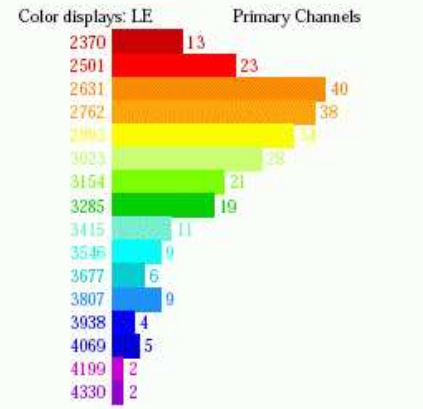
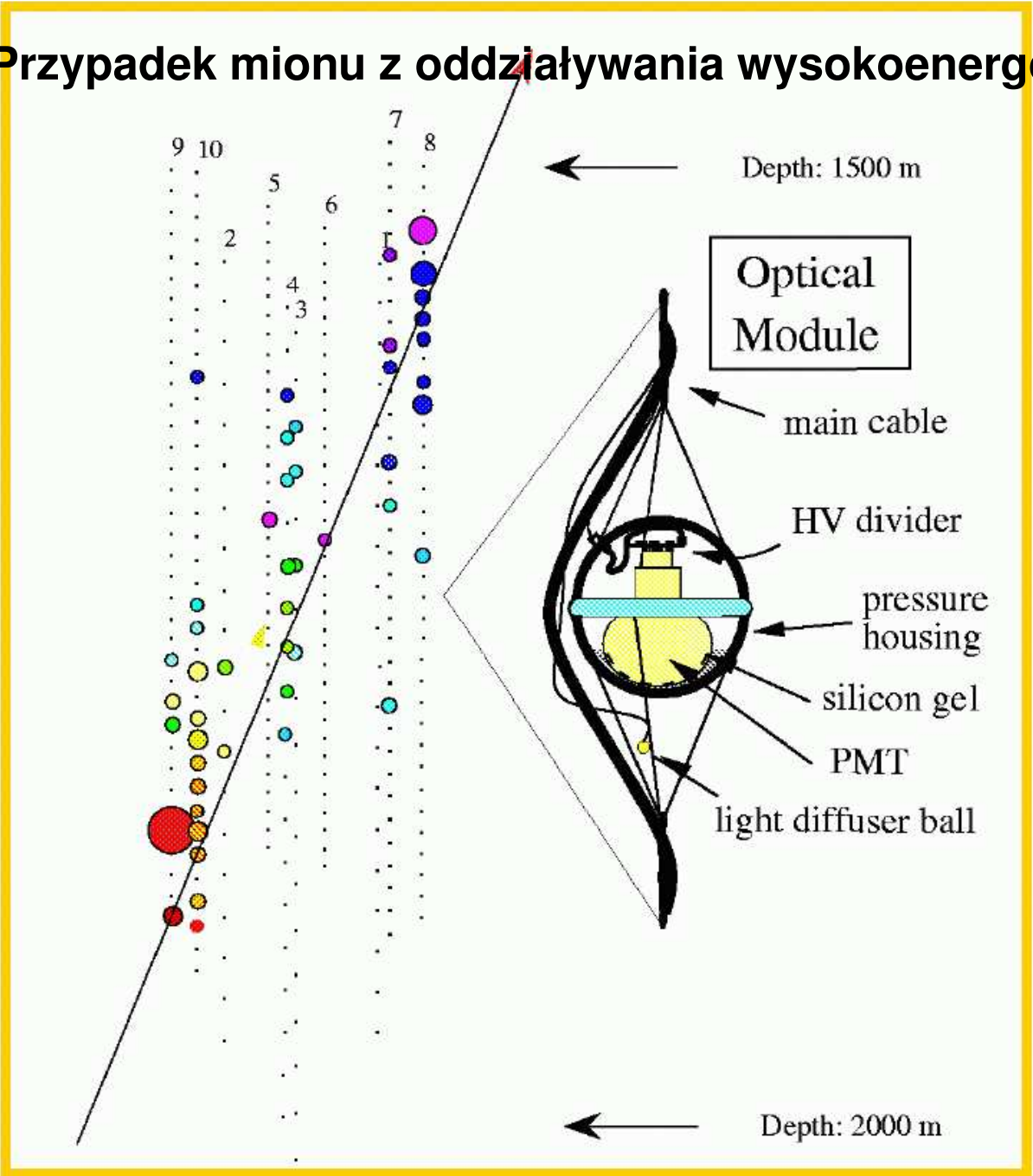
The laboratory

South Pole

AMANDA



Przypadek mionu z oddziaływania wysokoenergetycznego neutrina



No external geometry file is opened.
 Detector: amanda-b-10, 19 strings, 680 modules
 Data file: he_defeff2k
 Displaying data event 1425281 from run 336
 Recorded yr/dy: 2000/170
 59857.5405130 seconds past midnight.
 Before cuts : 264 hits, 264 OMs
 After cuts : 264 hits, 264 OMs

200 TeV ν_e candidate

AMANDA

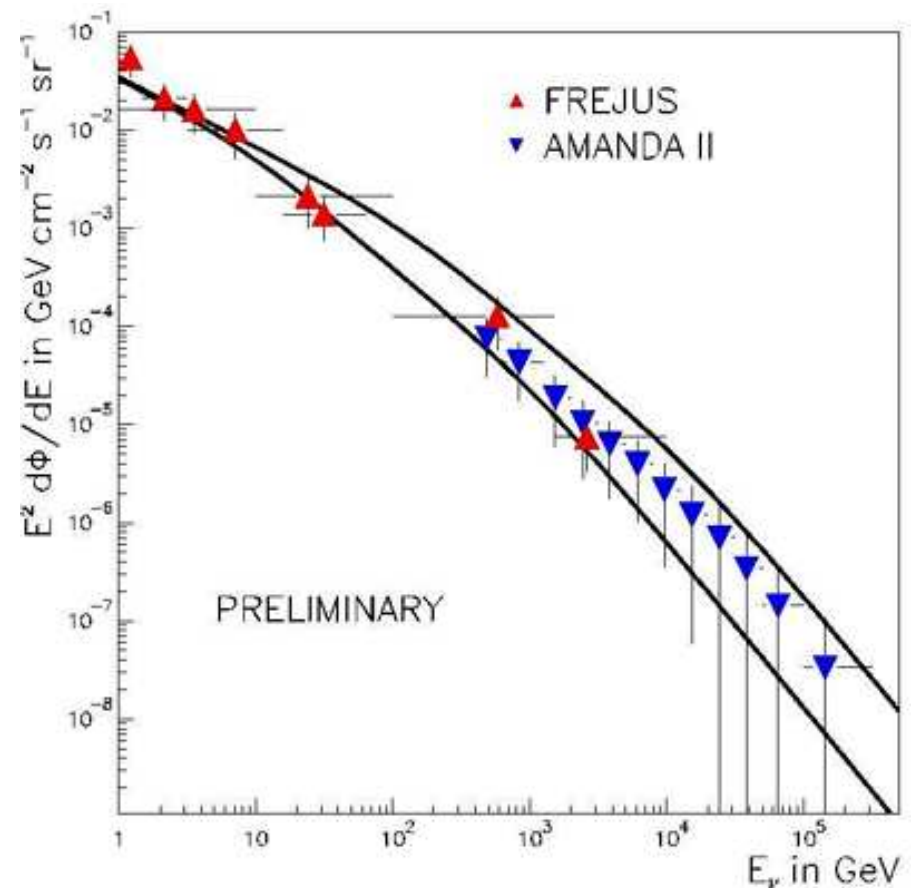
Badania

Duże odległości między licznikami powodują, że detektor czuły jest tylko na neutrina o bardzo wysokiej energii - wyprodukowane w ich oddziaływaniach cząstki muszą mieć zasięg porównywalny z rozmiarami detektora.

Poszukiwanie neutrin stowarzyszonych z:

- wybuchami supernowych
- błyskami gamma (GRB)
- gwiazdami neutronowymi
- ...

Mierzony rozkład energii neutrin

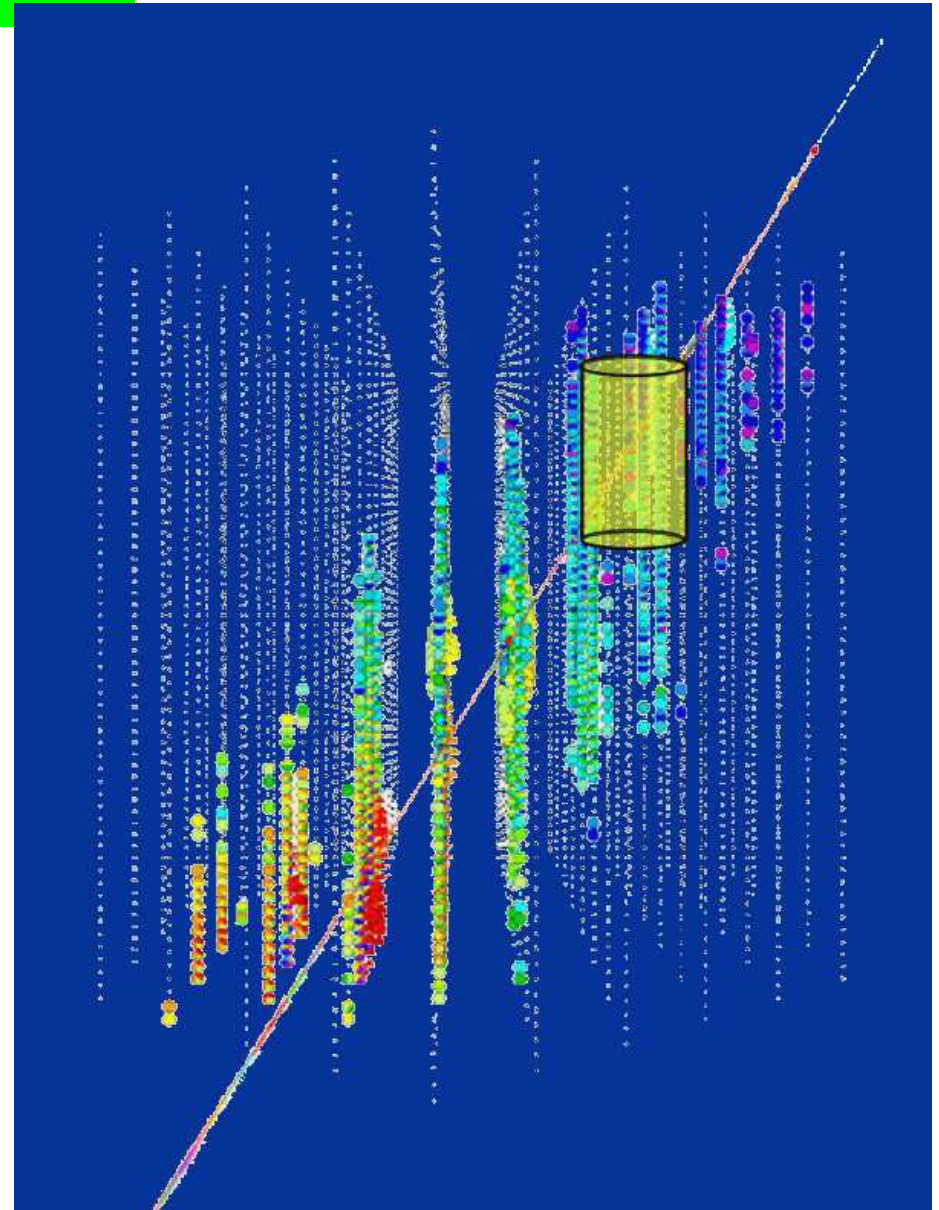
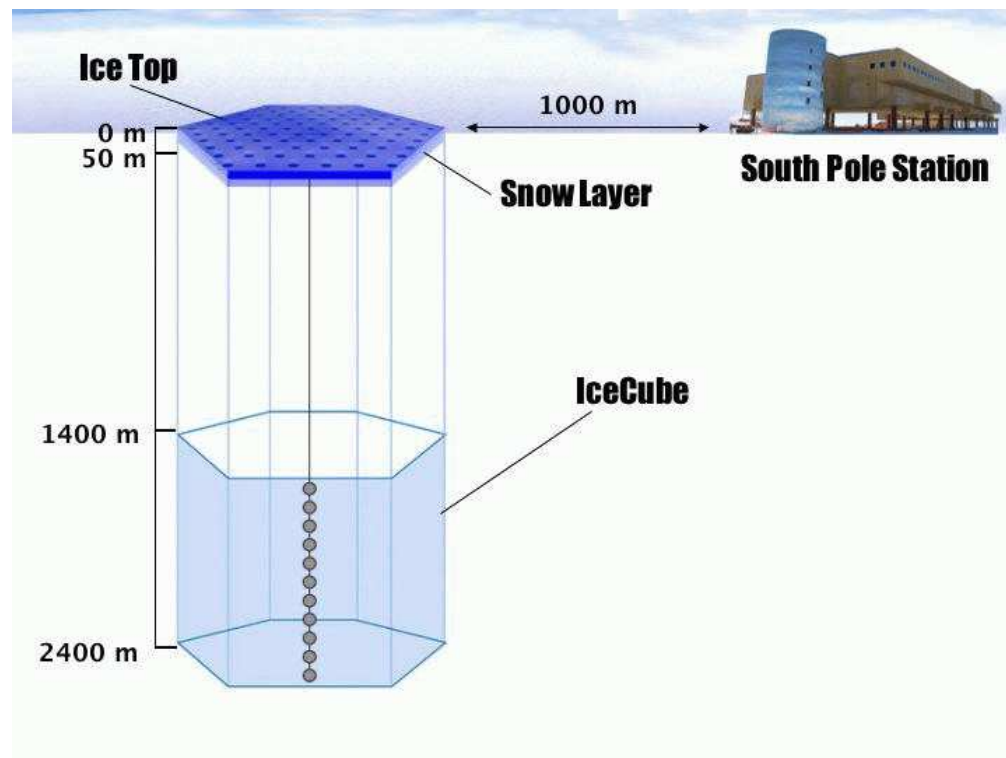


IceCube

“Następca” AMANDY

Sensory mają wypełnić obszar 1 km^3 lodu

⇒ 1 gigatonowy detektor



Perspektywy

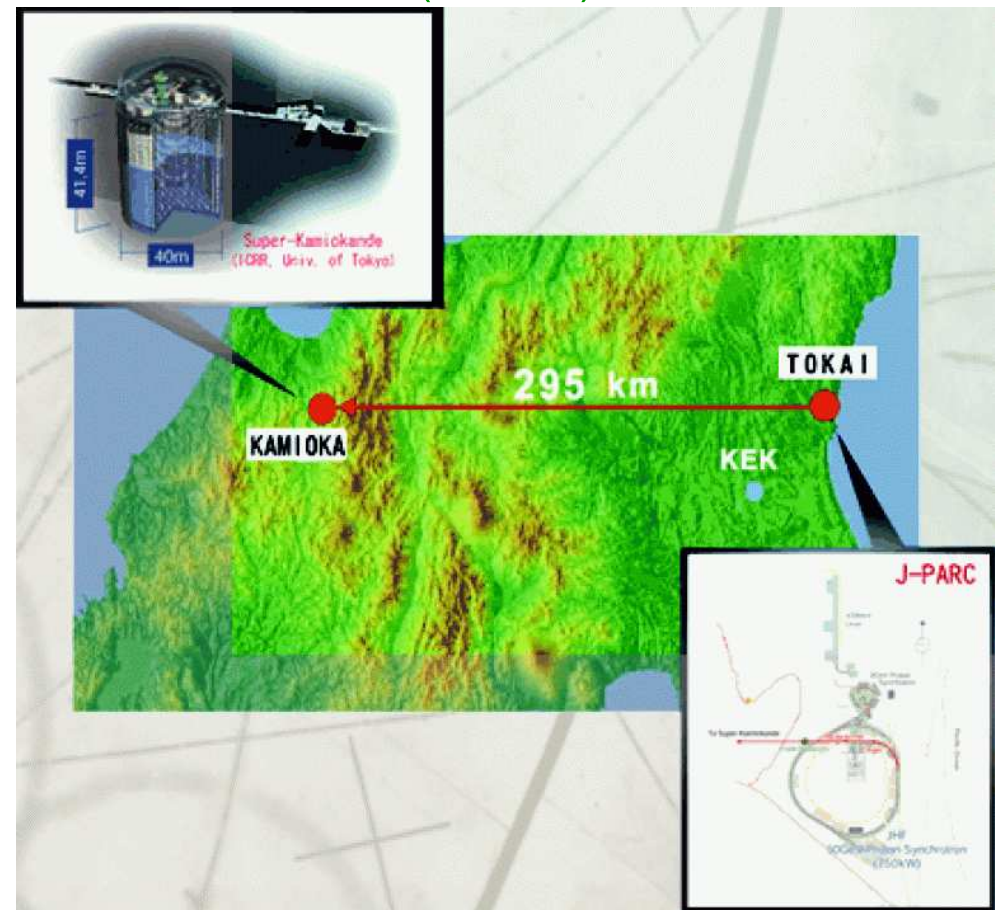
Przygotowywane eksperymenty

W niedalekiej przyszłości powinny zostać uruchomione eksperymenty **OPERA** i **ICARUS** na wiązce ν_μ z CERN do Gran Sasso (735 km, jak w MINOS).

OPERA: detekcja τ poprzez połączenie detektorów śladowych z odczytem elektronicznym i emulsji.

ICARUS: detektor śladowy oparty na ciekłym argonie.

Eksperyment następnej generacji: T2K
(2008?)



Perspektywy

Przygotowywane eksperymenty

Rozbudowa eksperymentu reaktorowego Chooz, Francja \Rightarrow Double Chooz (2007?)

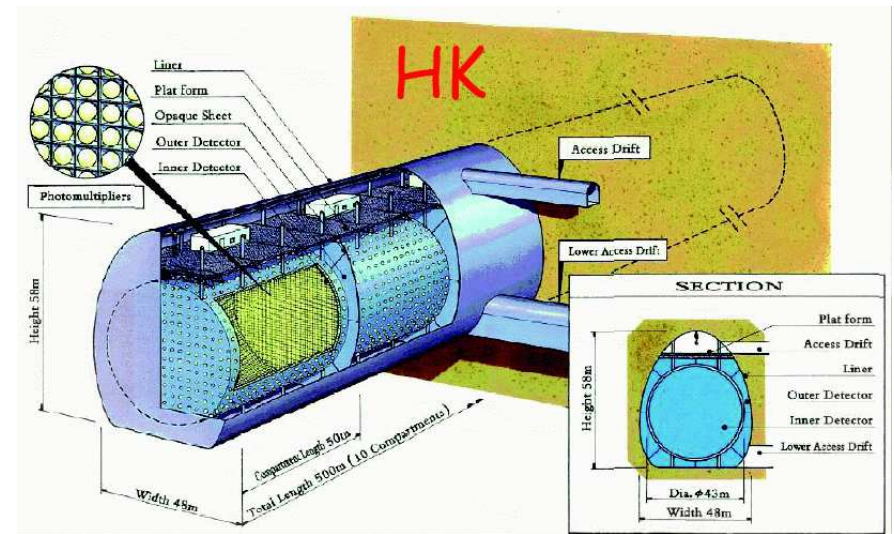


Perspektywy

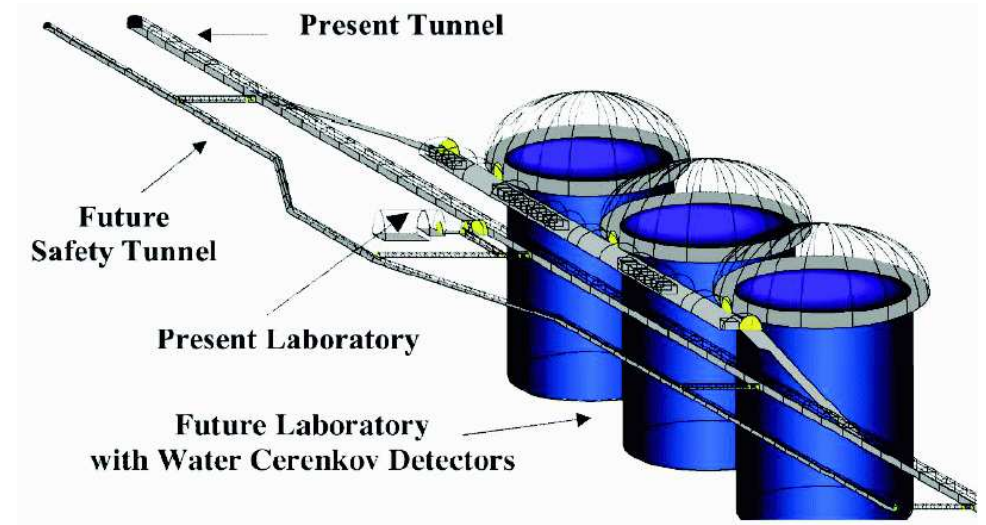
Proponowane eksperymenty

Wodne detektory promieniowania
Czerenkowa nowej generacji:

Hiper-Kamiokande (0.5 megatony) ⇒



Frejus, Francja (1 megatona) ⇒

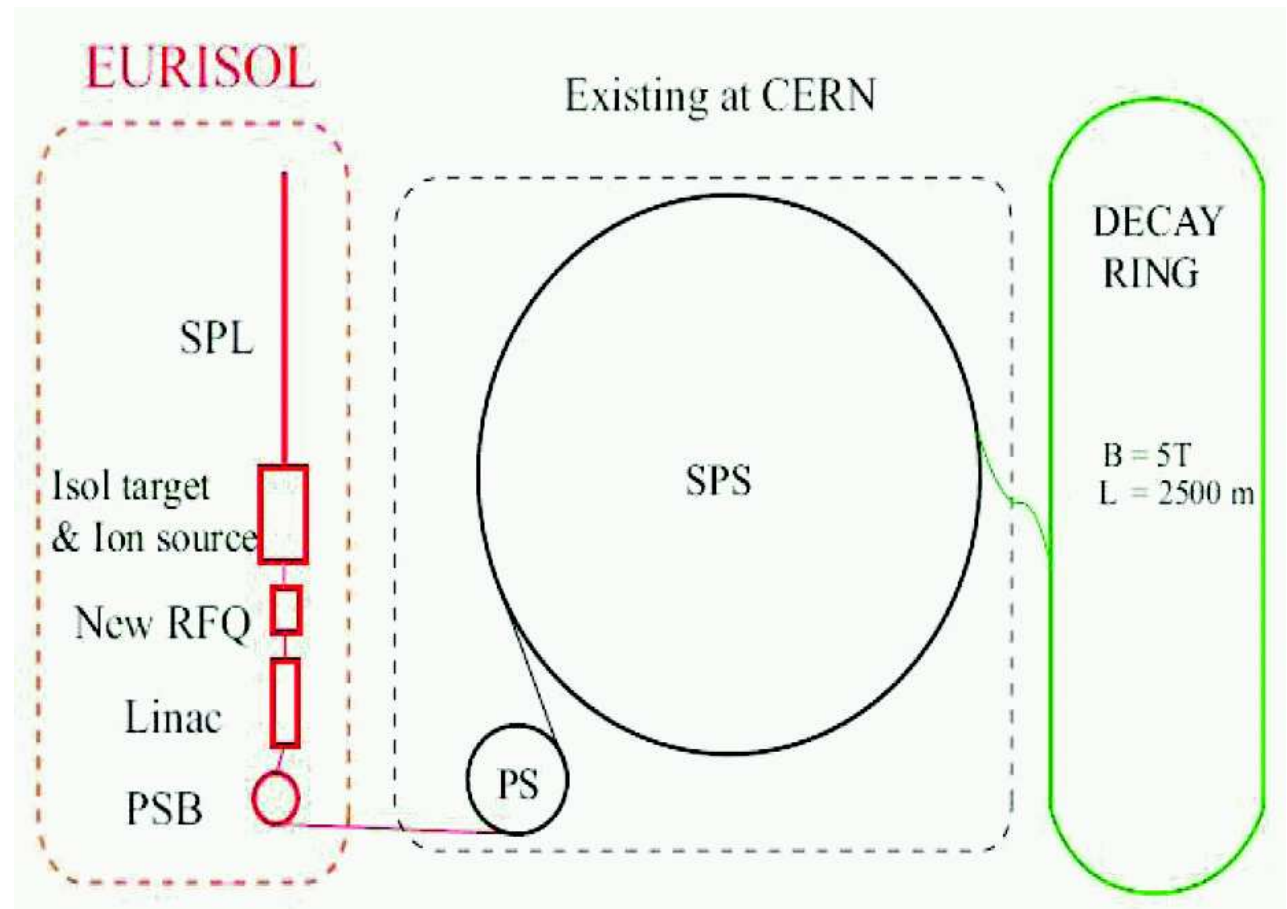


Perspektywy

Fabryki neutrin

Pomysł “**wiązek β** ”, 2001:
wiązka neutrin uzyskiwana z rozpadów jąder promieniotwórczych (np. ${}^6\text{He}$ lub ${}^{138}\text{Ne}$) krążących w pierścieniu akumulacyjnym

⇒ produkcja czystej wiązki ν_e lub $\bar{\nu}_e$ o dobrze określonej energii.



Perspektywy

Fabryki neutrin (2)

Rozpady mionów krążących w pierścieniu akumulacyjnym
 ⇒ intensywne źródło neutrin

Proste odcinki pierścienia
 ⇒ "laser" neutrinowy

- b. dobra kolimacja
- wysoka intensywność
- wysoka energia $E_\nu \sim E_\mu$

⇒ nowe era w badaniach neutrin

Dużo łatwiejsze do zbudowania niż akcelerator (collider) $\mu^+ \mu^-$

