

Neutrino

prof. dr hab. Aleksander Filip Żarnecki

Wszechświat cząstek elementarnych dla humanistów

Wykład 11

- Neutrino i ich własności
- Źródła neutrin
- Pomiary neutrin
- Oscylacje neutrin

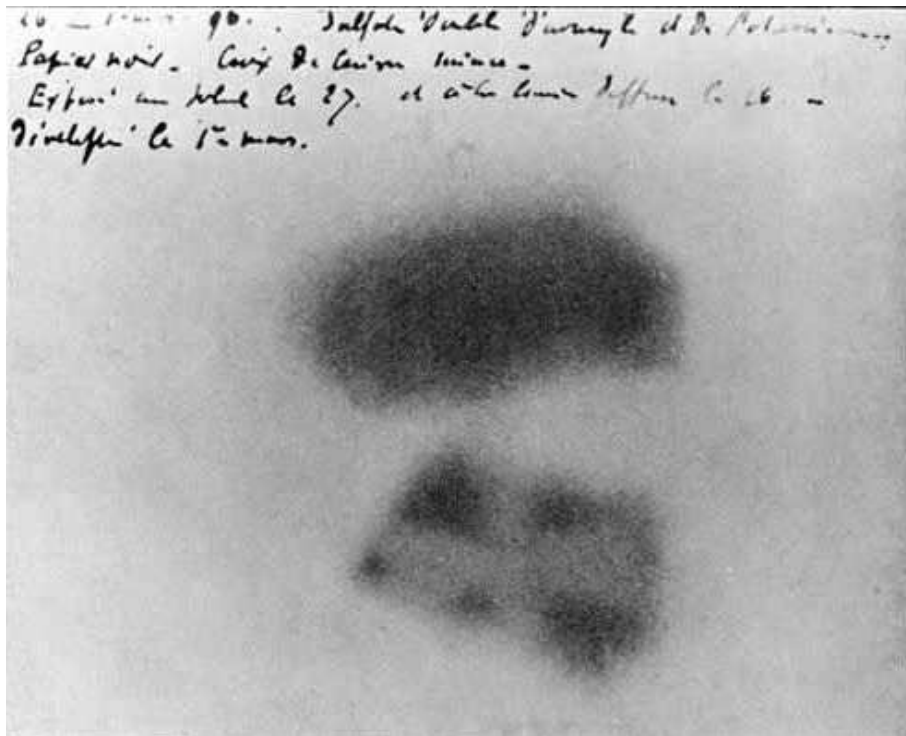
Neutrino

Promieniotwórczość

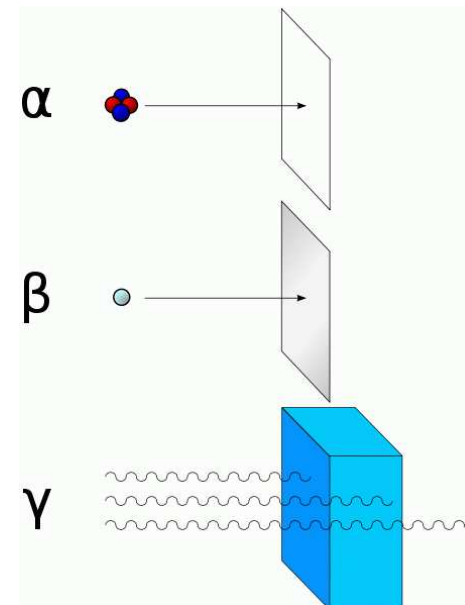
Odkryta przez **H. Becquerela** w roku **1896**.

Sole uranu emitowały promieniowanie, które zaciemniało płytę fotograficzną.

1903 - nagroda Nobla, wraz z **M. Skłodowską** i **P. Curie**



Na początku XX wieku wyodrębniono **3 rodzaje** promieniowania: α , β i γ .



Źródła cząstek

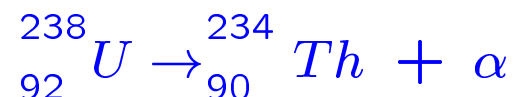
Pierwiastki radioaktywne

Dziś wiemy, że są to:

- α - jądra helu (2p2n)
- β - elektrony
 β^+ - pozytony
- γ - fotony

E.Rutherford i F.Soddy:

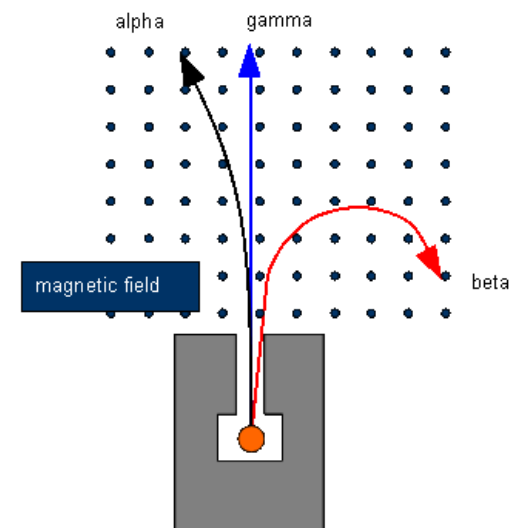
Źródłem promieniowania są **przemiany** jednych **pierwiastków** w inne, np.



Oczekiwano, że cząstki promieniowania powinny nieść energię odpowiadającą różnicy mas izotopów...

$$E_o = \Delta M c^2 \quad \text{np.} \quad E_\alpha = (M_U - M_{Th})c^2$$

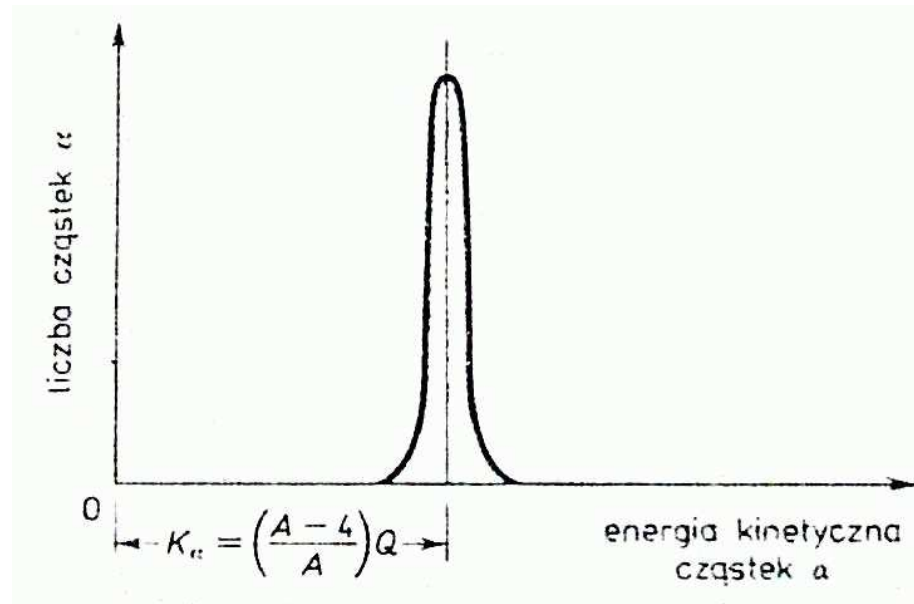
Rozdzielone w polu magnetycznym



Neutrina

Rozpady α i γ

Dyskretne widmo energii:

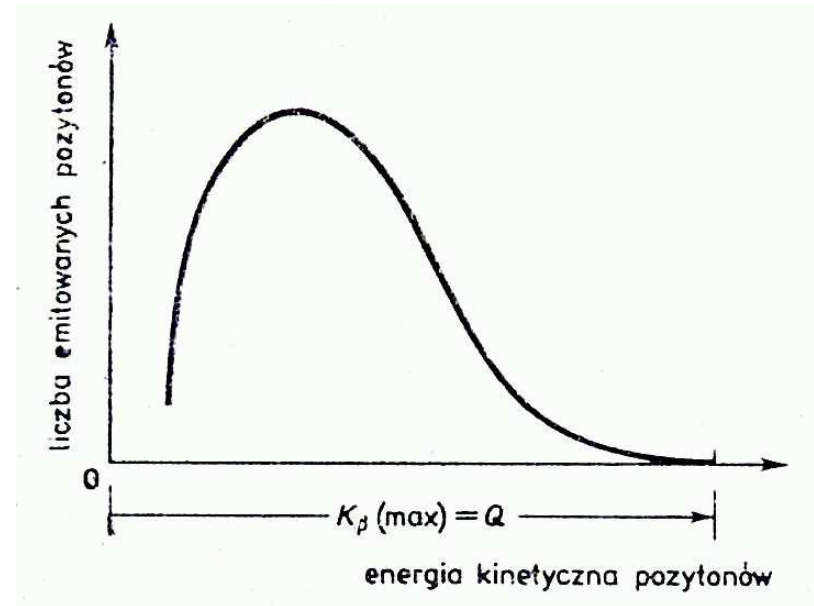


Energia emitowanej cząstki

$$E_\alpha = E_0 \equiv \Delta M c^2$$

Rozpad β

Ciągłe widmo energii:



Naruszenie zasady zachowania energii !?...

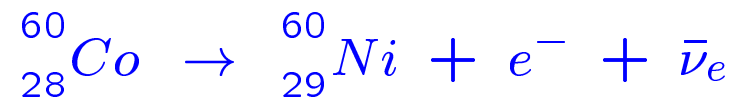
Energia emitowanych elektronów/pozytonów

$$E_\beta \leq E_0 \equiv \Delta M c^2$$

Neutrino

Hipoteza Pauliego 1930

Aby “uratować” zasadę zachowania energii (i momentu pędu) Pauli zaproponował istnienie dodatkowej cząstki unoszącej część energii w rozpadzie β , np.:



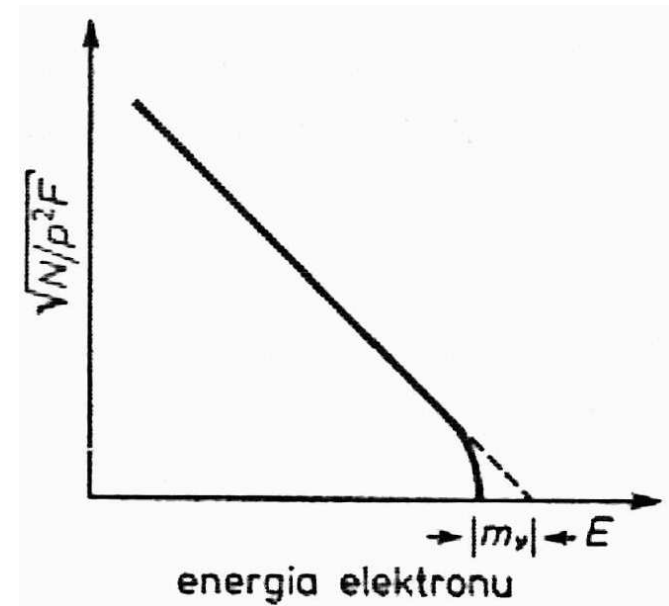
Cząstka ta miała mieć zerową masę.

Pauli zaproponował nazwę “neutron”

Nazwę “**neutrino**” zaproponował w 1933 Fermi, który stworzył teorię rozpadu β

Wykres Kurie

Dla bezmasowego neutrino ($m_\nu=0$) elektrony mogą osiągnąć maksymalną energię ΔMc^2



Ewentualne odstępstwa

część energii zamieniana na masę neutrino

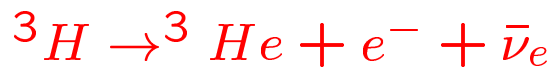
\Rightarrow pomiar masy neutrino: $m_\nu = E_0 - E_{max}$

Neutrino

Pomiary masy

Dokładny pomiar końca widma elektronów z rozpadu β pozwala wyznaczyć m_ν

Wyniki eksperymentu Mainz (2001)



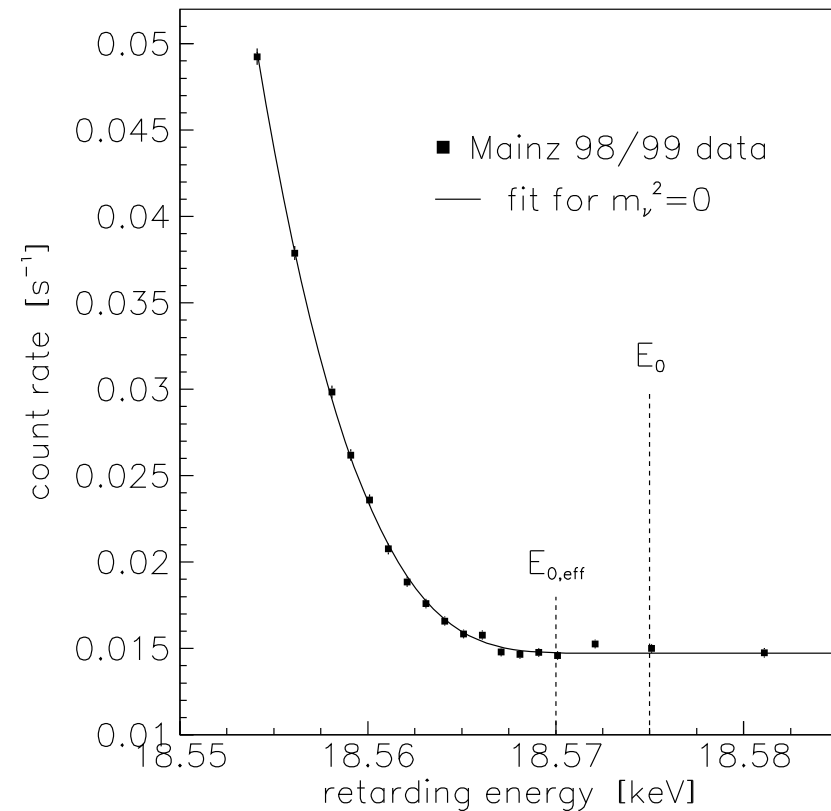
$$m_\nu^2 = -1.6 \pm 2.5_{(stat)} \pm 2.1_{(sys)} \text{ eV}^2$$

⇒ ograniczenie na masę
neutrino elektronowego:

$$m_\nu < 2.2 \text{ eV (95\% CL)}$$

Ograniczenia kosmologiczne

$$\sum m_\nu < 0.23 \text{ eV (95\% CL)}$$



Neutrino

Model Standardowy

Emitowane w rozpadach promieniotwórczych: neutrino (bądź antyneutrino) elektronowe.

Każdy naładowany lepton ma swojego partnera - neutrino (antylepton - antyneutrino).

	leptony		kwarki	
pokolenie 1	e <i>elektron</i>	ν_e <i>neutrino el.</i>	d <i>down</i>	u <i>up</i>
pokolenie 2	μ <i>mion</i>	ν_μ <i>neutrino mionowe</i>	s <i>strange</i>	c <i>charm</i>
pokolenie 3	τ <i>taon</i>	ν_τ <i>neutrino taonowe</i>	b <i>beauty</i> <i>(bottom)</i>	t <i>top</i> <i>(truth)</i>
ładunek [e]	-1	0	-1/3	+2/3

W dalszej części wykładu nazwa "neutrino" będzie używana do określenia neutrin jak i antyneutrin.

Źródła neutrin

Ziemia

Rozpady promieniotwórcze zachodzą cały czas w skorupie ziemskiej.

W każdej tonie skorupy kontynentalnej ok. 1g ^{238}U i 6g ^{232}Th

Szacowany strumień wydostających się z Ziemi neutrin:

$$\Phi_Z \sim 10^7 \frac{1}{s \cdot cm^2}$$

Wydaje się dużo? Poczekajmy...

Człowiek

Każdy z nas jest źródłem neutrin.

Przeciętny człowiek ma w sobie 20g naturalnego izotopu potasu ^{40}K .

Czas połowicznego zaniku 1.28 mld lat, co daje ok. 4000 rozpadów na sekundę.

⇒ Dziennie nasze ciało produkuje ok. 340 mln neutrin !...

Źródła neutrin

Reaktory

W każdym akcie rozszczepienia jądra uranu ^{238}U wyzwala się ok. 200 MeV energii.

Z tego średnio 9 MeV unieszone jest przez powstające antyneutrino (średnio 6 na jądro).

Blok o mocy 1 GW $\Rightarrow \sim 10^{20}$ rozszczepień na sekundę $\Rightarrow \sim 6 \cdot 10^{20}$ neutrin na sekundę

Strumień neutrin maleje z kwadratem odległości od reaktora (powierzchnia sfery)

W odległości 10 m od reaktora strumień neutrin:

$$\Phi_R \sim 5 \cdot 10^{13} \frac{1}{\text{s} \cdot \text{cm}^2}$$

W odległości 1 km od reaktora strumień neutrin:

$$\Phi_R \sim 5 \cdot 10^9 \frac{1}{\text{s} \cdot \text{cm}^2}$$

W odległości rzędu 100 km zaczynają przeważać neutrina pochodzące od Ziemi...

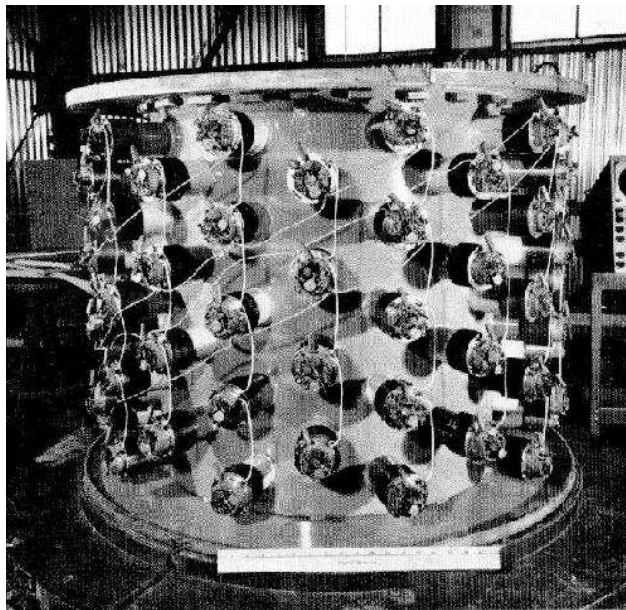
Neutrino

Doświadczenia Reinesa i Cowana (1953-1959)

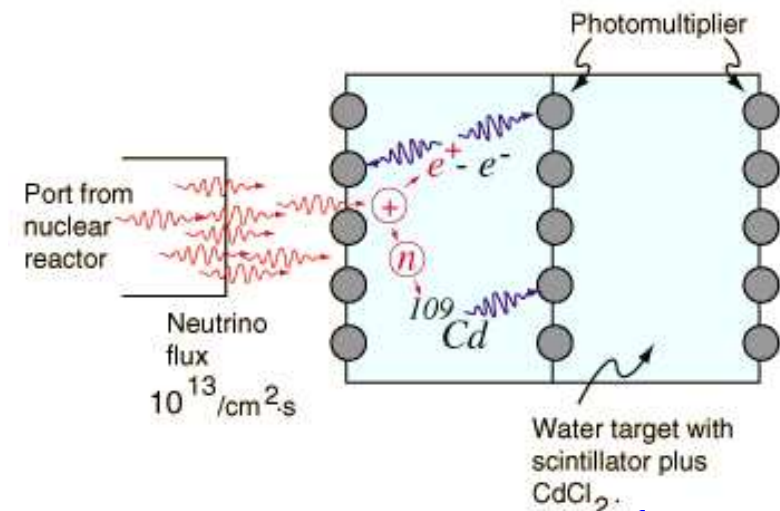
Oddziaływanie **neutrino** **zaobserwowano** po raz pierwszy wykorzystując jako źródło **reaktor jądrowy**. Produkcja neutrino m.in. w rozpadach neutronów:



Detektor:



Zaobserwowano reakcję



- pozytrony anihilują emitując **fotony**.
 - kadm zawarty w wodzie wychwytuje neutrony co także prowadzi do emisji **fotonów**.
- ⇒ **koincydencja** dwóch sygnałów pozwala na wyeliminowanie tła

Neutrino

Oddziaływania

Przekrój czynny (efektywna powierzchnia poprzeczna) na oddziaływanie neutrin z materią jest **niewyobrażalnie mały**.

Dla neutrin o energii rzędu 1 MeV (rozpady i reaktory)

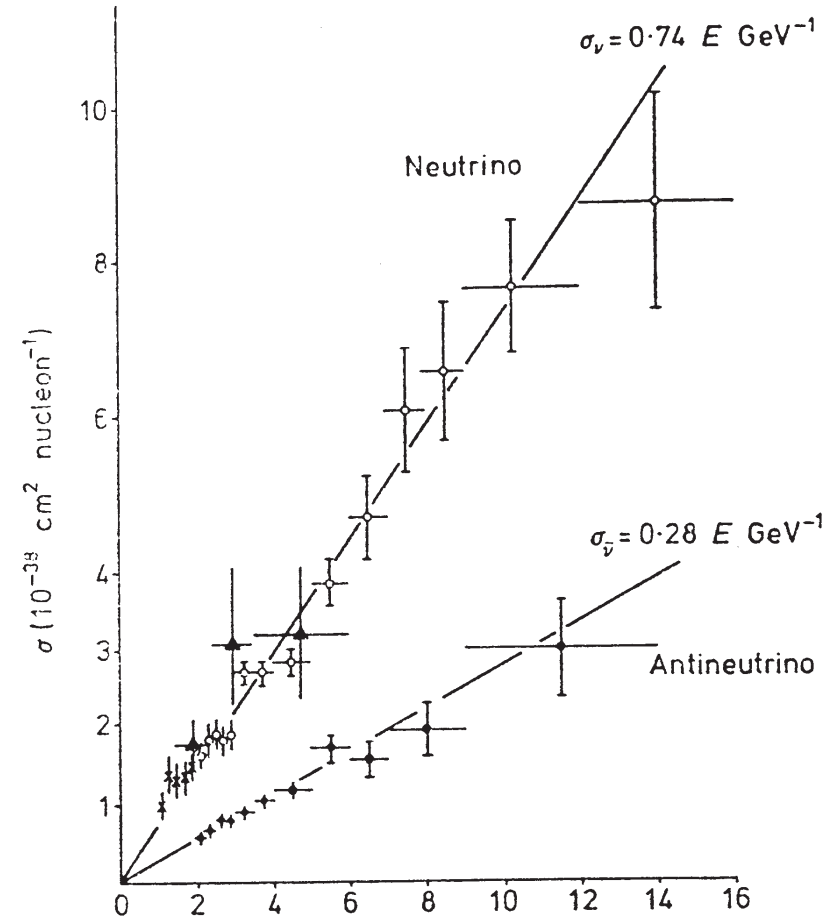
$$\sigma_{\nu N} \sim 10^{-43} \text{ cm}^2$$

Odpowiada to średniej **drodze swobodnej** w materii (!) rzędu **lat świetlnych !!!**

Dla porównania $\sigma_{NN} \sim 10^{-24} \text{ cm}^2$

Przekrój czynny na oddziaływanie neutrin z materią **rośnie z energią**, ale tylko liniowo...

Potrzebujemy **intensywnych źródeł** i **bardzo dużych detektorów**...

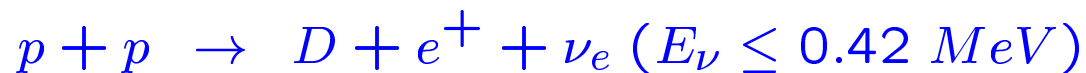


Źródła neutrin

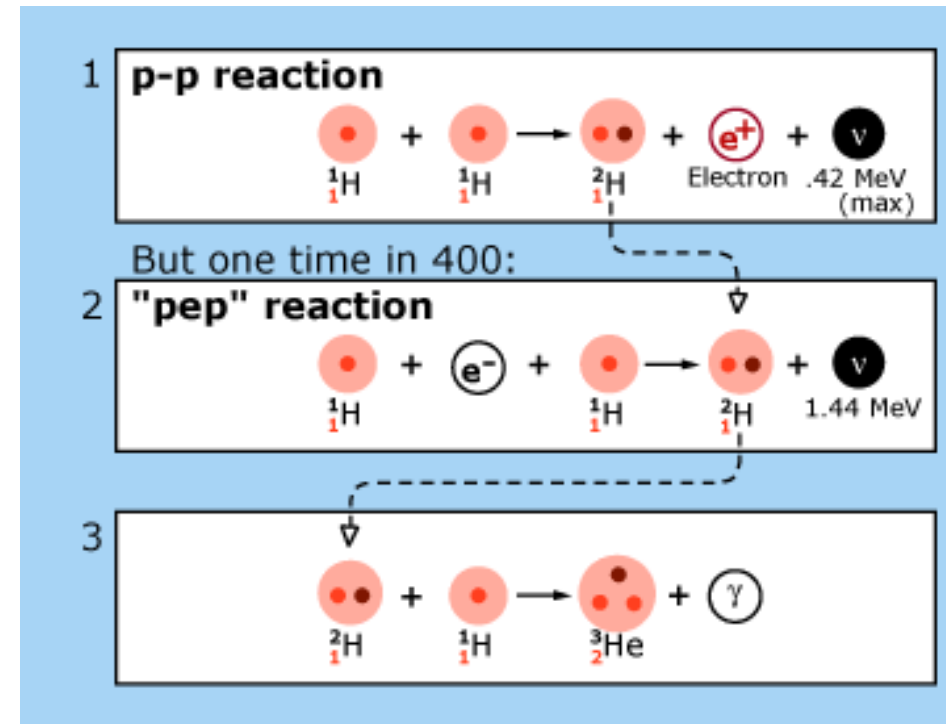
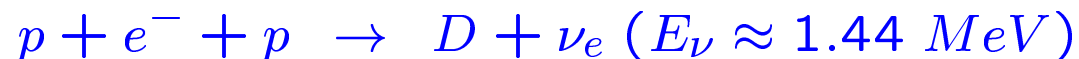
Słońce

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

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



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

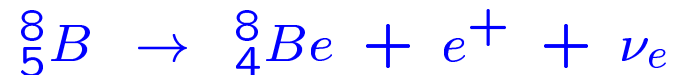


Źródła neutrin

Słońce

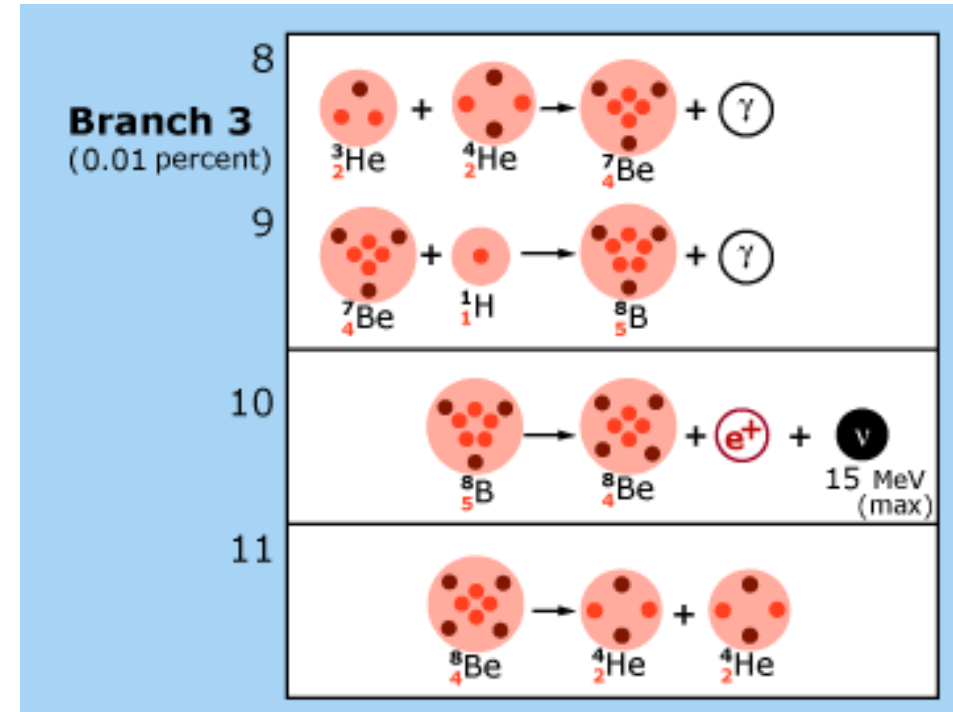
Dalsze reakcje syntezy ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$, ${}^7\text{Be}$ i ${}^7\text{Li}$ prowadzą do emisji dodatkowych neutrin.

Źródłem wysokoenergetycznych neutrin jest przemiana ${}^8\text{B}$



w której energia emitowanych neutrin dochodzi do **15 MeV**

Tylko te neutrina mogą być mierzone w detektorach cząstek elementarnych.



Źródła neutrin

Słońce

Całkowity strumień neutrin docierających do Ziemi:

$$\Phi_S \sim 6 \cdot 10^{10} \frac{1}{s \cdot cm^2} \quad (!)$$

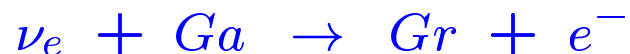
jak ~ 100 m od reaktora

jednak dominują niskie energie...

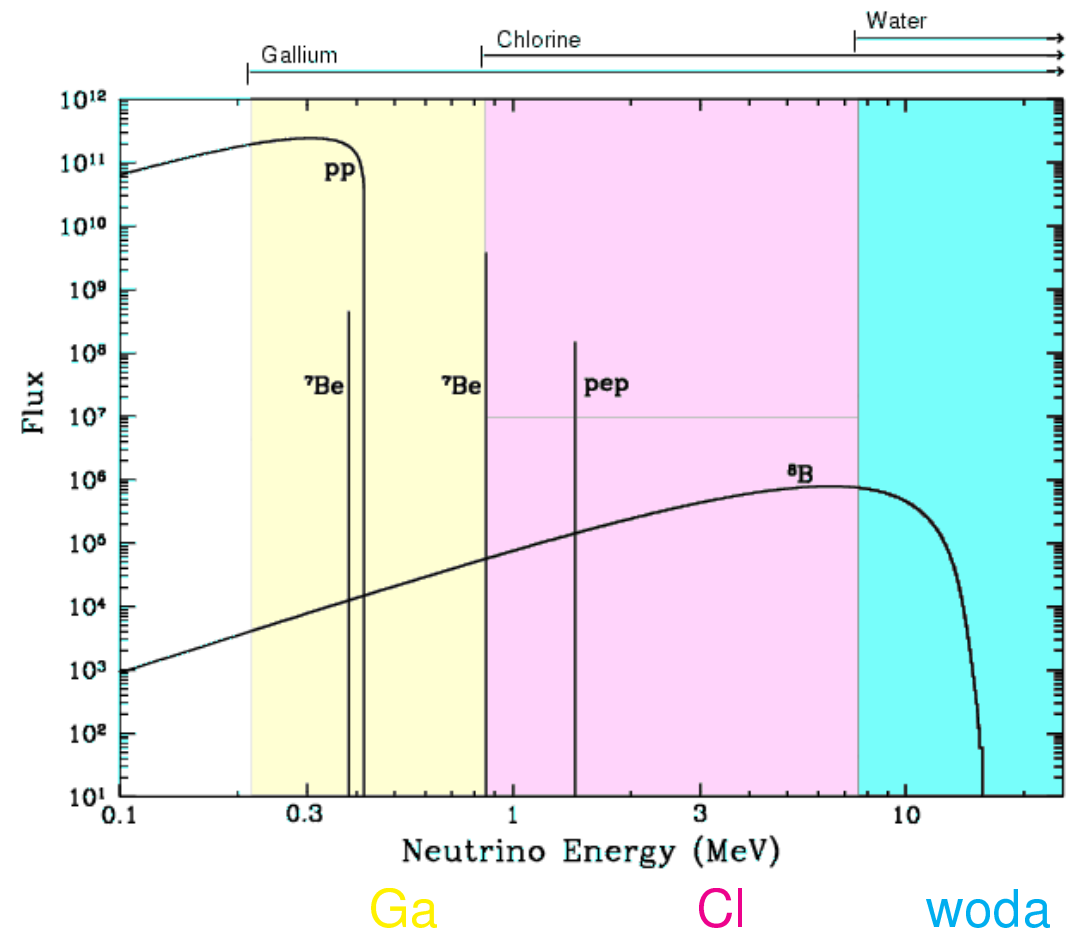
Neutrino o energiach poniżej kilku MeV mogą być rejestrowane metodami radiochemicznymi - mierzymy produkcję powstających izotopów:



lub



Widmo energii **neutrin elektronowych** z reakcji jądrowych na słońcu



Pomiary neutrin

Eksperyment Super-Kamiokande

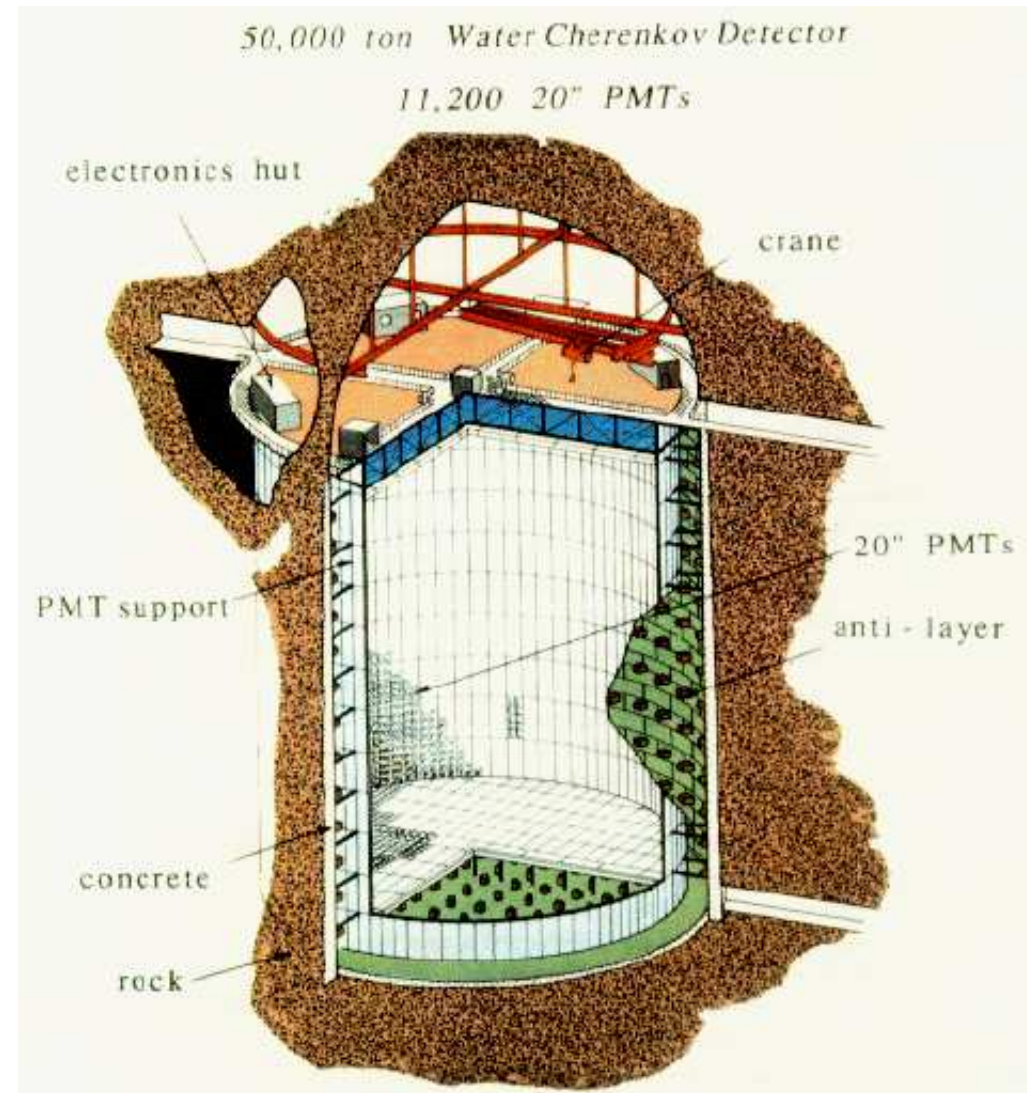
Japonia, w starej kopalni, 1 km pod górą Kamioka, komora o wysokości 40 m i średnicy 40 m, wypełniona **wodą**

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

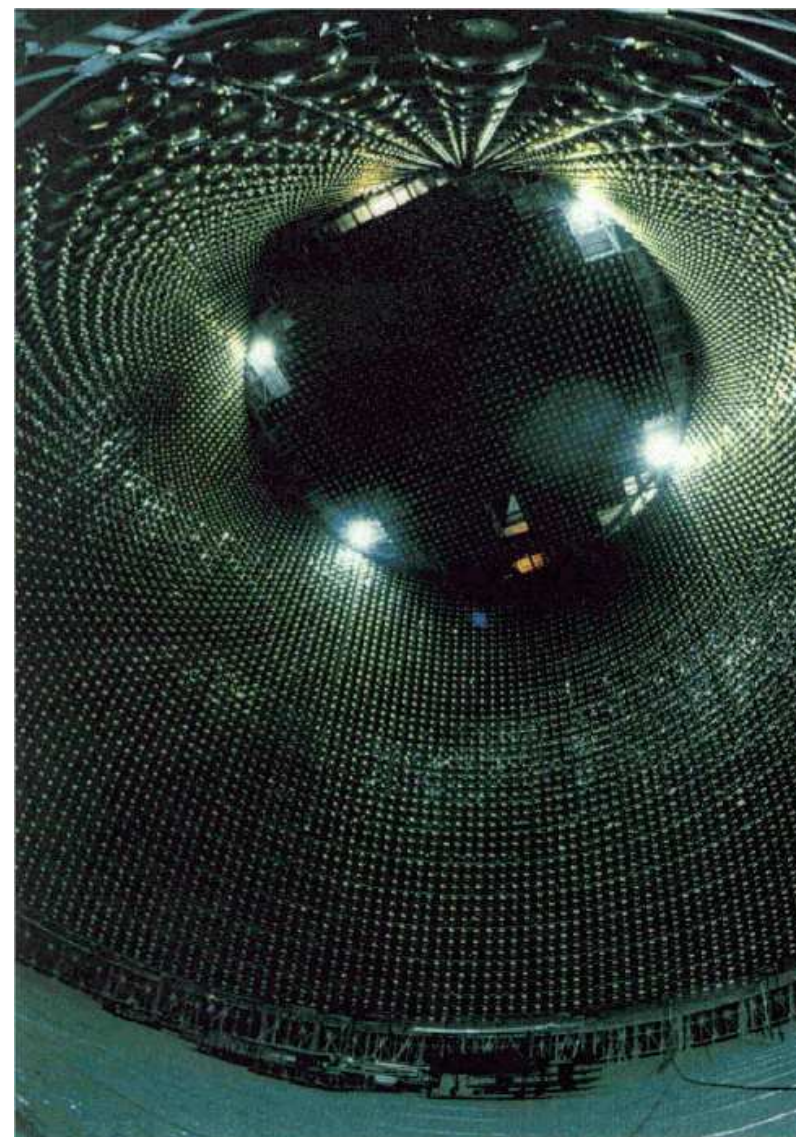
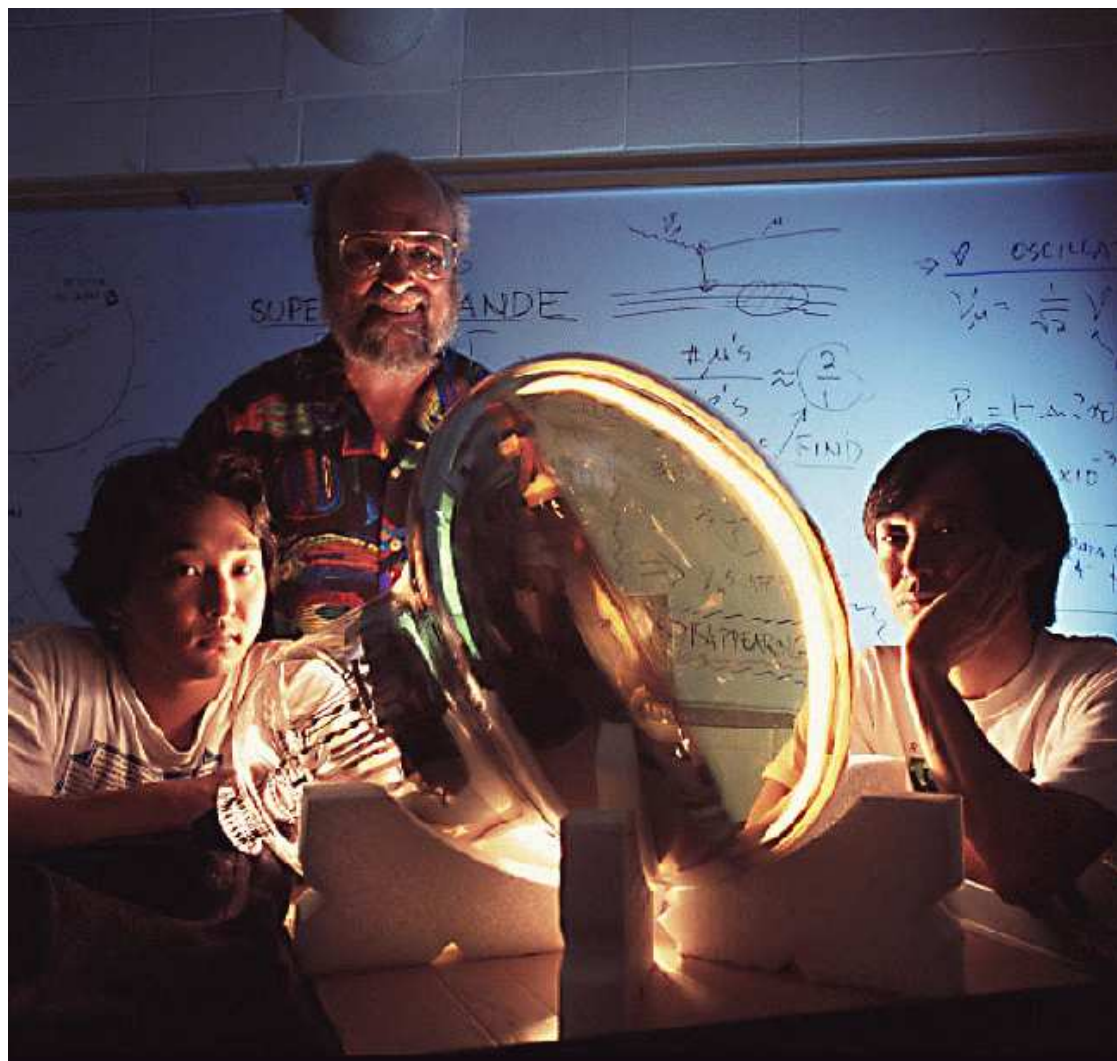
rejestrowane jest

promieniowanie Czerenkowa

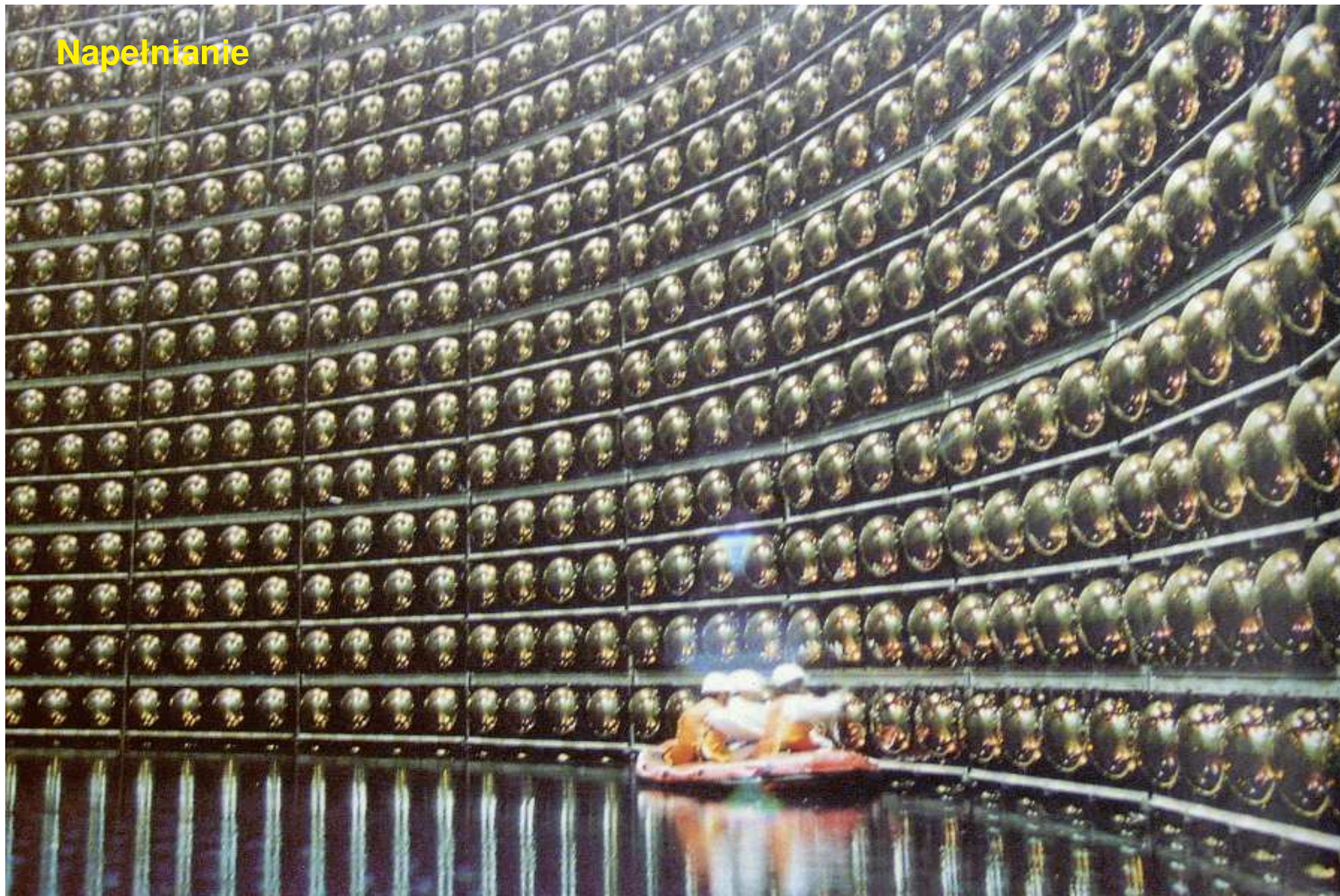
emitowane w kierunku ruchu przez cząstki poruszające się z prędkością większą od prędkości światła (w wodzie)



Super-Kamiokande



Napełnianie



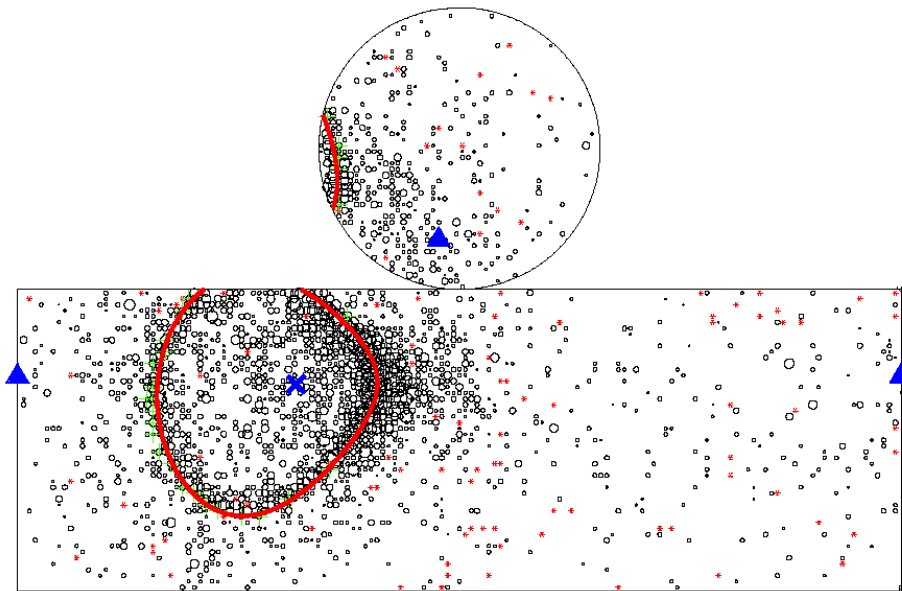
Super-Kamiokande

Przykłady obserwowanych oddziaływań neutrin.

Neutrino elektronowe

Przypadek $\nu_e n \rightarrow e^- p$

Krótki zasięg elektronu
“cienki” pierścień

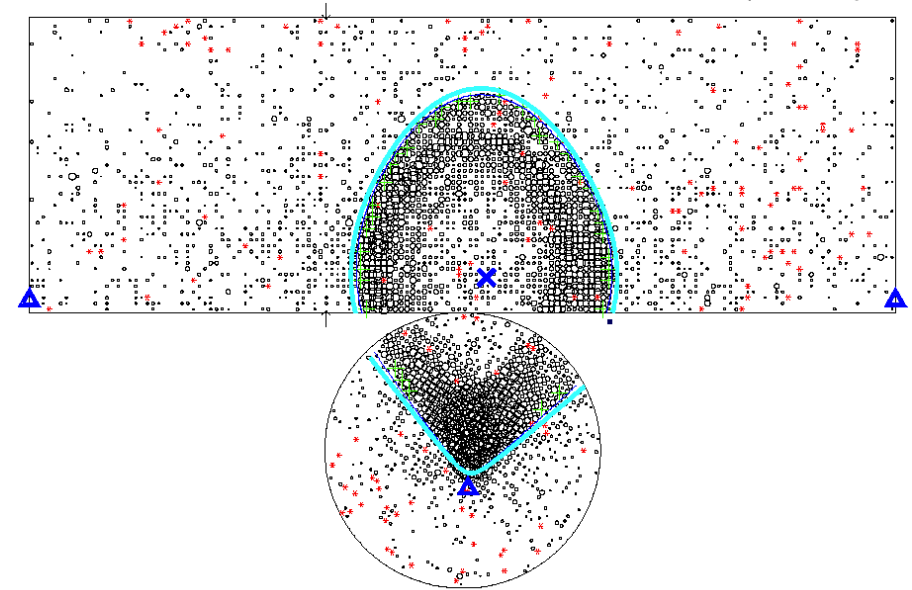


Próg tła: $E_\nu > 5 \text{ MeV}...$

Neutrino mionowe

Przypadek $\nu_\mu n \rightarrow \mu^- p$

Długa droga mionu w wodzie
“gruby” pierścień.

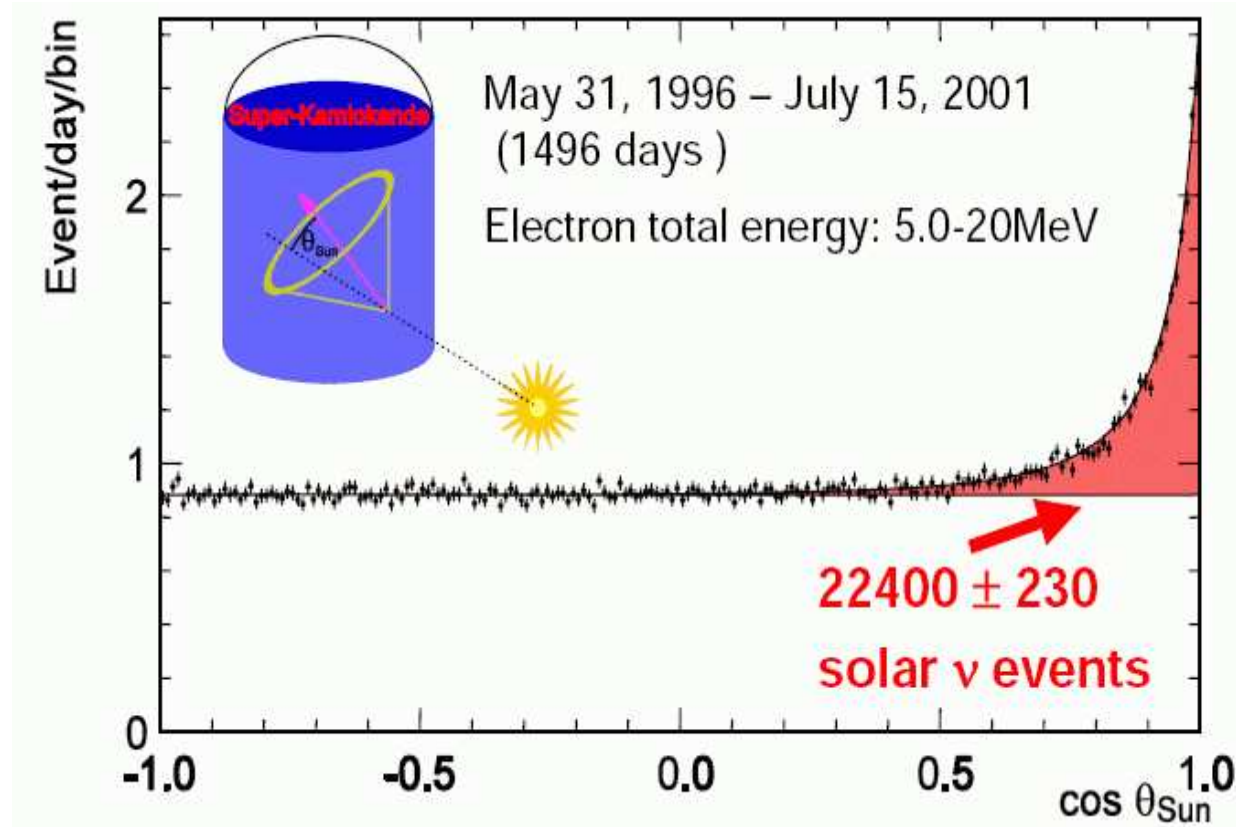


Próg: $E_\nu > m_\mu \sim 100 \text{ MeV}...$

Super-Kamiokande

Obserwacja neutrin słonecznych

Oddziaływania **neutrin słonecznych** możemy odróżnić od oddziaływań innych neutrin mierząc **kąt emisji** elektronu względem **kierunku od słońca**



Zmierzono:

$$\Phi_S^{(B)} = 2.4 \pm 0.1 \cdot 10^6 \frac{1}{s \cdot \text{cm}^2}$$

Przewidywania:

$$\Phi_S^{(B)} = 5.3 \pm 0.6 \cdot 10^6 \frac{1}{s \cdot \text{cm}^2}$$

Deficyt neutrin słonecznych był już mierzony w latach '60 XX w. !

Ale zrozumieliśmy to dopiero w wieku XXI.

Źródła neutrin

Promieniowanie kosmiczne

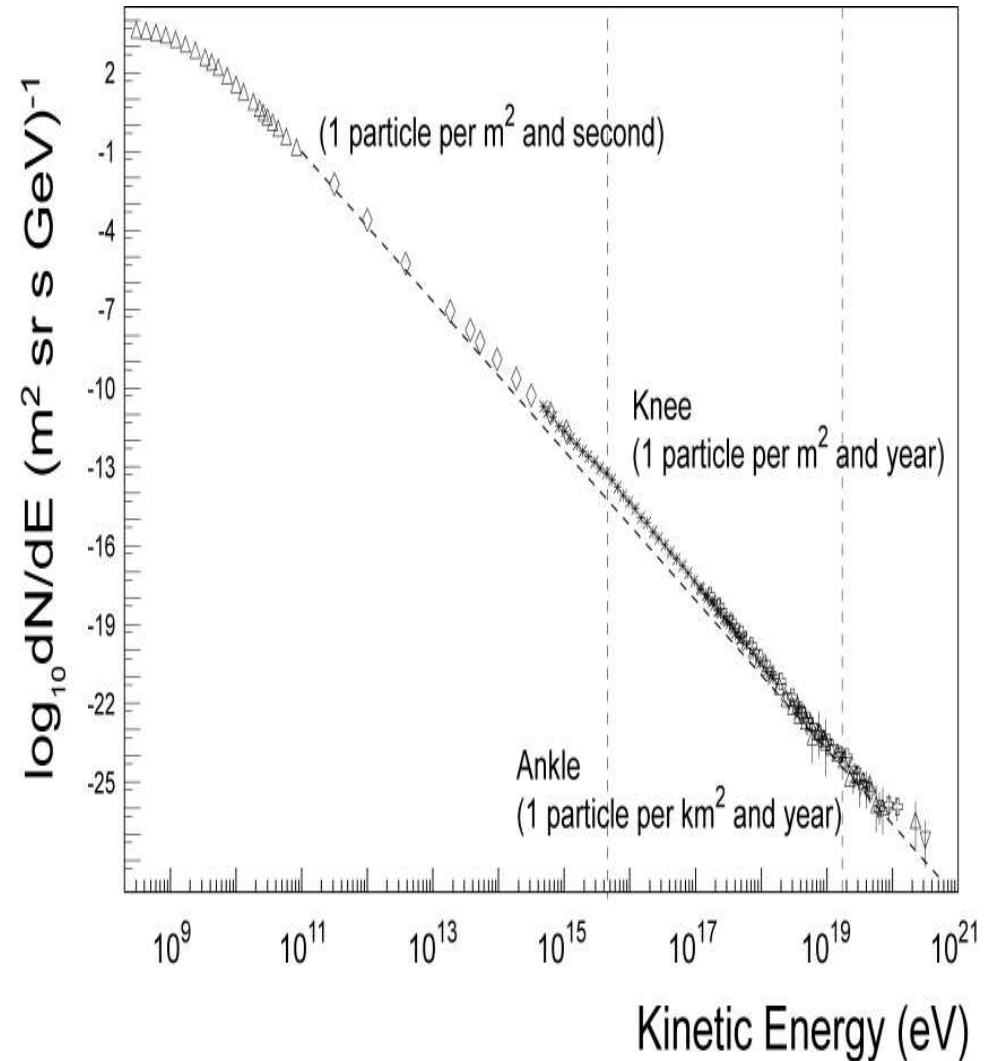
Przestrzeń kosmiczna wypełniona jest cząstkami o energiach dochodzących do 10^{12} GeV (10^{21} eV).

⇒ promieniowanie kosmiczne

poza atmosferą ziemską ⇒ “pierwotne”

Skład “pierwotnego” promieniowania kosmicznego:

- protony (jądra H) $\sim 86\%$
- cząstki α (jądra He) $\sim 13\%$
- jądra cięższych pierwiastków $\sim 1\%$
- neutrony, elektrony, fotony $\ll 1\%$

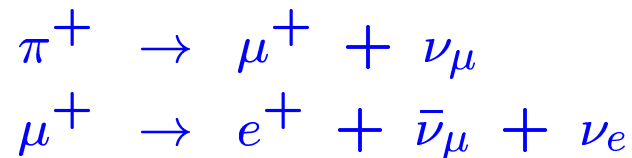


Źródła neutrin

Neutrina atmosferyczne

Promieniowanie kosmiczne “pierwotne” oddziałuje w atmosferze produkując liczne **cząstki wtórne**, w większości piony π^\pm .

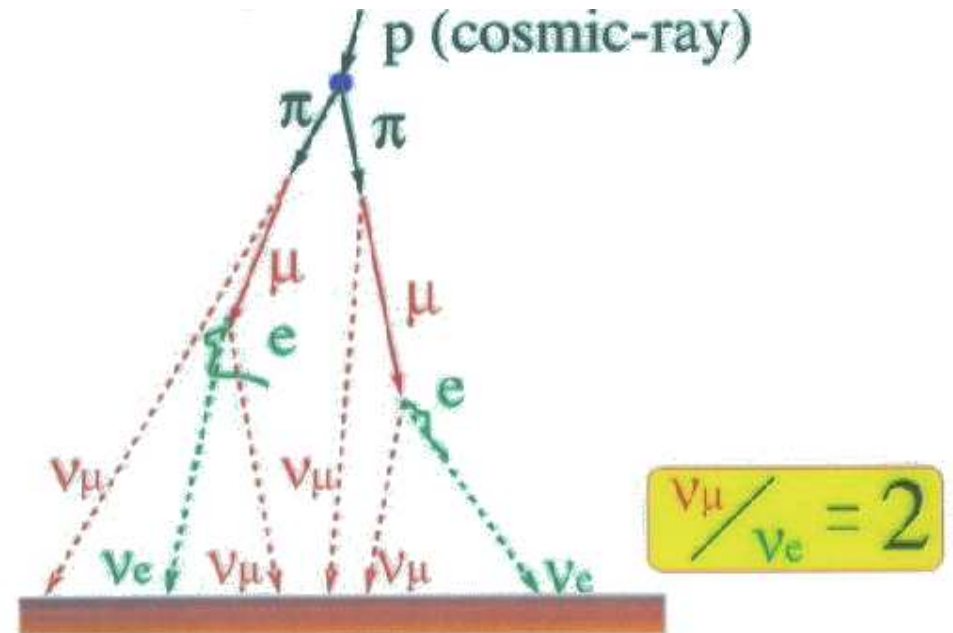
W wyniku **rozpadów**:



(podobnie dla π^-/μ^-)

produkowanych jest **dwukrotnie większa** liczba neutrin (i antyneutrin) **mionowych** niż **elektronowych**:

$$N_{\nu_\mu} = 2 \cdot N_{\nu_e}$$



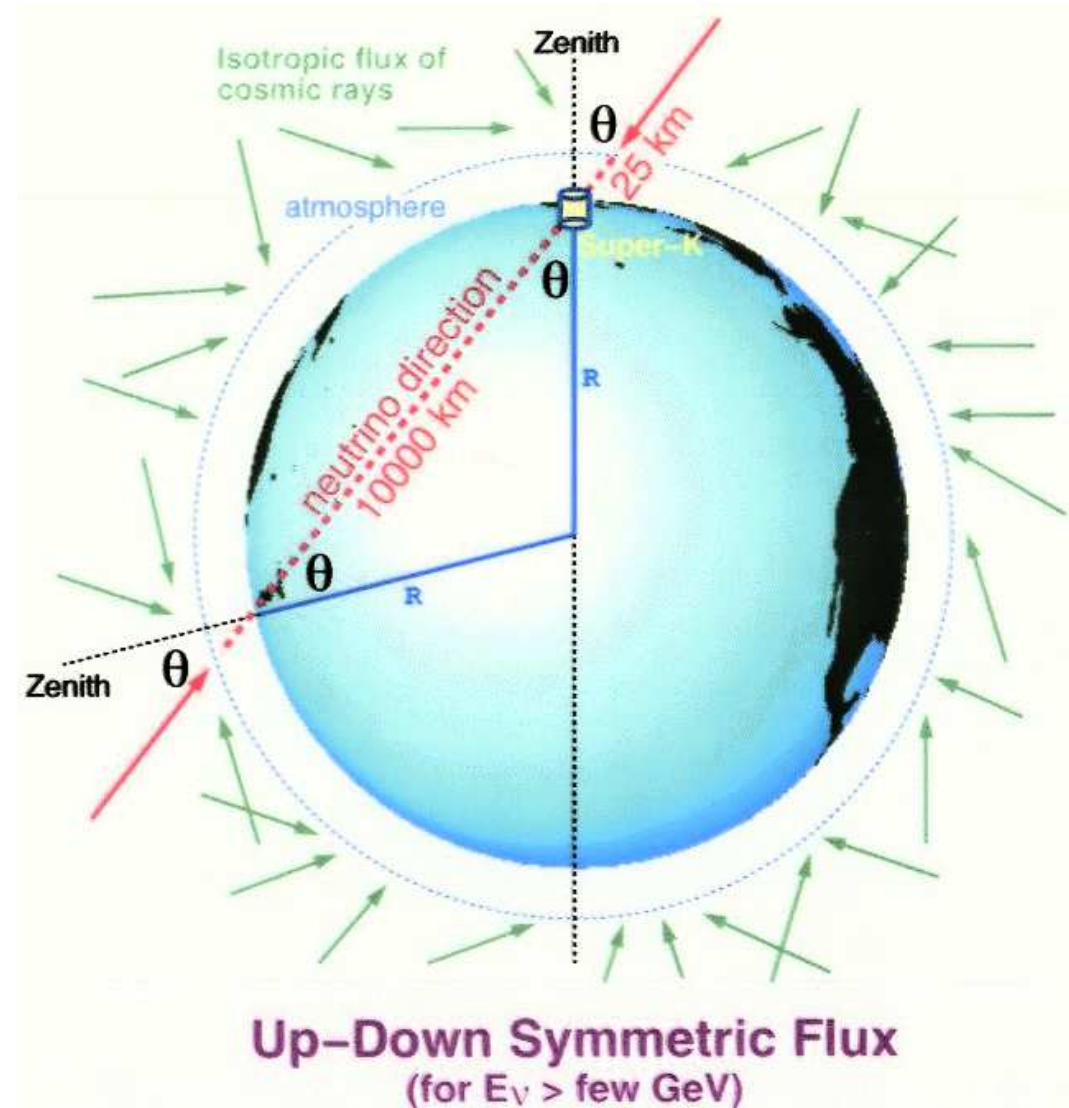
Neutrina atmosferyczne mogą mieć wysokie energie !!! (rzędu energii π i μ)

Pomiary neutrin

Neutrina atmosferyczne

Pierwotne promieniowanie kosmiczne jest izotropowe.

Ponieważ neutrina praktycznie nie oddziałują z Ziemią, strumienie neutrin “do dołu” i “do góry” powinny być sobie równe.



Super-Kamiokande

Neutrina atmosferyczne

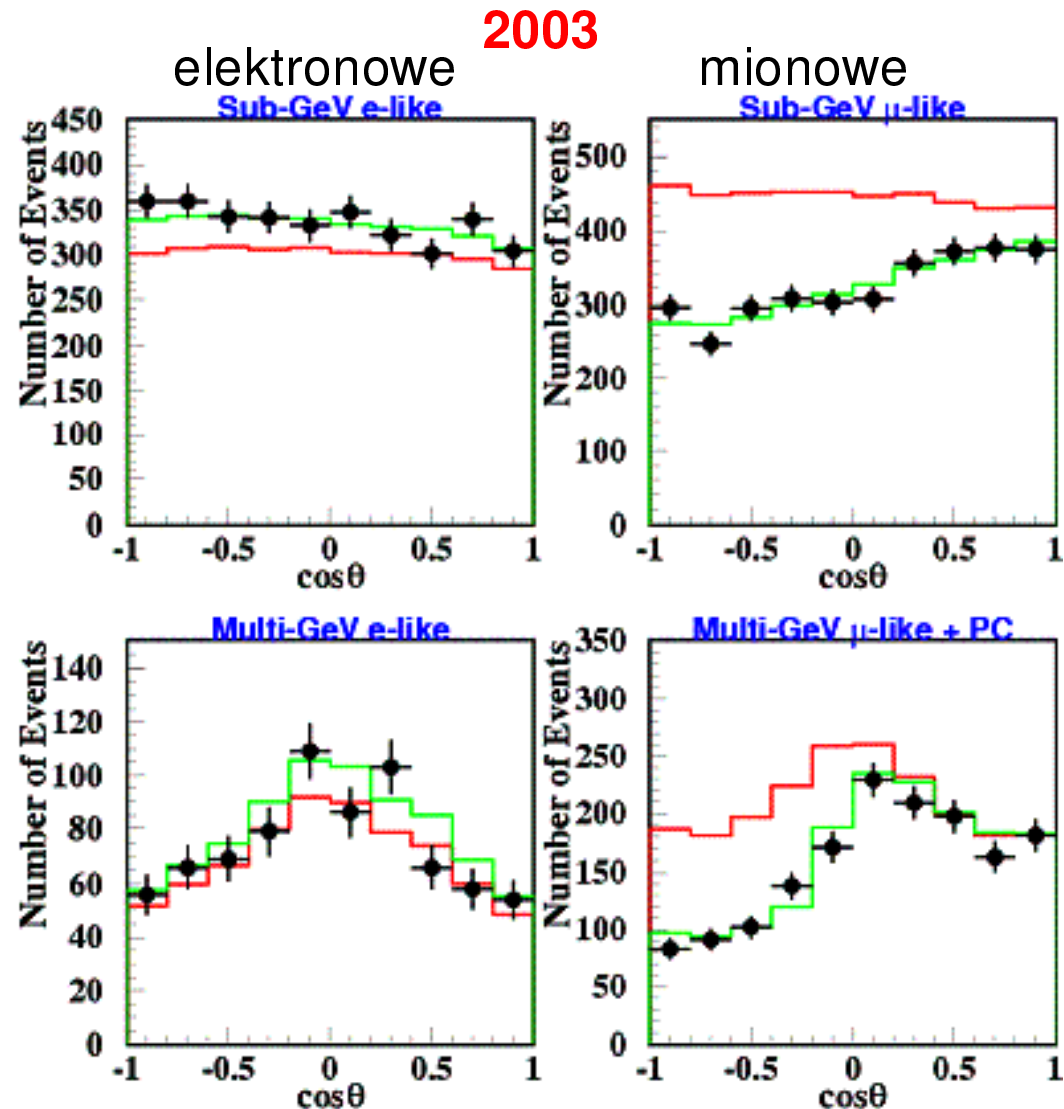
Zależność liczby neutrin **elektronowych** i **mionowych** od kierunku ($\cos\theta = 1$ gdy lecą do dołu, -1 gdy do góry) \Rightarrow

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

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

Czy neutrina mionowe mogą “znikać” przechodząc przez Ziemię ?

Nie może to być wynikiem “zwykłego” oddziaływania z materią...



Super-Kamiokande

Neutrina atmosferyczne

Zależność liczby neutrin **elektronowych** i **mionowych** od kierunku ($\cos \theta = 1$ gdy lecą do dołu, -1 gdy do góry) \Rightarrow

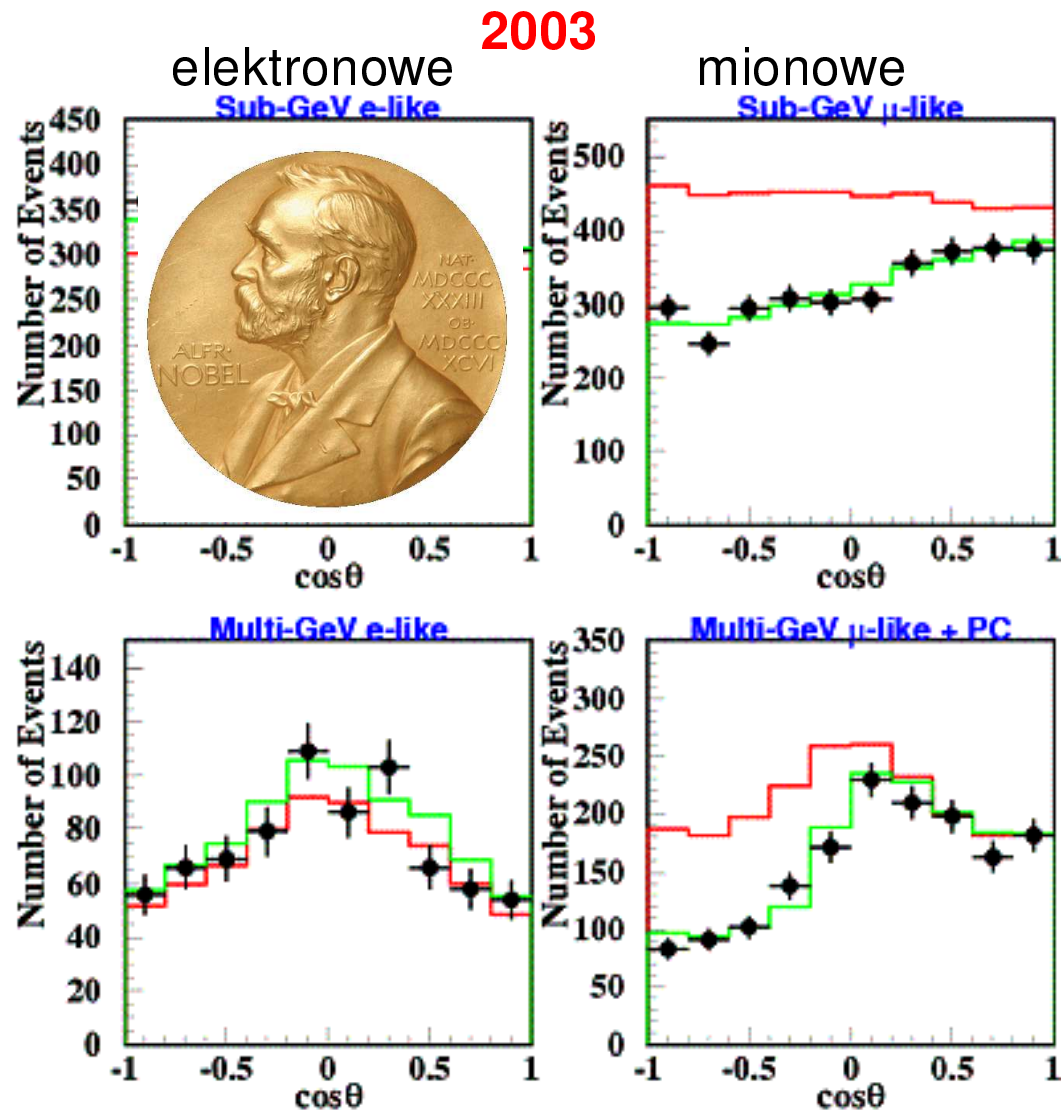
Zgodnie z oczekiwaniami **tylko samo** neutrin **elektronowych** leci **do dołu** ($\cos \theta > 0$) i **do góry** ($\cos \theta < 0$).

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

Czy neutrina mionowe mogą “znikać” przechodząc przez Ziemię ?

Oscylacje neutrin !!!

Nobel 2015



Oscylacje neutrin

Obserwacje

Wyniki doświadczalne wykazały ponad wszelką wątpliwość, że

- neutrina elektronowe ze słońca “znikają” w drodze do Ziemi
- atmosferyczne neutrina mionowe “znikają” przechodząc przez Ziemię choć praktycznie nie oddziałują z materią

Wyjaśnienie

Neutrino nie mają ściśle określonego zapachu (elektronowe/mionowe/taonowe).

Są **mieszkankami** stanów zapachowych.

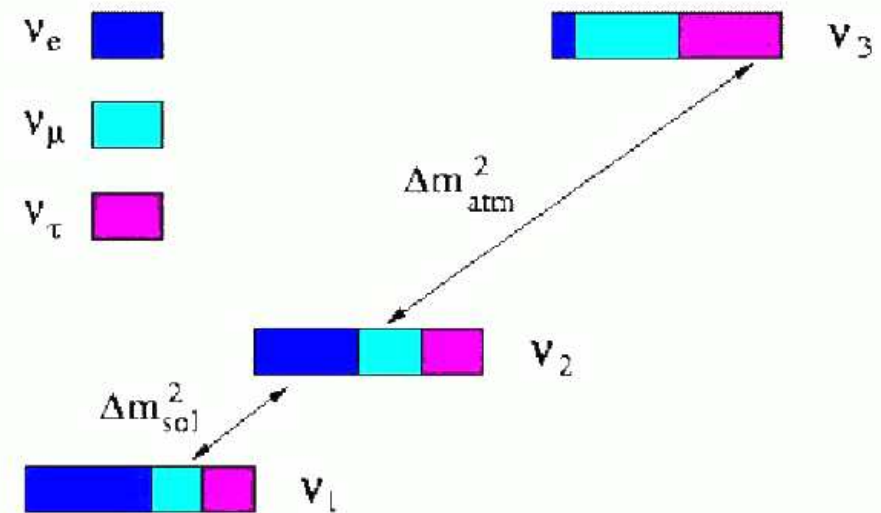
Produkowane neutrina może **zmienić zapach!**

A detektory są czułe głównie na ν_e .

Pełny opis wymaga mechaniki kwantowej.

Wymaga też, żeby neutrina miały masę!

Widmo mas (jedna z możliwości):



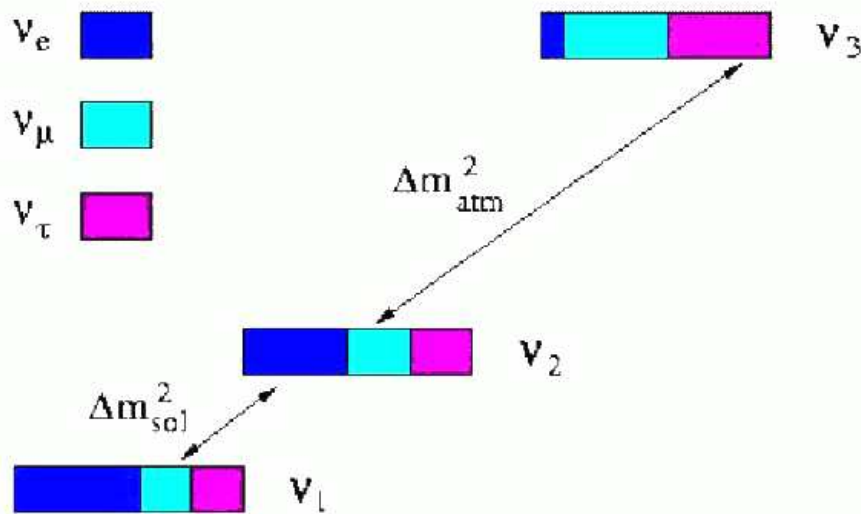
Oscylacje neutrin

W oddziaływaniu określonego leptonu (np. elektronu) produkowane jest nie pojedyncze neutrino, ale **złożenie** kilku stanów (ν_1, ν_2, ν_3).

Każdy z tych stanów zawiera **mieszankę** różnych **zapachów** (ν_e, ν_μ, ν_τ).

Produkowana jest zawsze kombinacja o określonej liczbie leptonowej.

Gdyby neutrino **nie miały masy** to produkowana kombinacja (**superpozycja**) stanów nie zmieniałaby się w czasie \Rightarrow **zachowanie liczby leptonowej**.



Jeśli przyjmiemy, że neutrino mają masę to każdy stan porusza się z inną prędkością.

\Rightarrow własności obserwowanej kombinacji zależą od przebytej odległości, zmieniają się w czasie.

Oscylacje neutrin

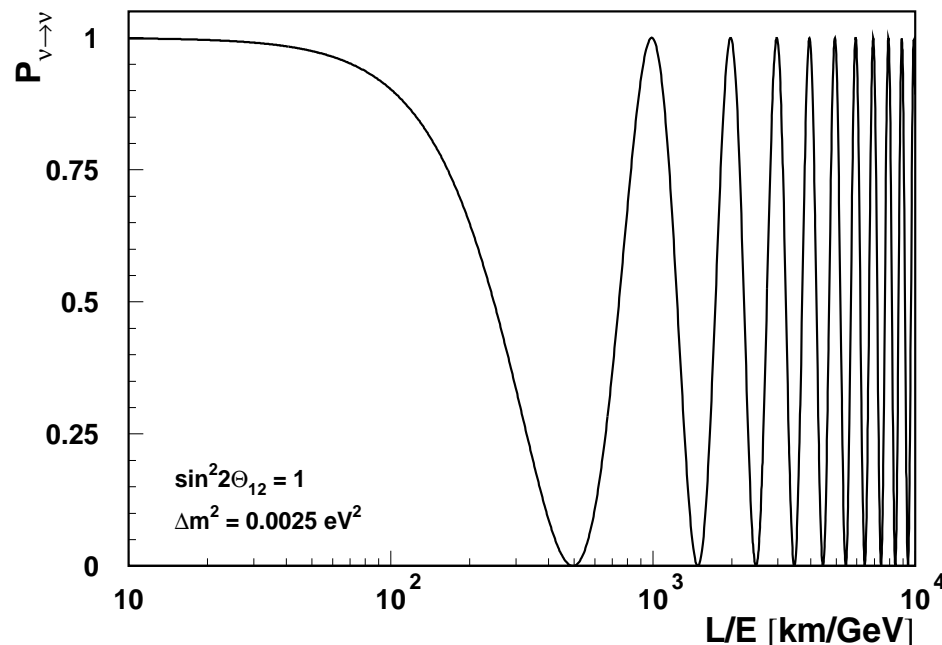
Prawdopodobieństwo “przetrwania”

Mechanika kwantowa pozwala nam policzyć jakie jest **prawdopodobieństwo**, że po czasie t neutrino wyprodukowane jako ν_μ oddziała jako ν_μ .

$$P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu}(t) \approx 1 - \sin^2(2\theta_{12}) \sin^2\left(1.27 \cdot \Delta m^2 \cdot \frac{L}{E}\right)$$

Zakładając, że istotny jest tylko wkład od dwóch stanów ν_1 i ν_2 , $L = c \cdot t$ [km],

$$\Delta m^2 = m_1^2 - m_2^2 \text{ [eV}^2\text{]}, \text{ energia } E \text{ [GeV].}$$



Jesli **różnice mas** są bardzo **małe** to oscylacje pojawiają się dopiero na bardzo **dużych odległości**...

θ_{12} - tzw. kąt mieszania

Dla dużych $L/E \Rightarrow \langle P \rangle \approx \frac{1}{2} \sin^2(2\theta_{12})$

największe “znikane” dla $\theta_{12} = 45^\circ$

Oscylacje neutrin

Model

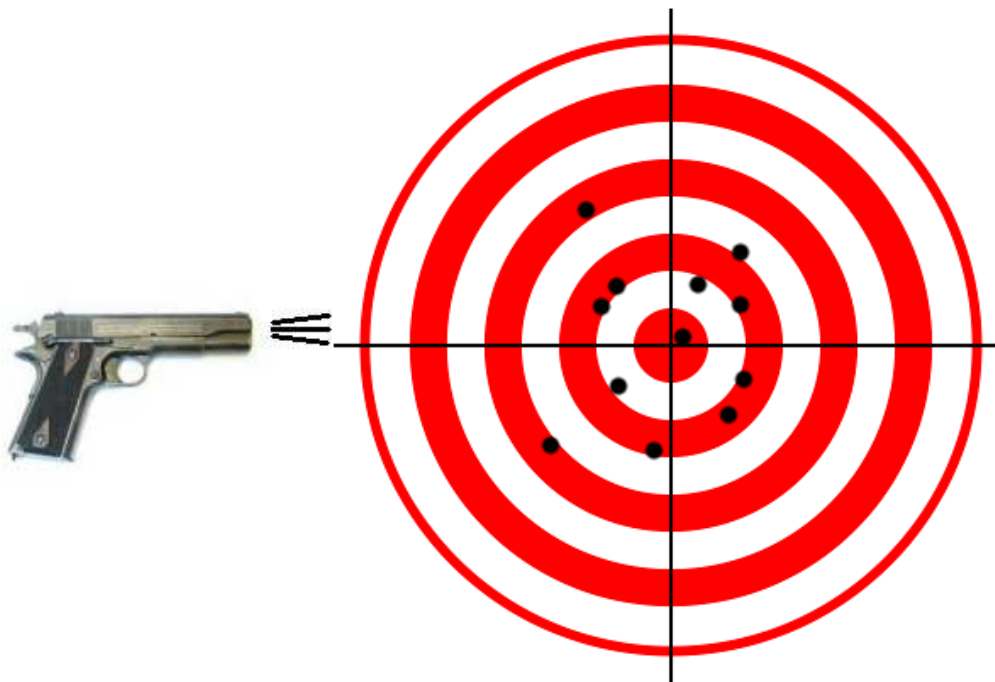
Wyobraźmy sobie, że są trzy kalibry broni, z której możemy strzelać do tarczy, trzy rodzaje pocisków:



Oscylacje neutrin

Model

Wyobraźmy sobie, że są trzy kalibry broni, z której możemy strzelać do tarczy, trzy rodzaje pocisków:

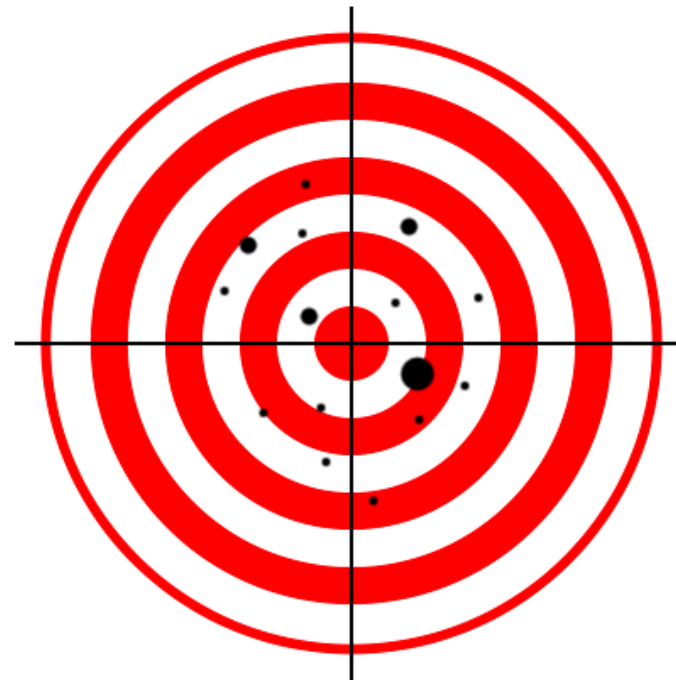


Gdy strzelamy na małą odległość, ślady na tarczy odpowiadają kalibrowi broni...

Oscylacje neutrin

Model

Wyobraźmy sobie, że są trzy kalibry broni, z której możemy strzelać do tarczy, trzy rodzaje pocisków:

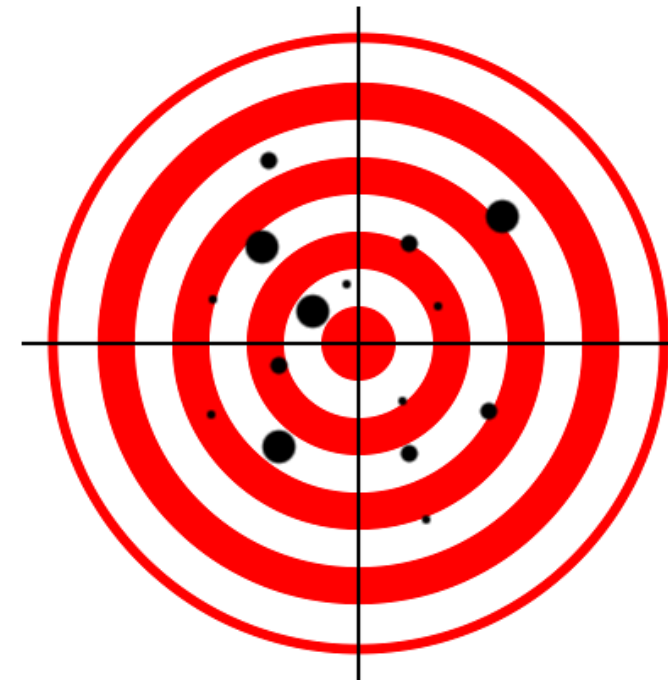


Ale przy większej odległości, kaliber kuli może zmienić się w locie...

Oscylacje neutrin

Model

Wyobraźmy sobie, że są trzy kalibry broni, z której możemy strzelać do tarczy, trzy rodzaje pocisków:



Na bardzo dużych odległościach wszystkie kalibry dokładnie się przemierzają...

Oscylacje neutrin

Neutrina atmosferyczne

Wyniki pomiarów neutrin atmosferycznych w Super-Kamiokande można wytłumaczyć przyjmując, że **neutrina mionowe** “znikają” na skutek oscylacji w **neutrina taonowe**

Dopasowanie do danych, zakładając oscylacje $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$:

$$\Delta m_{\mu\tau}^2 = 0.0025 \text{ eV}^2$$

Neutrina słoneczne

Deficyt neutrin słonecznych można z kolei wytłumaczyć oscylacjami $\nu_e \leftrightarrow \nu_\tau$

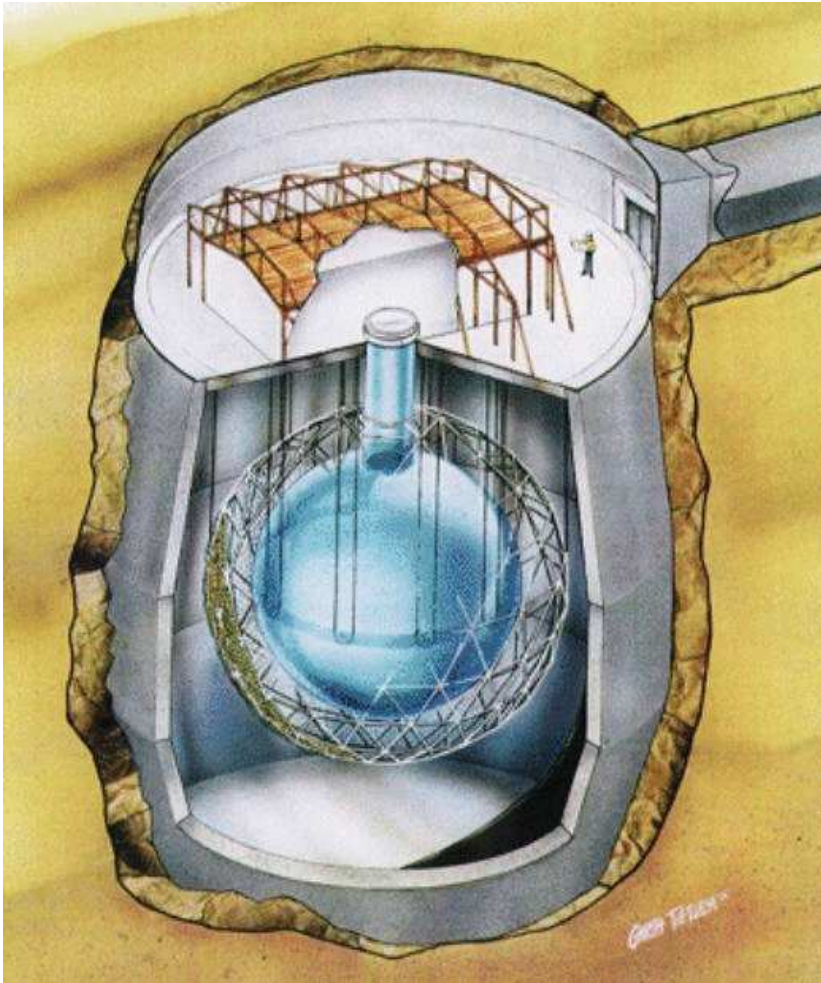
$$\Delta m_{e\tau}^2 \sim 0.0001 \text{ eV}^2$$

dużo słabsze oscylacje \Rightarrow dopiero na odległościach Ziemia-Słońce

\Rightarrow **neutrina muszą mieć masy rzędu 0.01 eV**

SNO

Oscylacje neutrin słonecznych zostały ostatecznie potwierdzone przez Eksperyment SNO (Sudbury Neutrino Observatory)



Ogromny zbiornik wypełniony 7000 t wody (H_2O)
W środku kula z 1000 t **ciężkiej wody** (D_2O)

Promieniowanie Czerenkowa mierzone przez ok. 9500 fotopowielaczy.

Dzięki wykorzystaniu ciężkiej wody detektor czuły jest nie tylko na neutrina elektronowe, ale także na **neutrina mionowe i taonowe**.

Reakcja “ślepa” na zapach neutrin (NC):

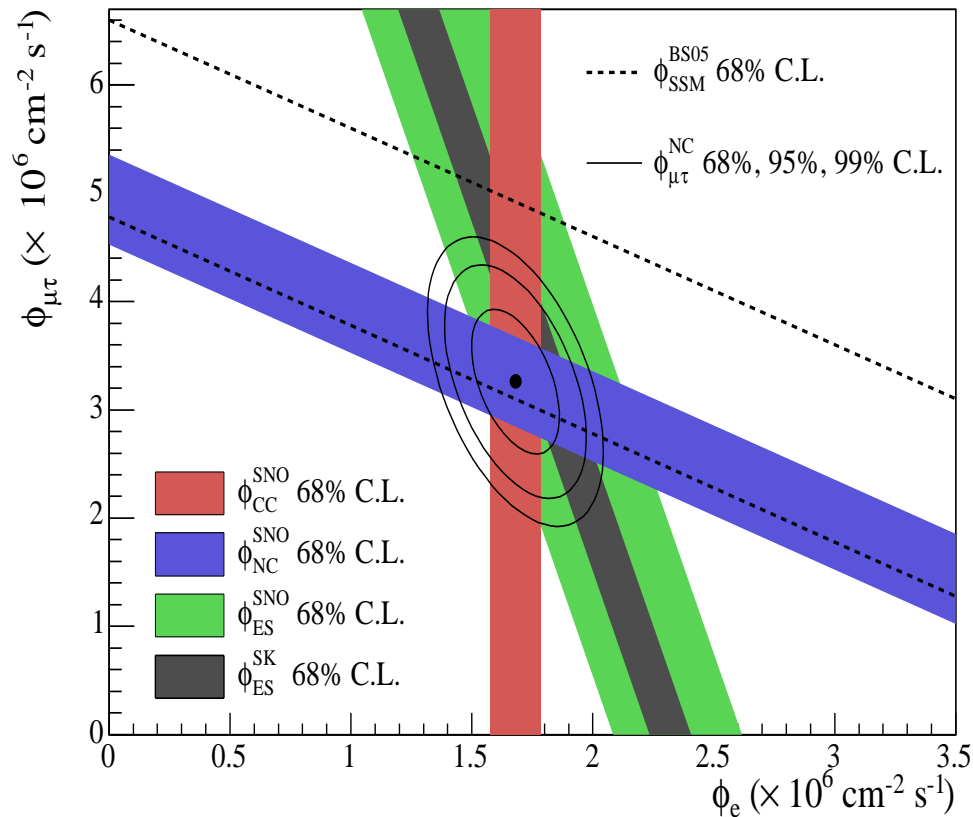


Detektor umieszczony jest na głębokości ponad 2000 m (w kopalni)

Oscylacje neutrin

Eksperyment SNO

Zmierzone strumienie neutrin słonecznych:



Zmierzony całkowity strumień neutrin (pasek niebieski):

$$\Phi_{tot}^{SNO} = 5.1 \pm 0.5 \cdot 10^6 \frac{1}{s \cdot cm^2}$$

bardzo dobrze zgodny z przewidywaniami (przerywane linie).

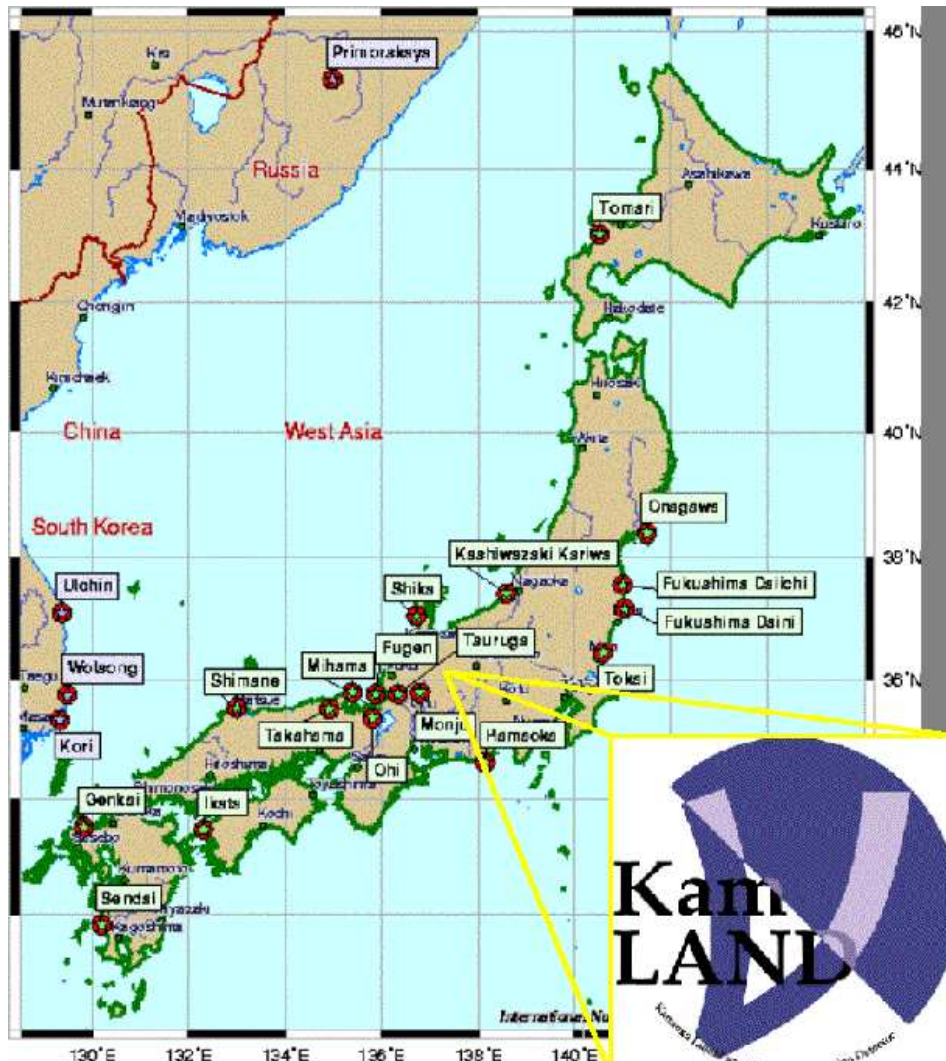
Niezależnie zmierzony strumień ν_e (pasek czerwony):

$$\Phi_e^{SNO} = 1.7 \pm 0.1 \cdot 10^6 \frac{1}{s \cdot cm^2}$$

⇒ neutrina docierające ze Słońca tylko w $\frac{1}{3}$ pozostają neutrinami elektronowymi.

Idealne mieszanie 3 zapachów!

Eksperyment Kamland



Japonia - “mocarstwo” energetyki atomowej.

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

Duży strumień neutrin od licznych reaktorów znajdujących się w odległości **140–210 km**.

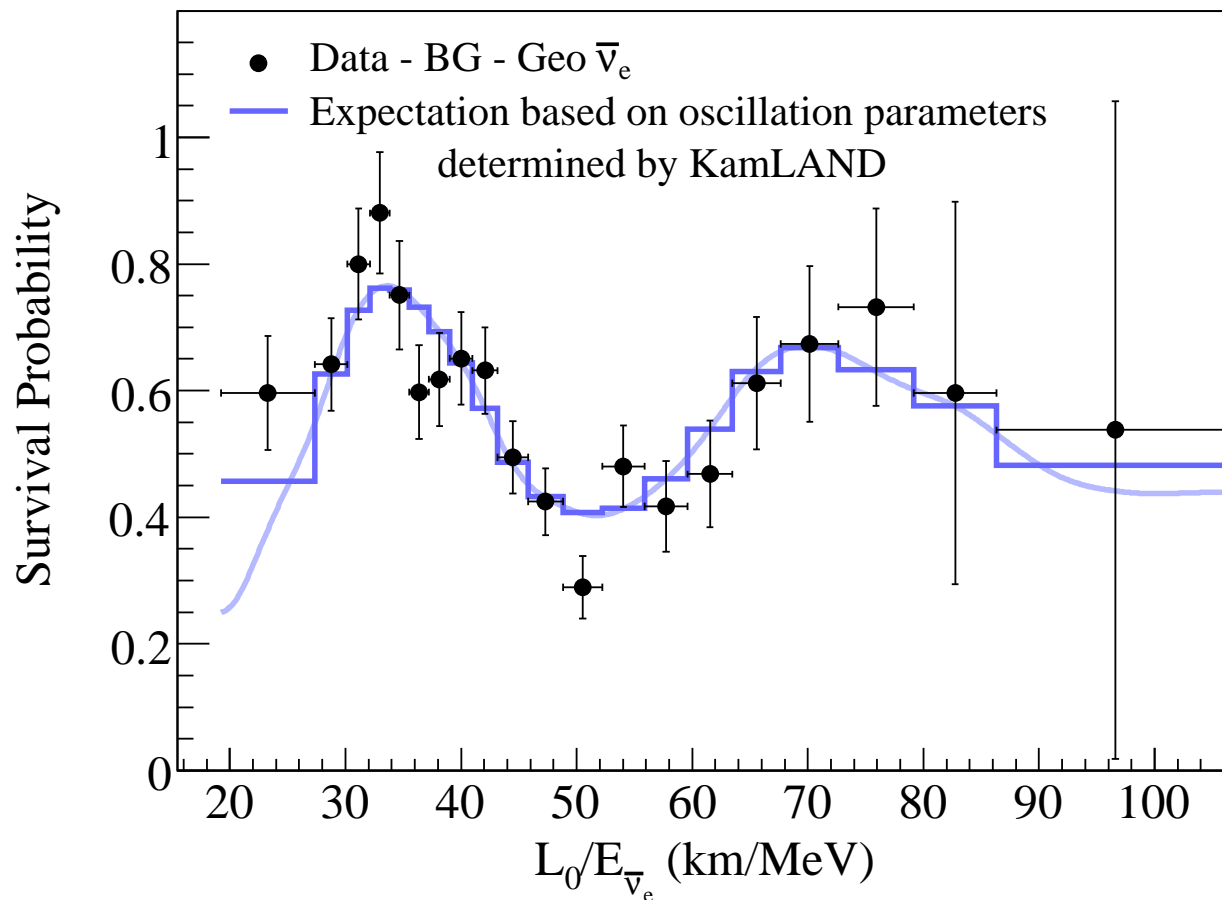
Budowa podobna do SNO:

- 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**.

Oscylacje neutrin

Eksperyment KAMLAND

Zmierzone **prawdopodobieństwo przetrwania** dla neutrin ($\bar{\nu}_e$) reaktorowych:



Wyraźne oscylacje!

“regeneracja” $\bar{\nu}_e$
powyżej 50 km/MeV

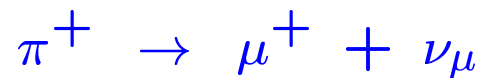
Oscylacje neutrin

MINOS Uruchomiony w 2005

Tzw. eksperyment z “długą bazą”.

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.

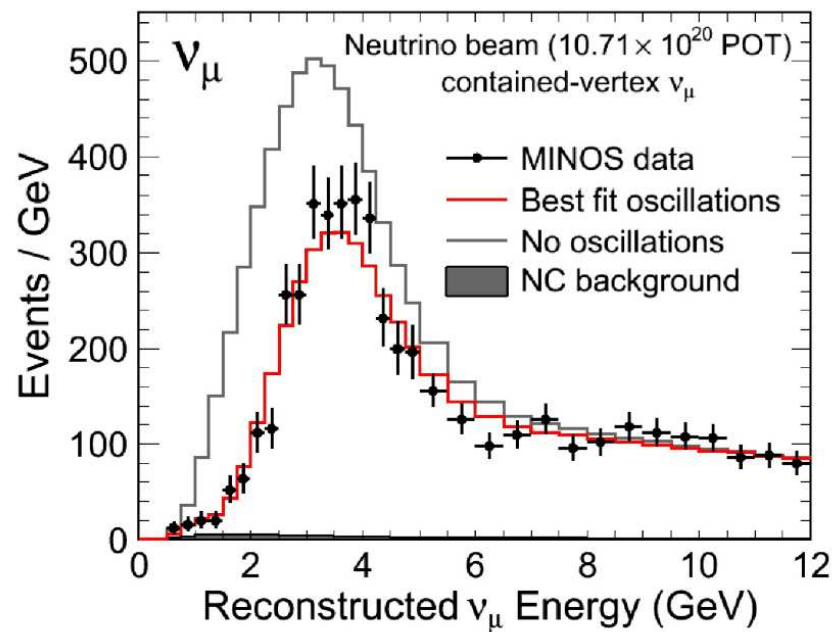


Oscylacje neutrin

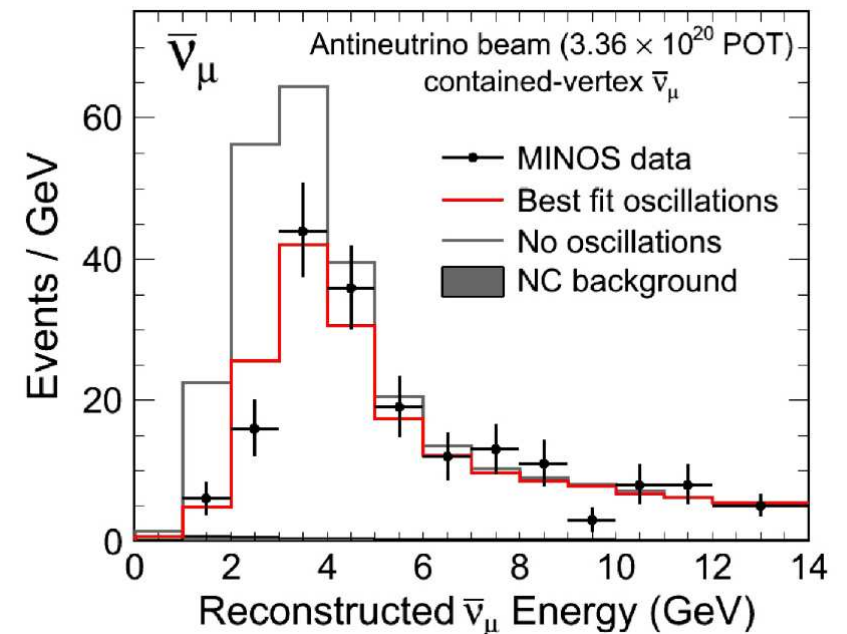
MINOS

“Znikanie” (anty)neutrin mionowych potwierdzone w warunkach laboratoryjnych!

neutrina



antyneutrina



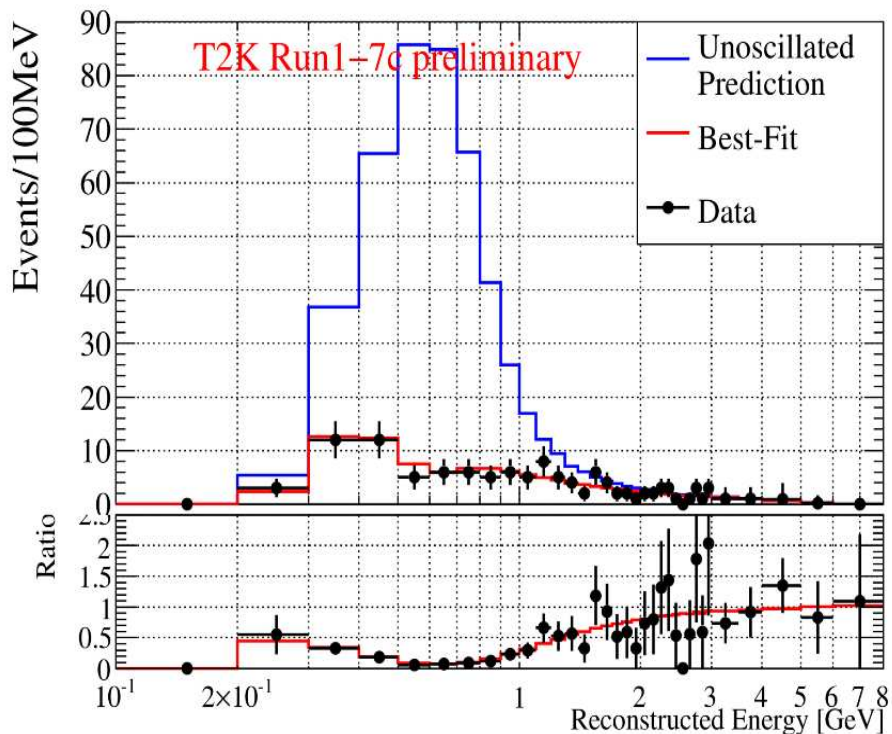
Liczba przypadków niskoenergetycznych niższa niż oczekiwana **bez oscylacji**

Oscylacje neutrin

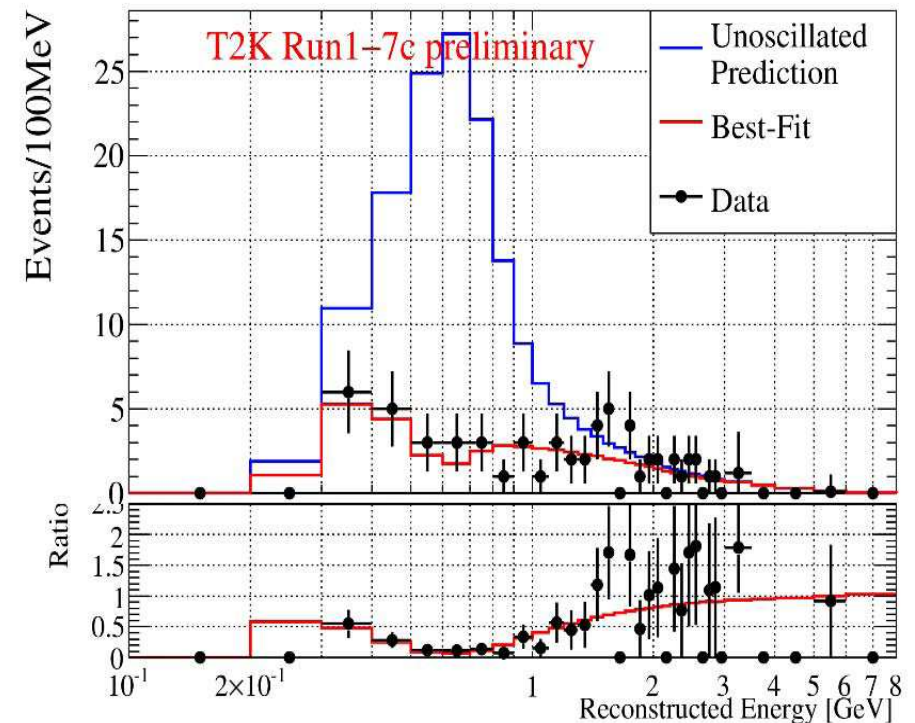
T2K

Analogiczny pomiar w eksperymencie T2K (Tokai to Kamioka) w Japonii

neutrina



antyneutrina



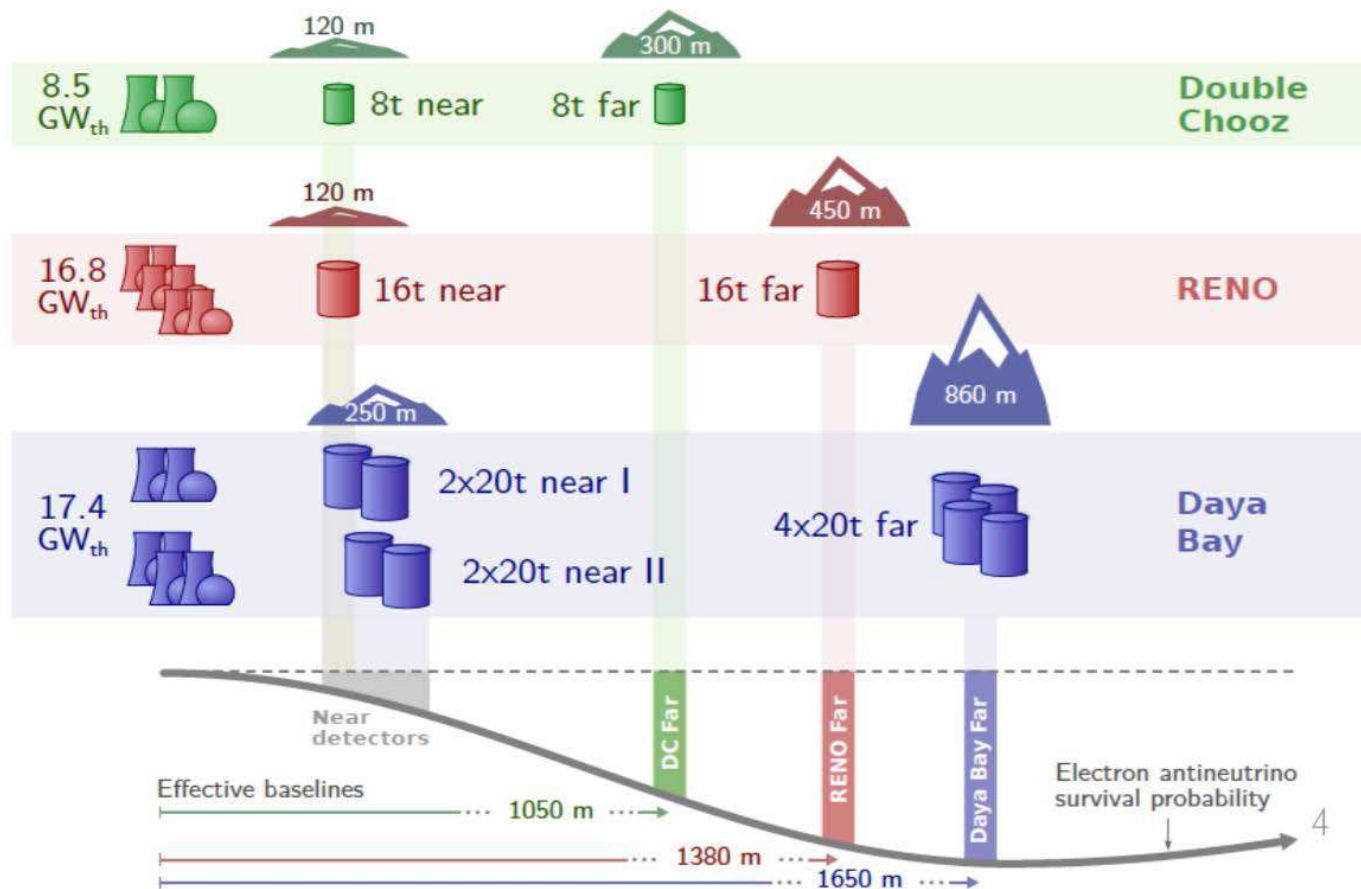
Liczba przypadków w funkcji energii dobrze zgodna z modelem oscylacji

Oscylacje neutrin

Eksperymenty reaktorowe

Pomiary oscylacji na dużych odległościach \Rightarrow dwa kąty mieszania.

Do roku 2012 brakowało pomiaru trzeciego kąta...



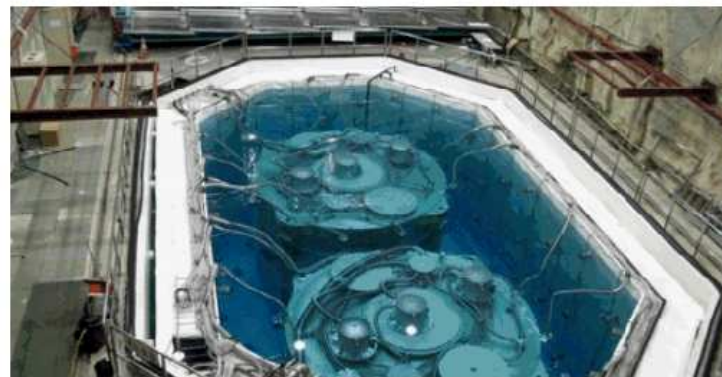
Daya Bay, Chiny



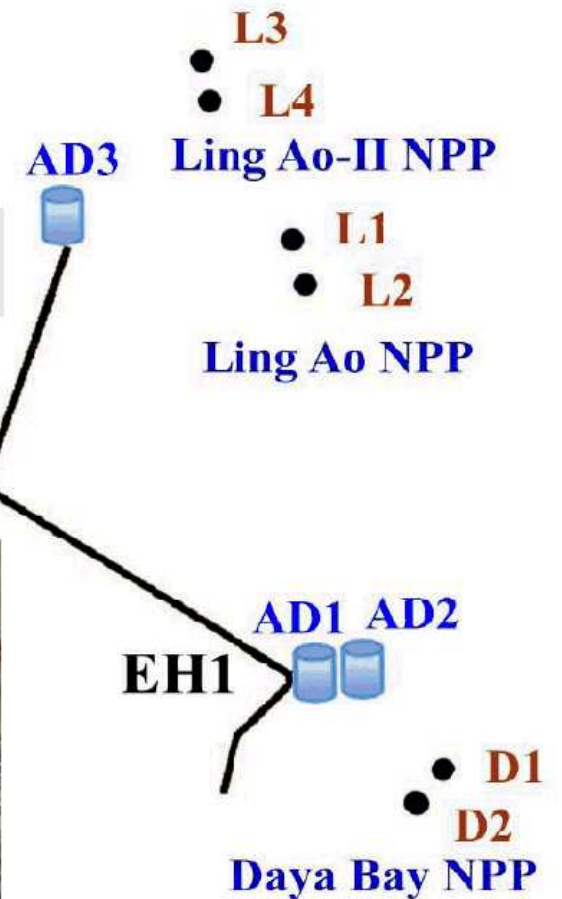
Hall 3: began 3 AD operation on Dec. 24, 2011



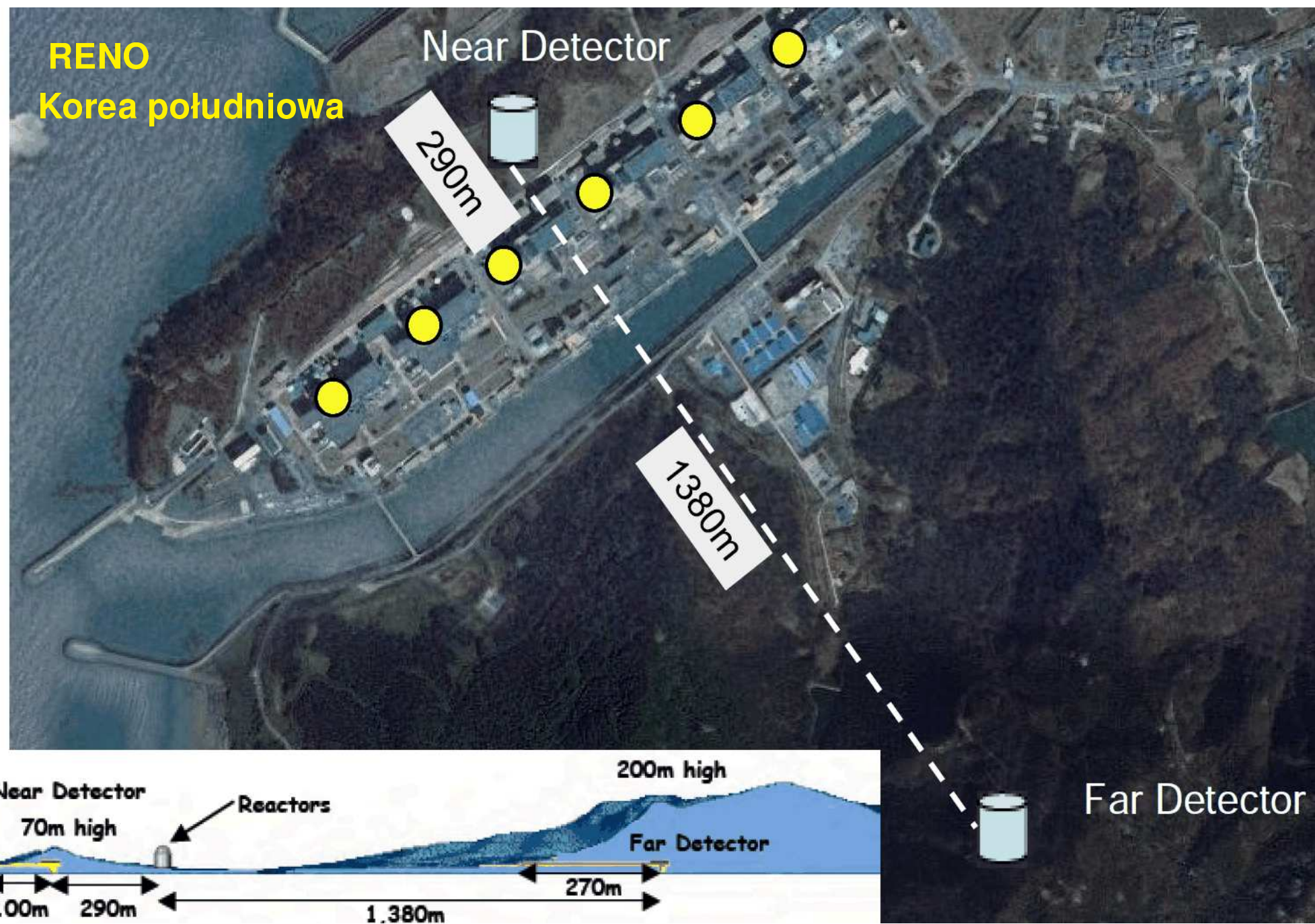
Hall 2: began 1 AD operation on Nov. 5, 2011



Hall 1: began 2 AD operation on Sep. 23, 2011



RENO
Korea południowa



RENO
Korea południowa



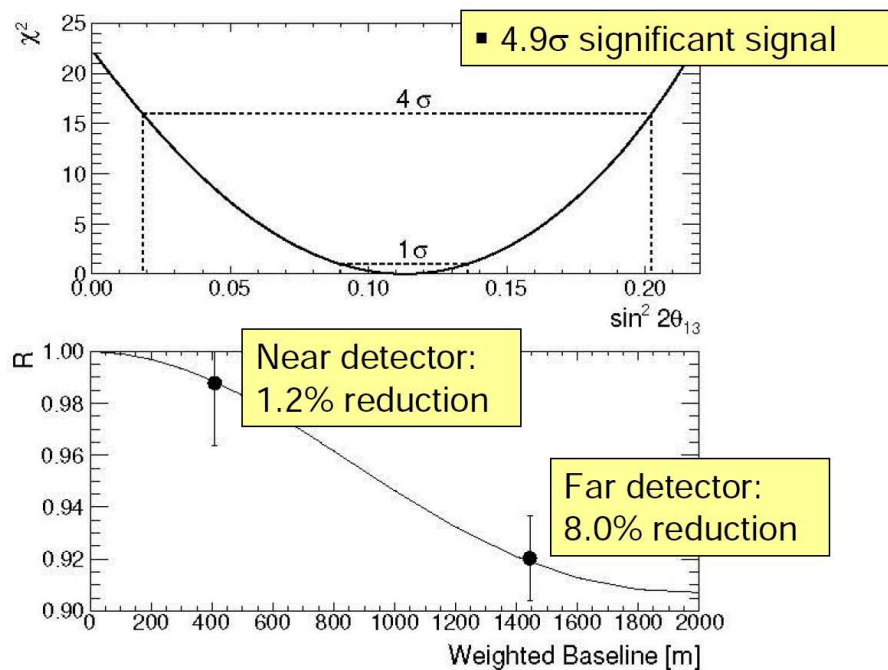
Oscylacje neutrin

Daya Bay i RENO

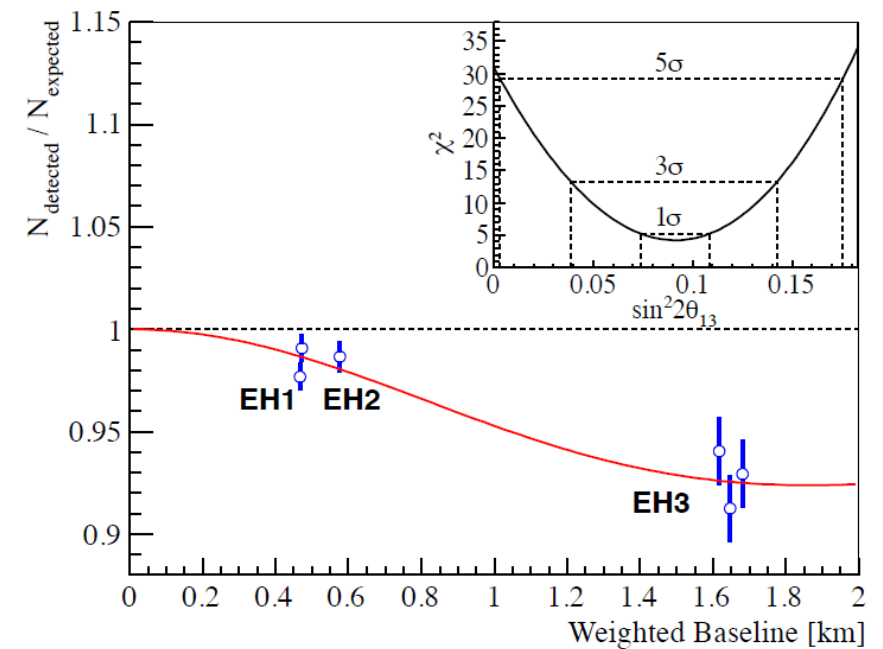
Pierwsze pomiary znikania antyneutrino elektronowych (reaktorowych) na małych (~ 1 km) odległościach

\Rightarrow pomiar “brakującego” kąta mieszania między generacjami 1 i 3 (czerwiec 2012)

RENO



Daya Bay



Oscylacje neutrin

Najnowsze wyniki

Eksperyment Daya Bay jako pierwszy potwierdził ponad wszelką wątpliwość oscylacje między 1 i 3 generacją neutrin.

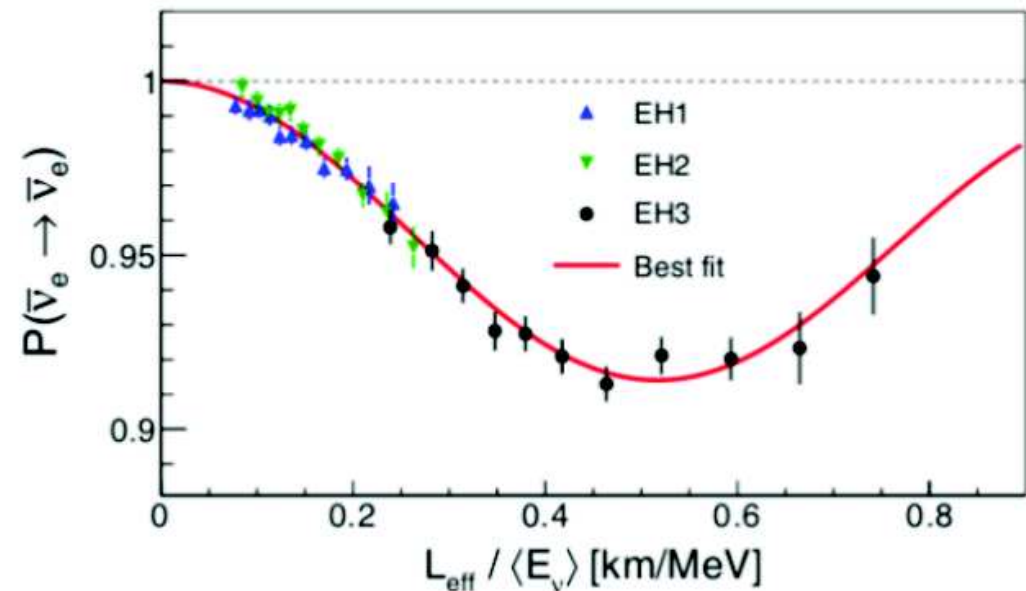
Obecne pomiary parametrów mieszania

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.0841 \pm 0.0033$$
$$\Delta m_{ee}^2 = 0.00250 \pm 0.00009$$

Tym samym poznaliśmy już wszystkie kąty mieszania neutrin

- θ_{12} z neutrin słonecznych
- θ_{23} z neutrin atmosferycznych

Daya Bay 2016



Oscylacje neutrin

Najnowsze wyniki

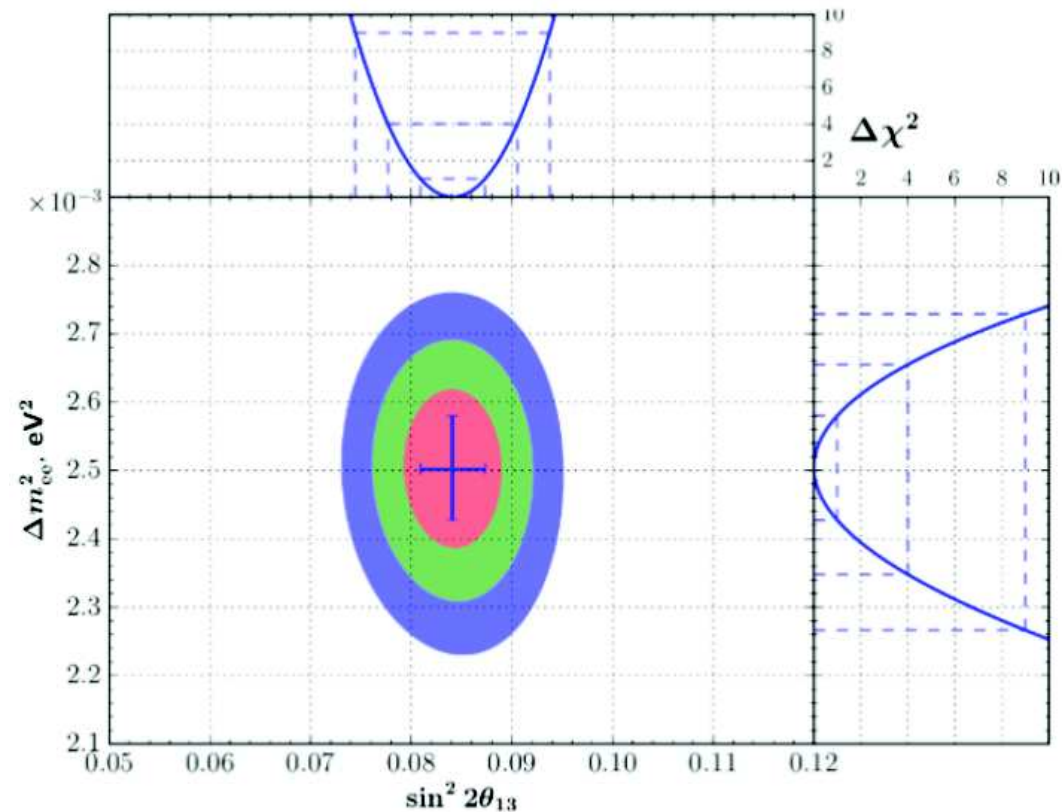
Eksperyment Daya Bay jako pierwszy potwierdził ponad wszelką wątpliwość oscylacje między 1 i 3 generacją neutrin.

Obecne pomiary parametrów mieszania

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.0841 \pm 0.0033$$
$$\Delta m_{ee}^2 = 0.00250 \pm 0.00009$$

Tym samym poznaliśmy już wszystkie kąty mieszania neutrin

- θ_{12} z neutrin słonecznych
- θ_{23} z neutrin atmosferycznych



Oscylacje neutrin

Najnowsze wyniki

Eksperyment Daya Bay jako pierwszy potwierdził ponad wszelką wątpliwość oscylacje między 1 i 3 generacją neutrin.

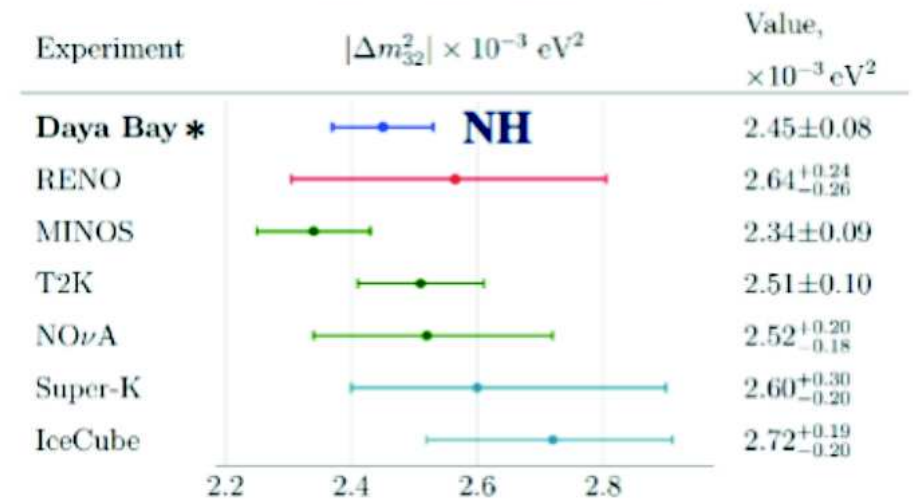
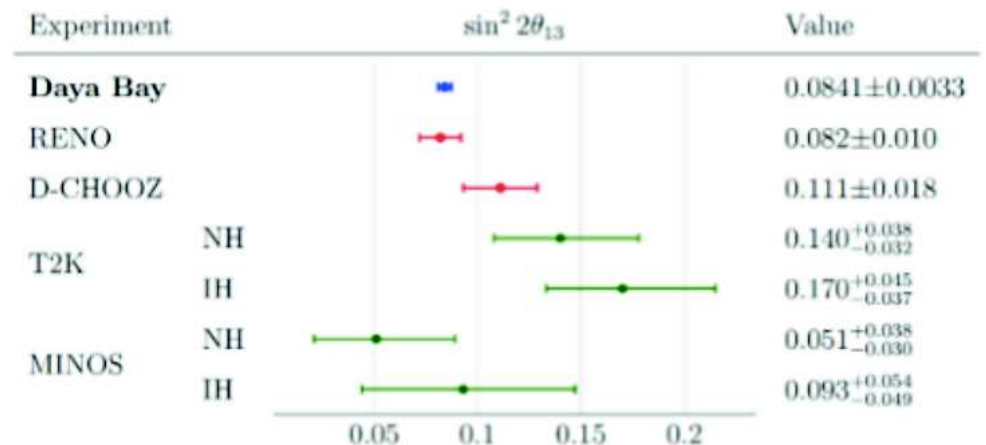
Obecne pomiary parametrów mieszania

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.0841 \pm 0.0033$$

$$\Delta m_{ee}^2 = 0.00250 \pm 0.00009$$

Tym samym poznaliśmy już wszystkie kąty mieszania neutrin

- θ_{12} z neutrin słonecznych
- θ_{23} z neutrin atmosferycznych



* Fit with full 3-flavor oscillation formula

Podsumowanie

Neutrino zapostulowane przez Pauliego miały być bardzo “nudne”.

Pauli nie wierzył w ogóle, że zostaną odkryte!

Do końca XX w. niewiele poświęcano im uwagi.

Eksperyment Super-Kamiokande zbudowano, żeby szukać... rozpadów protonu!

W ciągu ostatnich kilkunastu lat pojawiło się wiele nowych wyników, które zrewolucjonizowały nasze spojrzenie na neutrino.

Obecnie jest to jeden z wiodących kierunków badań w fizyce cząstek!

W roku 2012 poznaliśmy ostatni brakujący parametr mieszania

Obecnie planuje się już budowę kolejnej generacji detektorów neutrin.

Mamy nadzieje, na kolejne przełomowe wyniki...