

Neutrino

Elementy fizyki cząstek elementarnych

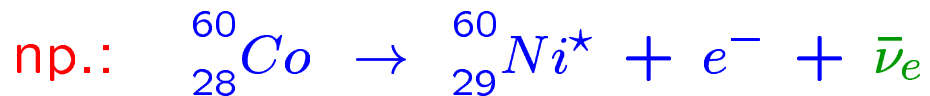
Wykład VII

- Historia neutrin
- Oddziaływania neutrin
- Neutrino atmosferyczne
- Eksperyment Super-Kamiokande
- Oscylacje neutrin

Neutrino

Neutrino elektronowe

Zaproponowane przez Pauliego do wyjaśnienia pozornego **naruszenie** zasady zachowania energii w **rozpadzie β** :



na poziomie cząstek:



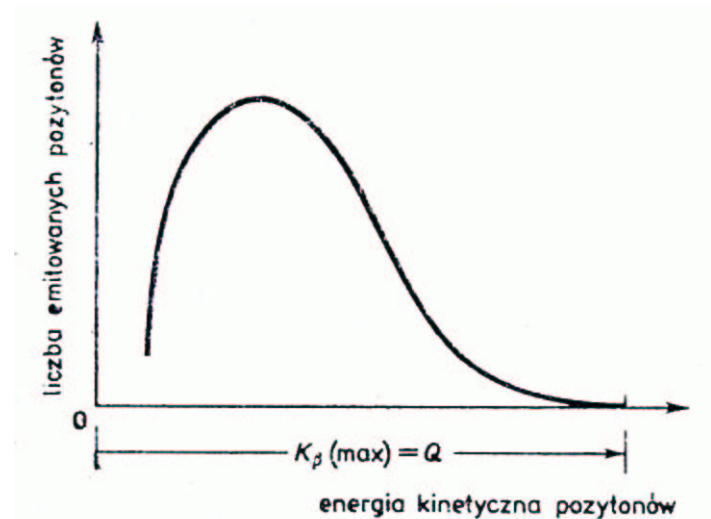
Postulowane właściwości:

- bardzo słabo oddziałuje z materią
- ma zaniedbywalną masę

Do niedawna zakładaliśmy, że neutrino ma zerową masę...

Na masy neutrin istnieją też liczne ograniczenia **astrofizyczne** i **kosmologiczne**

Ciągłe widmo energii:



Ograniczenia na masy (95% CL):

z bezpośredniego pomiaru

$$m_{\nu_e} < 2.2 \text{ eV} \approx 4.3 \cdot 10^{-6} m_e$$

$$m_{\nu_\mu} < 170 \text{ keV} \approx 0.0018 m_\mu$$

$$m_{\nu_\tau} < 15.5 \text{ MeV} \approx 0.01 m_\tau$$

Neutrino

Przekrój czynny

Przekrój czynny na oddziaływanie neutrin z materią jest **niewyobrażalnie mały**.

Dla neutrin o energii rzędu 1 MeV

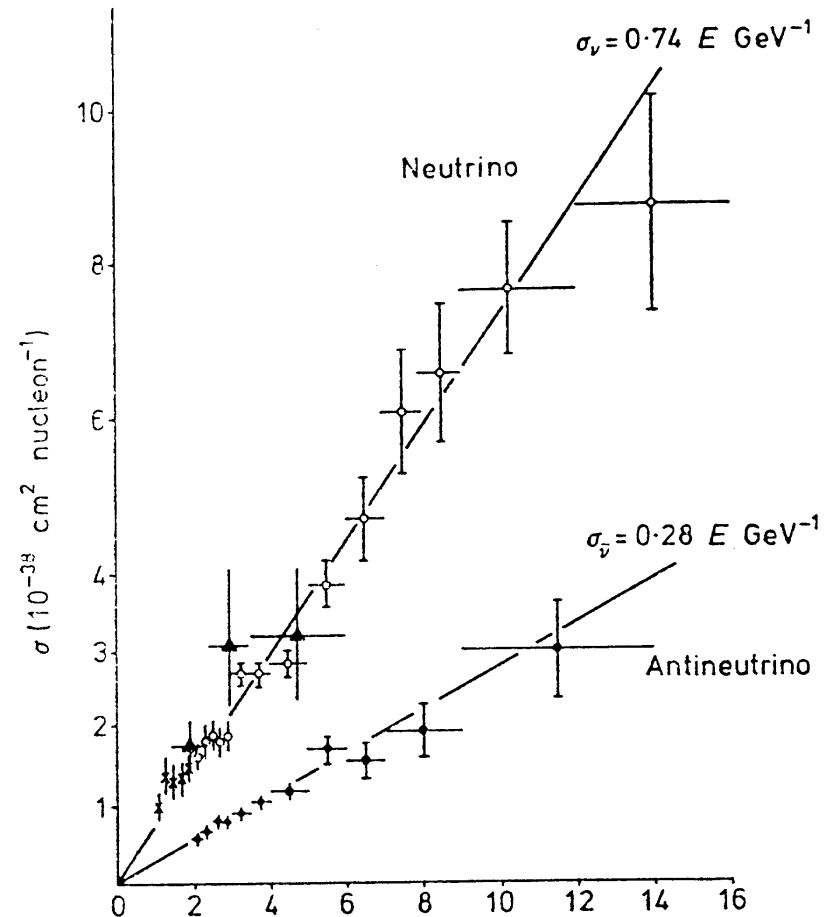
$$\sigma_{\nu N} \sim 10^{-43} \text{ cm}^2 = 10^{-19} \text{ b}$$

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

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

Badanie oddziaływań neutrin możliwe jest tylko w oparciu o **bardzo intensywnego źródła...**

Słońce, promieniowanie kosmiczne, reaktory jądrowe, oddziaływania cząstek...



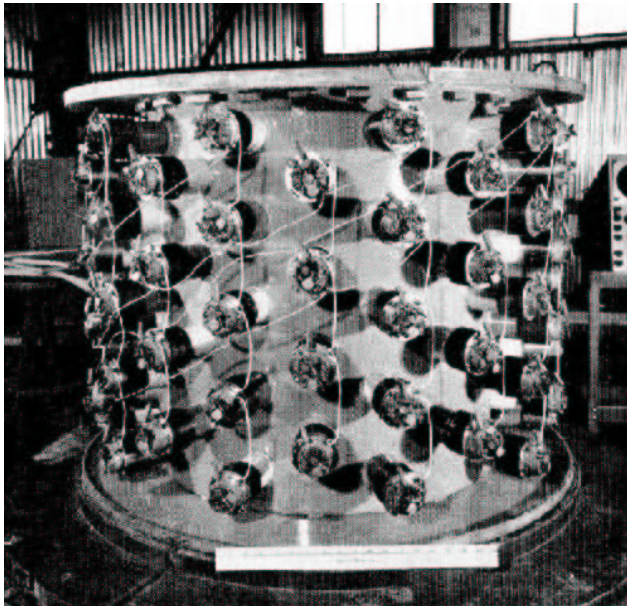
Neutrino

Doświadczenia Reinesa i Cowana (1953-1959)

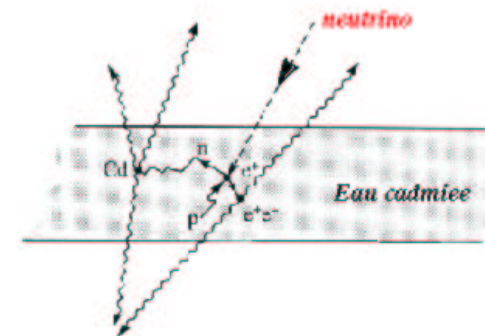
Oddziaływanie **neutrino** **zaobserwowano** po raz pierwszy wykorzystując jako źródło **reaktor jądrowy**. Produkcja **neutrino** w rozpadach neutronów:



Detektor:



Zaobserwowano reakcję



- produkowane pozytrony anihilują emitując **fotony**.
 - kadm zawarty w wodzie wychwytuje neutrony co także prowadzi do emisji **fotonów**.
- ⇒ **koincydencja** dwóch sygnałów jest sygnaturą szukanej reakcji

Neutrina

Wiązki neutrin

Neutrina powstają w **rozpadach pionów** i **kaonów**, które potrafimy licznie produkować w **oddziaływaniach hadronów** (np. zderzając protony z tarczą):



W ten sposób otrzymujemy “szerokopasmową” **wiązkę neutrin** (Wide Band Beam, WBB).

Wytwarzanie intensywnych wiązek **neutrin** i **antyneutrin** z rozpadów wiązek π^\pm i K^\pm
⇒ **przełom** w badaniach oddziaływań słabych (≥ 1963)

Jesli dokonamy wstępnej **selekcji** pionów i kaonów w spektrometrze (ze względu na **znak** i **pęd**) otrzymamy wiązkę w której **energia** neutrina **zależy od kierunku** jego emisji.

⇒ Wiązka “**wąskopasmowa**” (Narrow Band Beam; NBB)

Neutrino

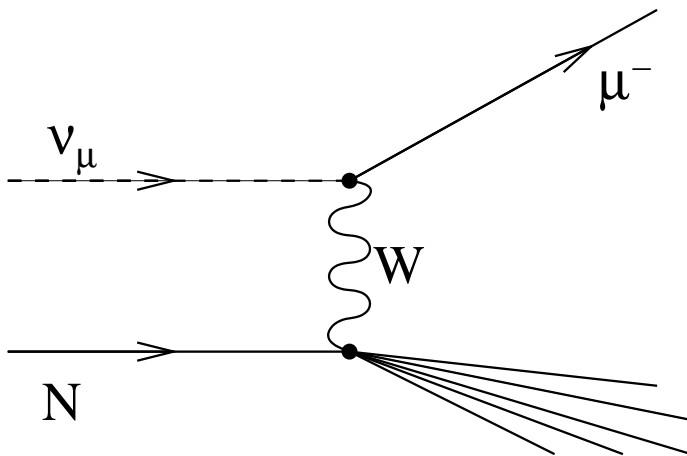
Oddziaływania

W rozpadach **pionów** i **kaonów** produkowane są prawie wyłącznie **neutrino mionowe**.

W wyniku ich oddziaływania w detektorze

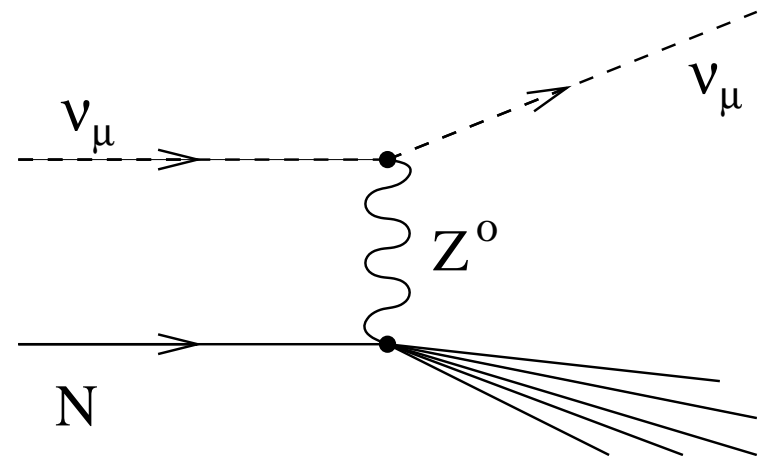
na ogół **produkowany** jest
wysokoenergetyczny **mion**

⇒ oddziaływania typu **CC**:



Choć obserwujemy też oddziaływania
bez produkcji **mionu**

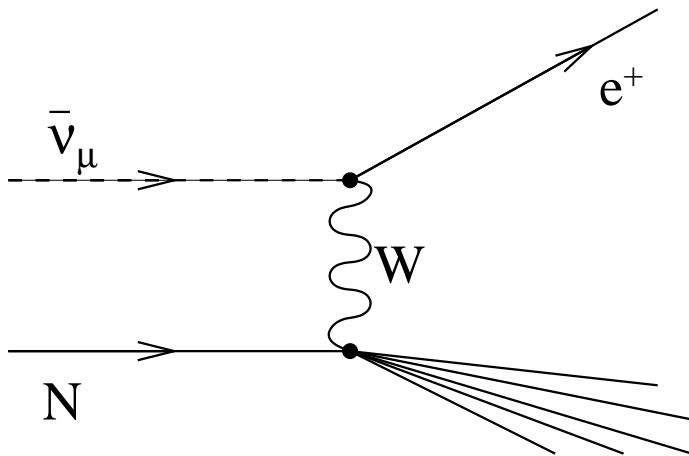
⇒ oddziaływania typu **NC**:



Neutrino

Zachowanie liczby leptonowej

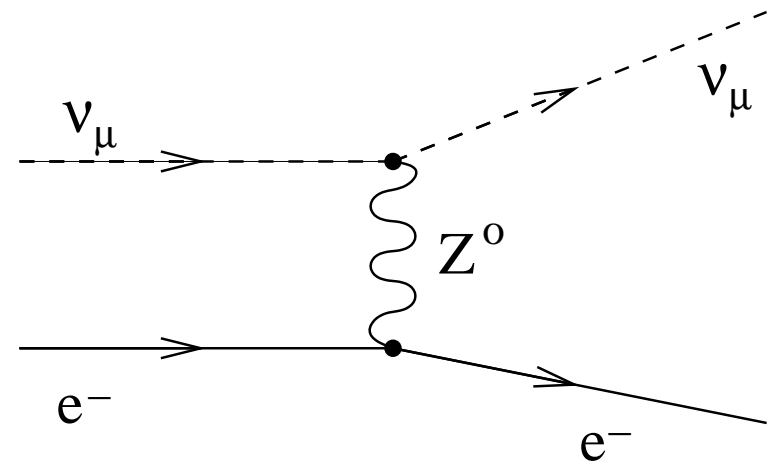
Nie obserwujemy natomiast oddziaływań $\bar{\nu}_\mu$ z produkcją pozytonu:



⇒ zachowanie liczby leptonowej

Każdy naładowany lepton ma “swoje” neutrino.

W rozpraszaniu ν_μ i $\bar{\nu}_\mu$ możliwa jest natomiast “produkcja” (wybicie) elektronu poprzez oddziaływania typu NC:



Neutrina

Model Standardowy

W **Modelu Standardowym** przyjmowaliśmy do niedawna, że

- neutrina są bezmasowe
i
- liczba leptonowa jest ściśle zachowana

Oba te postulaty wynikały tylko z danych **doświadczalnych**

Ogólna teoria nie narzuca zachowania liczby leptonowej !

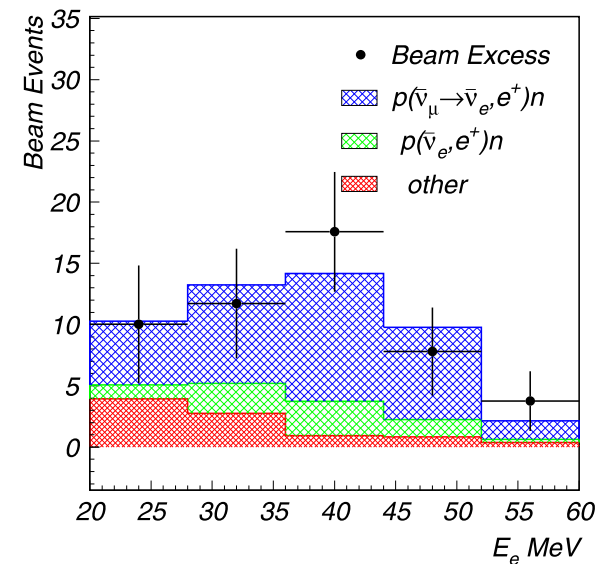
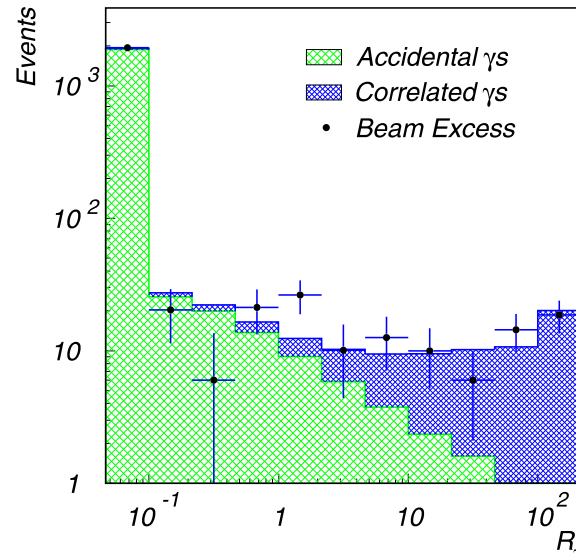
Eksperyment LSND

w Los Alamos

167 ton scyntylatora na wiązce neutronów o dużej intensywności

Rozpady π^+ \Rightarrow tylko ν_μ , $\bar{\nu}_\mu$ i ν_e .

Obserwujemy jednak reakcję $\bar{\nu}_X p \rightarrow n e^+$:



Łamane zachowanie liczby leptonowej !?

Neutrina atmosferyczne

Promieniowanie kosmiczne

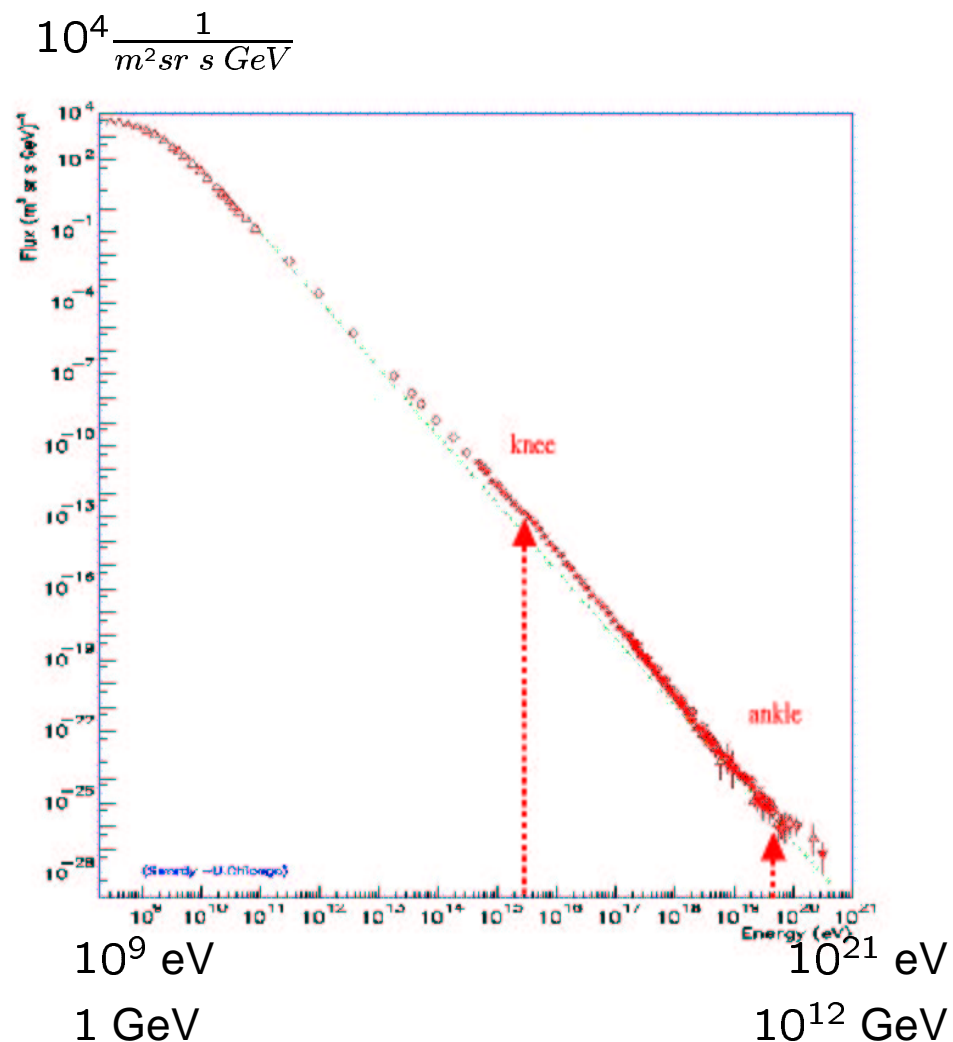
Przestrzeń kosmiczna wypełniona jest cząstkami o energiach dochodzących do 10^{12} GeV (10^{21} eV).

⇒ promieniowanie kosmiczne

poza atmosferą ziemską ⇒ “pierwotne”

Skład “pierwotnego” promieniowania kosmicznego (pomijając neutrina):

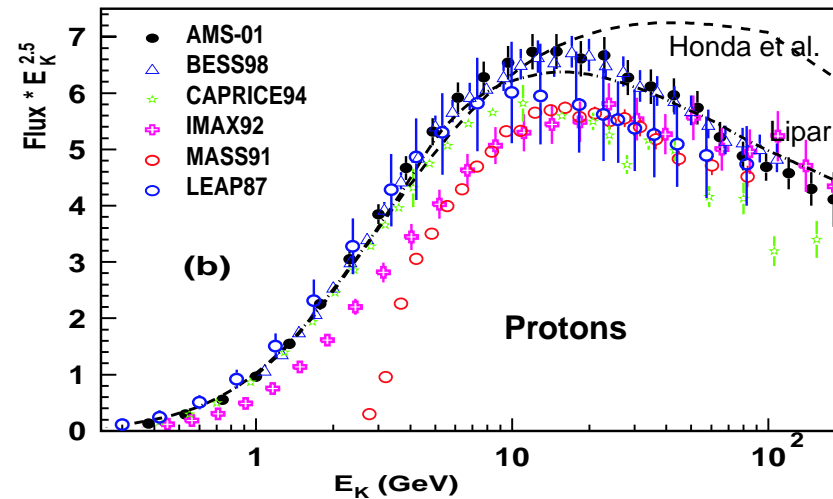
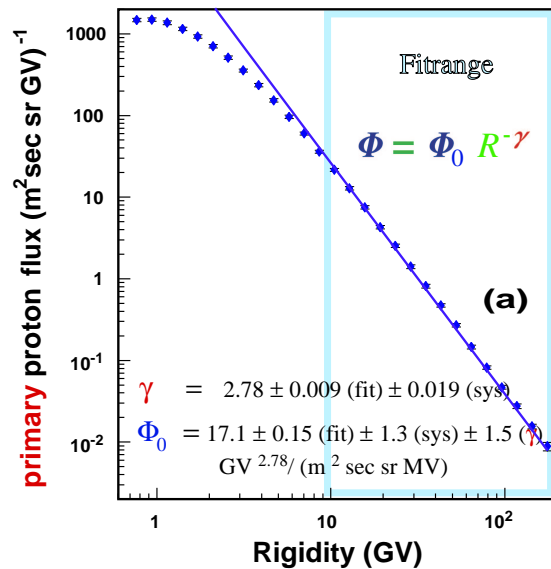
- protony (jądra H) $\sim 86\%$
- cząstki α (jądra He) $\sim 13\%$
- jądra cięższych pierwiastków $\sim 1\%$
- neutrony, elektrony, fotony $\ll 1\%$



Neutrina atmosferyczne

Promieniowanie kosmiczne

Strumień cząstek promieniowania pierwotnego **maleje** dla dużych energii jak $E^{-2.78}$:



Większość cząstek ma **energje rzędu 10 GeV**.

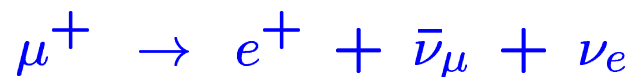
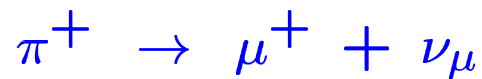
Cząstki **promieniowania pierwotnego** nie docierają (na szczęście) do powierzchni Ziemi. Tracą energię w **oddziaływaniach z jądrami** azotu i tlenu produkując **liczne cząstki wtórne**, głównie piony.

Neutrina atmosferyczne

Produkcja

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

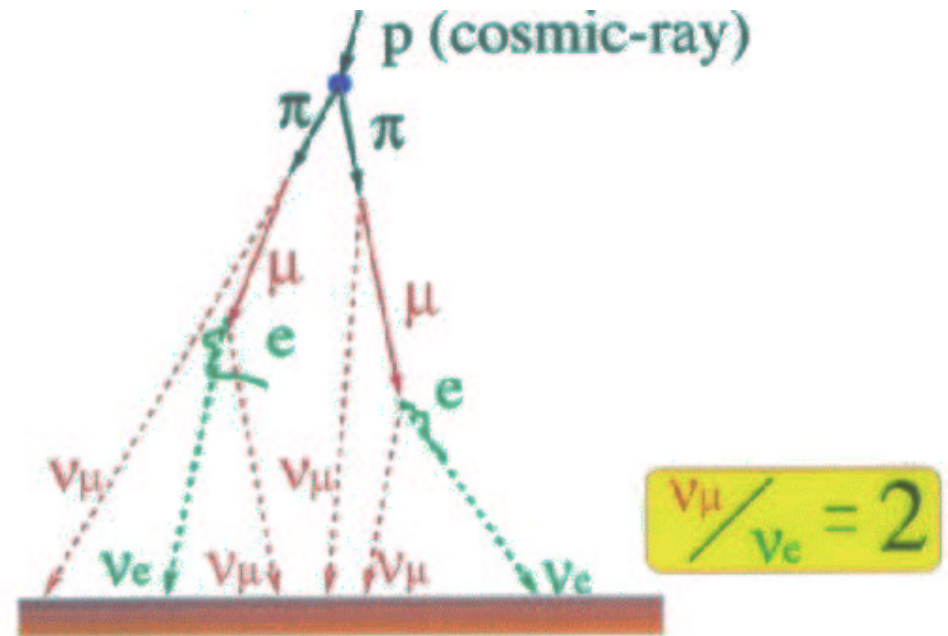
W wyniku **rozpadów**:



(podobnie dla π^-/μ^-)

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

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

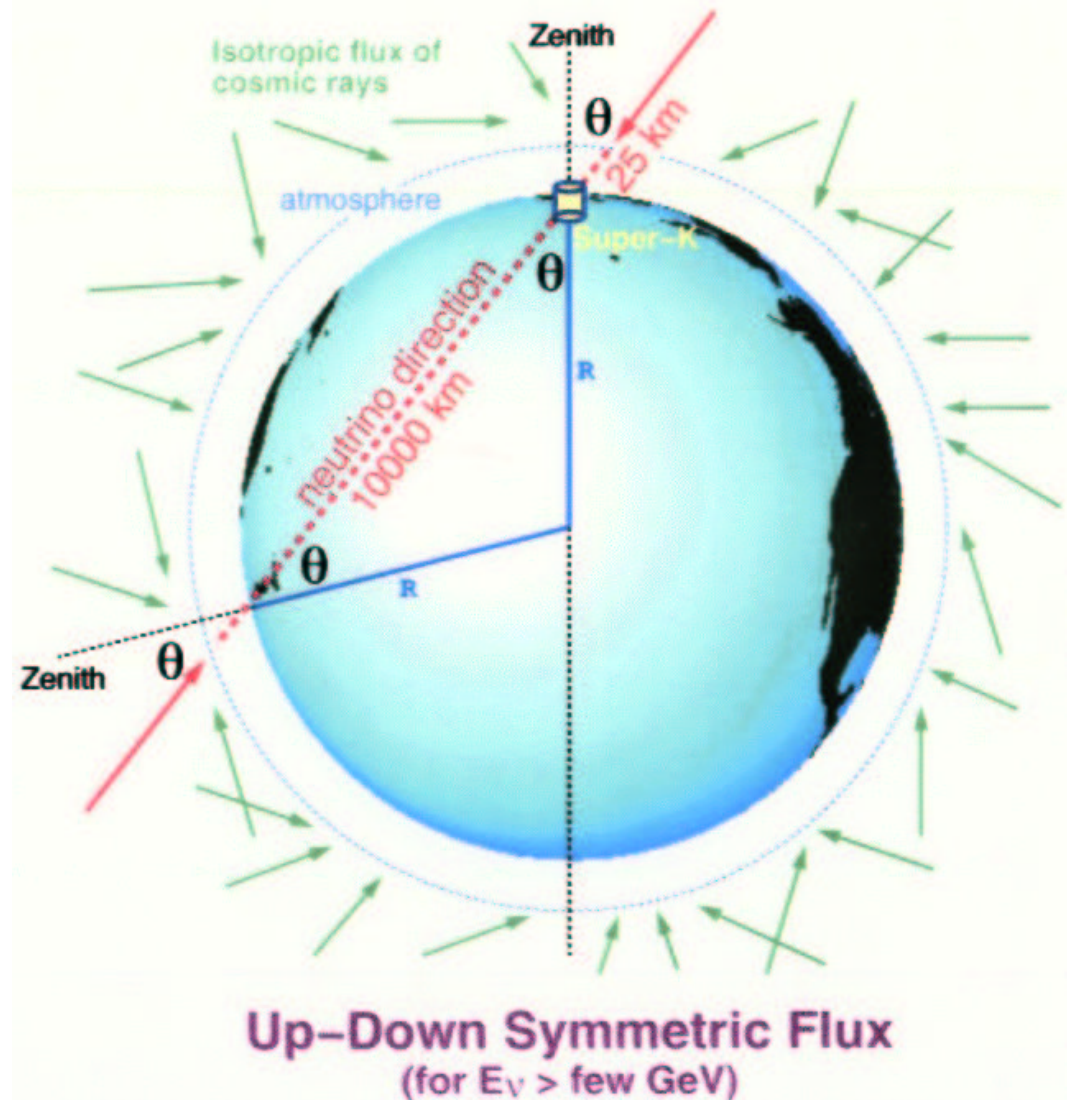


Neutrina atmosferyczne

Rozkład kątowy

Pierwotne promieniowanie kosmiczne jest izotropowe.

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



Neutrino atmosferyczne

Eksperyment Super-Kamiokande

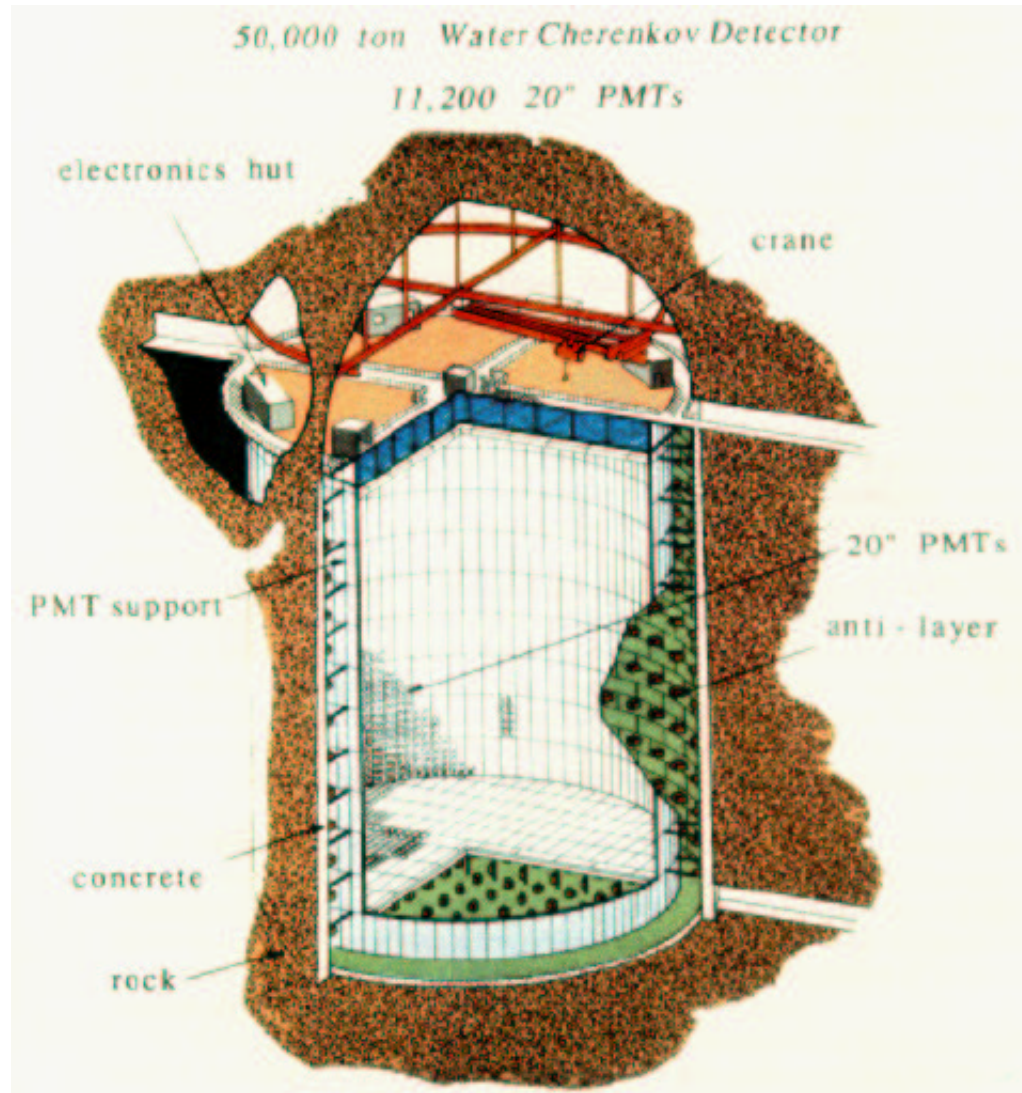
Japonia, w starej kopalni, 1 km pod górą Kamioka, komora o wysokości 40 m i średnicy 40 m, wypełniona **wodą**

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)



Napełnianie

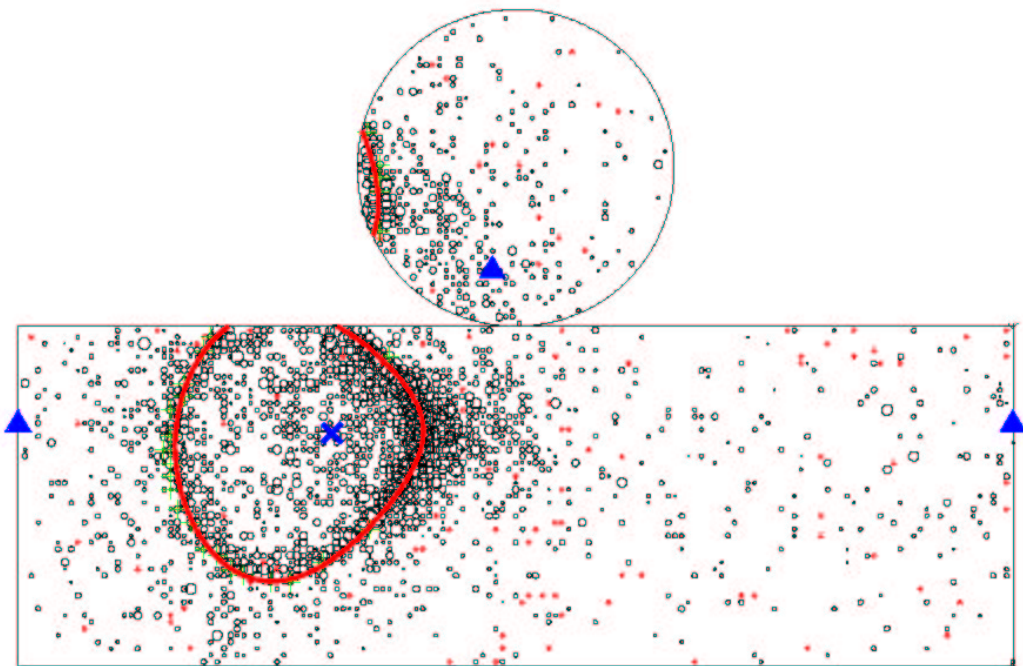


Super-Kamiokande

Neutrino elektronowe

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

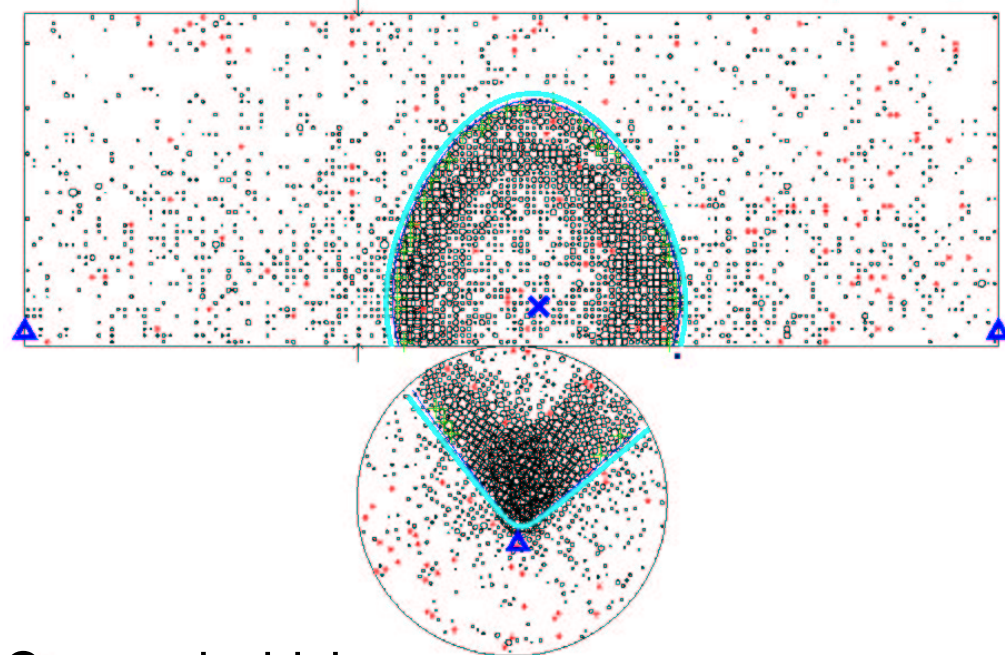
Krótki zasięg elektronu - “cienki” pierścień



Neutrino mionowe

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

Długa droga w wodzie - “gruby” pierścień.



Czasami widzimy
też opóźniony sygnał e^- z rozpadu μ^- .

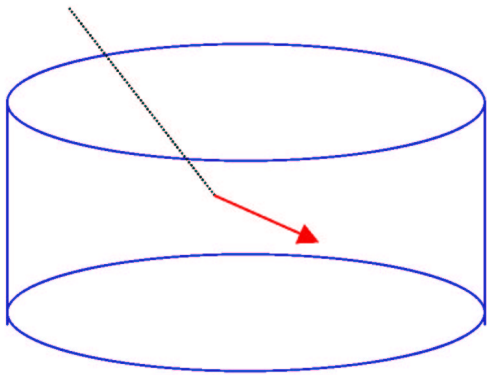
Super-Kamiokande

Klasyfikacja przypadków

Przypadki które rozpoznajemy jako **oddziaływania neutrin**:

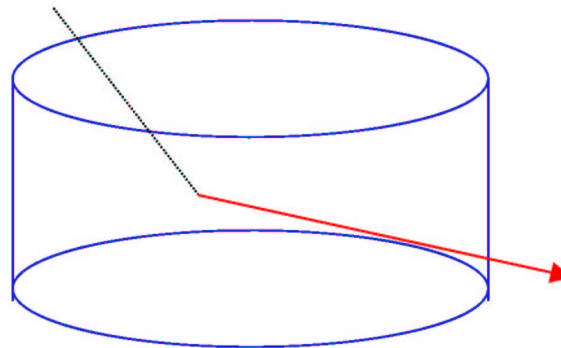
FC: Fully Contained

Elektron lub niskoenergetyczny mion **wyprodukowany** w detektorze **zatrzymuje się** w nim



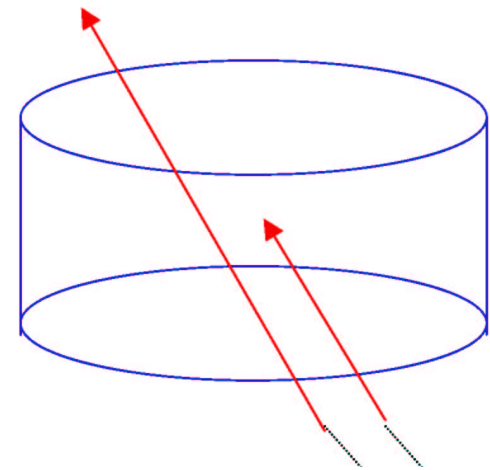
PC: Partially Contained

Wysokoenergetyczny mion **wyprodukowany** w środku **ucieka** z detektora



Upward

Miony **wpadające** do detektora **od dołu**



Super-Kamiokande

Wyniki

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

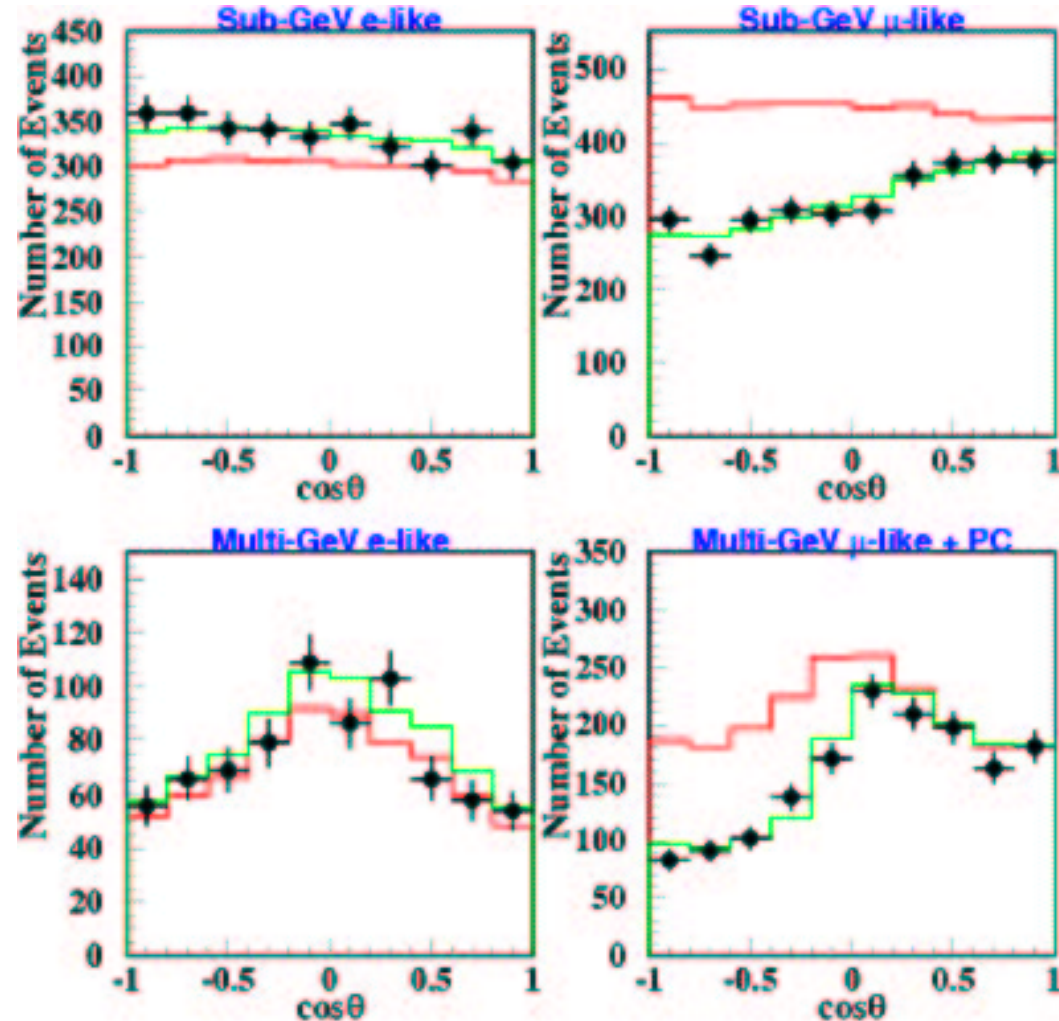
Zgodnie z oczekiwaniami **tyle samo** neutrin **elektronowych** leci **do dołu** ($\cos\theta > 0$) i **do góry** ($\cos\theta < 0$).

Neutrino 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

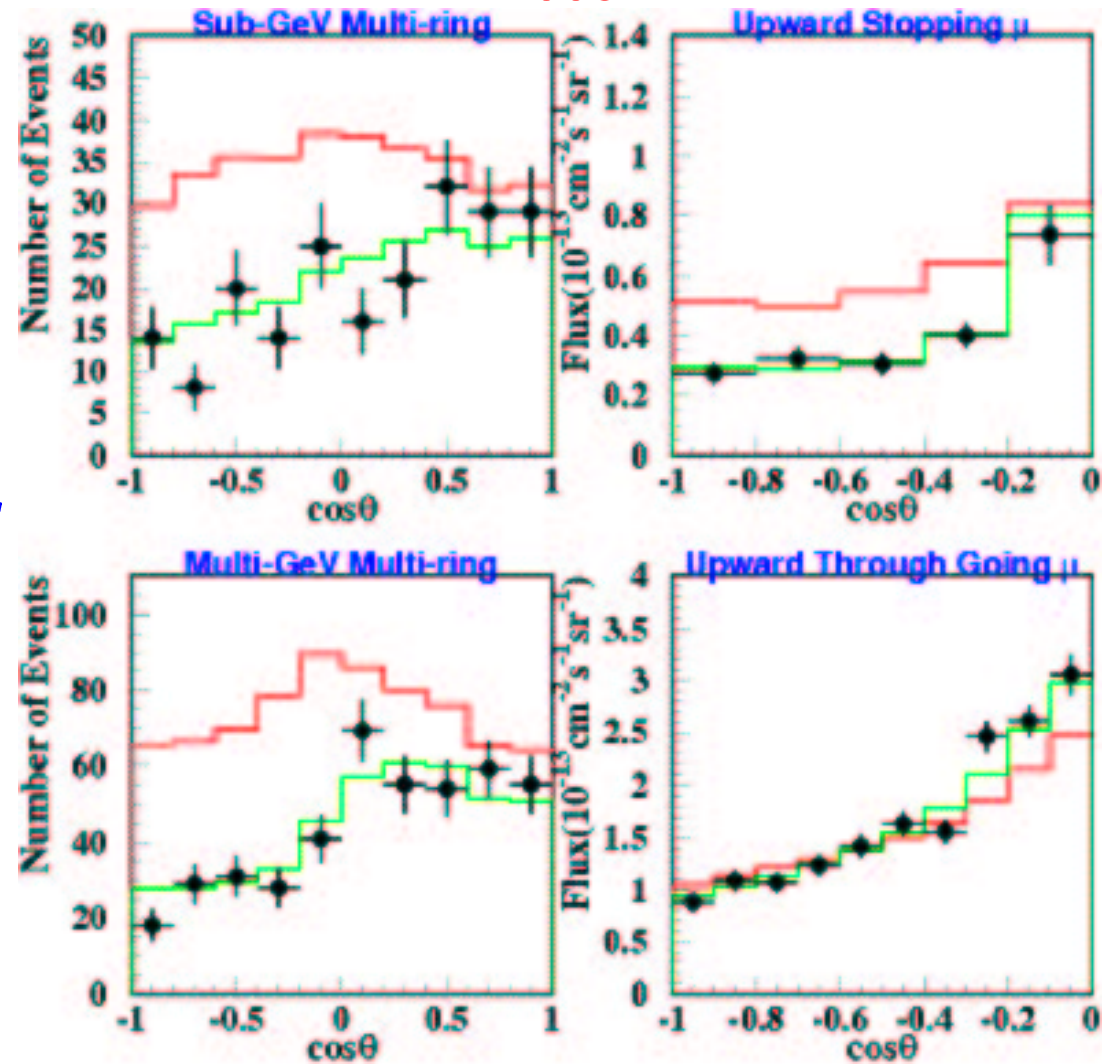
Efekt widoczny we wszystkich rozważanych próbkach.

Stosunek liczby przypadków mionowych do elektronowych:

$$\left(\frac{N_\mu}{N_e}\right)_{obs} = 0.65 \pm 0.05 \cdot \left(\frac{N_\mu}{N_e}\right)_{theory}$$

Czy neutrino mionowe mogą “znikać” przechodząc przez Ziemię ?

2003



Inne eksperymenty

Super-Kamiokande jest **największym** istniejącym detektorem neutrin zebrala **najwięcej przypadków** \Rightarrow ma **najdokładniejsze** wyniki
(np. Super-K: 12785 contained + 1251 $\text{Up-}\mu$; IMB: 935 contained + 624 $\text{Up-}\mu$)

Efekt “**znikania**” neutrin mionowych widziany jest jednak także przez **inne eksperymenty** badające neutrina atmosferyczne:

Super-K	0.65 ± 0.05
IMB	$0.54 \pm 0.05 \pm 0.07$
Kamiokande	0.60 ± 0.06
Soudan-2	$0.68 \pm 0.11 \pm 0.06$

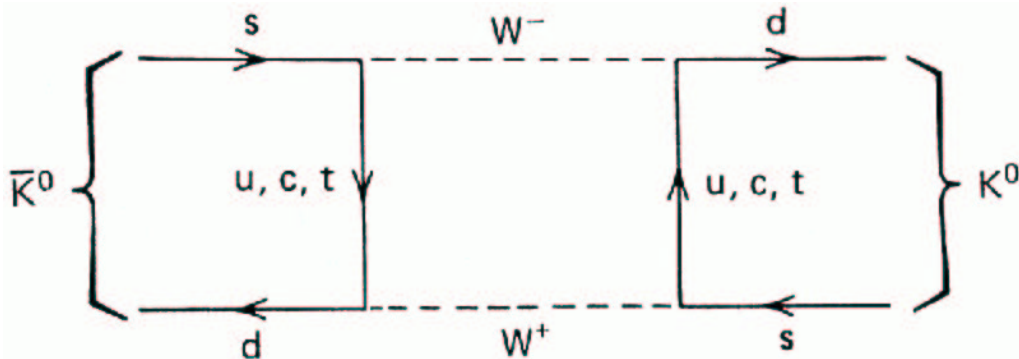
Jak można to wytłumaczyć ?!...

Oscylacje neutrin

Przypomnienie

Wiemy, że oddziaływania słabe nie zachowują dziwności, mieszają kwarki u i s .

Mezony \bar{K}^0 mogą się “przemieniać” w K^0 :



Cząstka wyprodukowana (w oddziaływaniach silnych) jako \bar{K}^0 może oddziaływać jako K^0 .

Dzieje się tak dlatego, że stany K^0 i \bar{K}^0 nie są fizycznymi stanami cząstki swobodnej.

Fizycznymi stanami są:

$$K_S \sim K^0 + \bar{K}^0$$

$$K_L \sim K^0 - \bar{K}^0$$

Wyprodukowany stan K^0 możemy przedstawić jako:

$$|K^0\rangle \approx \frac{1}{\sqrt{2}} (|K_L\rangle + |K_S\rangle)$$

Oscylacje pojawiają się dla tego, że K_L i K_S mają różne masy \Rightarrow ich funkcje falowe różnie ewoluują w czasie...

Oscylacje neutrin

Mieszanie stanów

Przyjmijmy, że neutrina ν_e i ν_μ są mieszankami stanów fizycznych ν_1 i ν_2

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

Przyjmijmy, że w chwili $t = 0$ i $\vec{x} = 0$ wyprodukowaliśmy ν_e :

$$|\nu\rangle_0 = \cos \theta_{12} |\nu_1\rangle_0 + \sin \theta_{12} |\nu_2\rangle_0 = |\nu_e\rangle$$

Swobodne stany $|\nu_i\rangle$ ewoluują w czasie:

$$|\nu_i\rangle(t, \vec{x}) = |\nu_i\rangle_0 \cdot \exp\left(-\frac{i}{\hbar}(Et - \vec{p} \cdot \vec{x})\right)$$

\Rightarrow **Jeśli** $m_1 \neq m_2$ to względna **faza** stanów $|\nu_1\rangle$ i $|\nu_2\rangle$ **zmienia się** w czasie!
Oznacza to, że:

$$|\nu\rangle(t, \vec{x}) \neq |\nu_e\rangle(t, \vec{x})$$

“Nowy” stan możemy jednak rozłożyć na składowe:

$$|\nu\rangle(t, \vec{x}) = a(t) |\nu_1\rangle + b(t) |\nu_2\rangle$$

Co można sprowadzić do:

$$|\nu\rangle(t, \vec{x}) = A(t) |\nu_e\rangle + B(t) |\nu_\mu\rangle$$

Oscylacje neutrin

Prawdopodobieństwo przejścia

Prawdopodobieństwo, że po czasie t wyprodukowana cząstka ν_e oddziałła jako ν_e :

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_e}(t) = |A(t)|^2$$

Zakładając, że masy i różnice mas są małe: $\Delta m \ll m_1 \sim m_2 \ll E_\nu$
można pokazać że:

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_e}(t) = 1 - \sin^2(2\theta_{12}) \sin^2 \left(\frac{(m_2^2 - m_1^2) t}{4E} \cdot \frac{c^4}{\hbar} \right)$$

W bardziej “praktycznych” jednostkach,

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

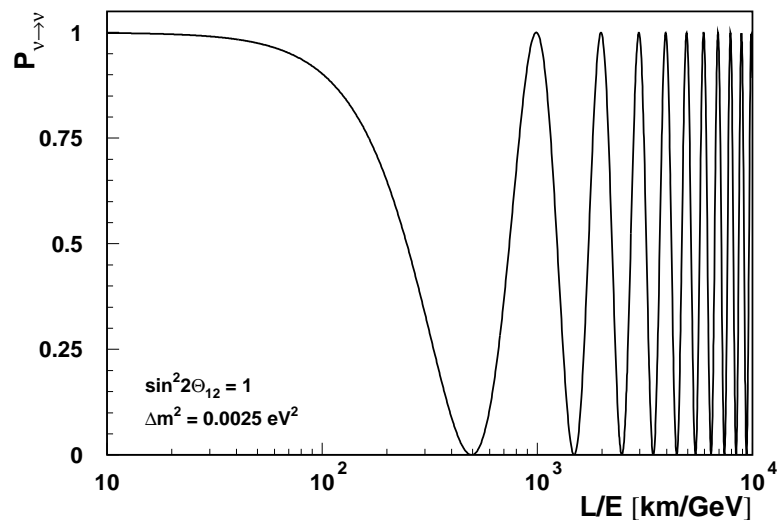
gdzie $L = ct$ [km], Δm^2 [eV²] i E [GeV].

Jesli różnice mas są rzeczywiście bardzo małe,
musimy wykonywać pomiary dla bardzo dużych odległości...

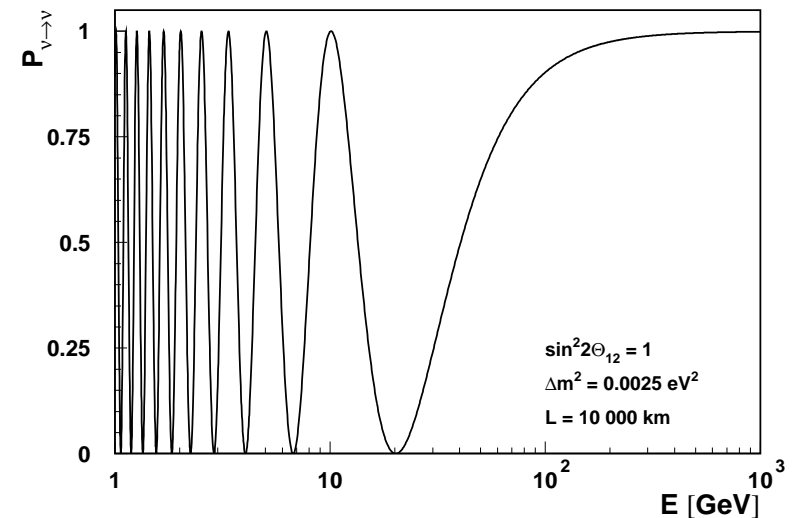
Super-Kamiokande

Prawdopodobieństwo przejścia

W funkcji odległości:



W funkcji energii neutrina
(odległość \sim średnica Ziemi):



Zależność **rozmywa się** jeśli neutrina mają **różne energie** !

Dla bardzo **dużych** L/E ($E/L \ll \Delta m^2$) otrzymujemy: $P_{\nu_e \rightarrow \nu_e} \approx 0.5$

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.

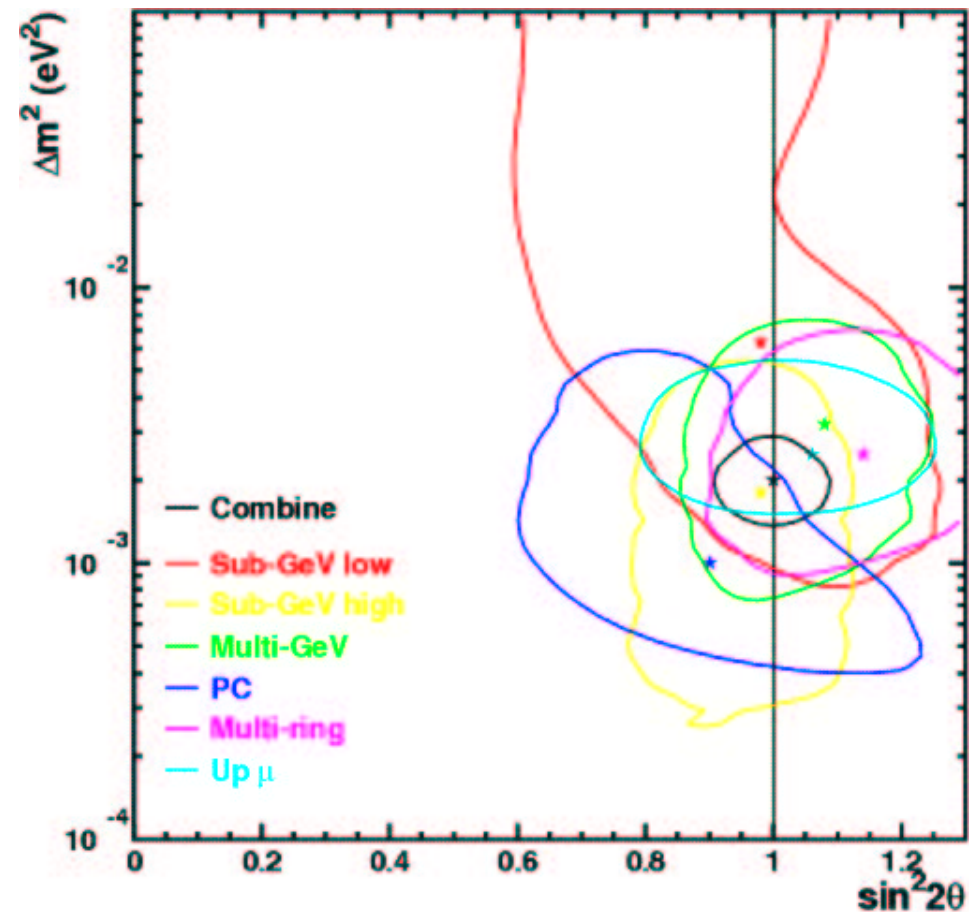
Oscylacje w ν_e wykluczamy (strumień zgodny z modelem)

⇒ najlepszym kandydatem **neutrino taonowe**

Dopasowanie parametrów mieszania do wszystkich danych:

$$\sin^2 2\theta_{12} = 1.00$$

$$\Delta m_{12}^2 = 0.002 \text{ eV}^2$$



Zgodne wyniki dla różnych próbek

Super-Kamiokande

Wyniki

Ostateczne potwierdzenie **hipotezy oscylacji** neutrin wymaga jednak obserwacji nie tylko “znikania” ale i powtórnego “pojawiania” się neutrin mionowych.

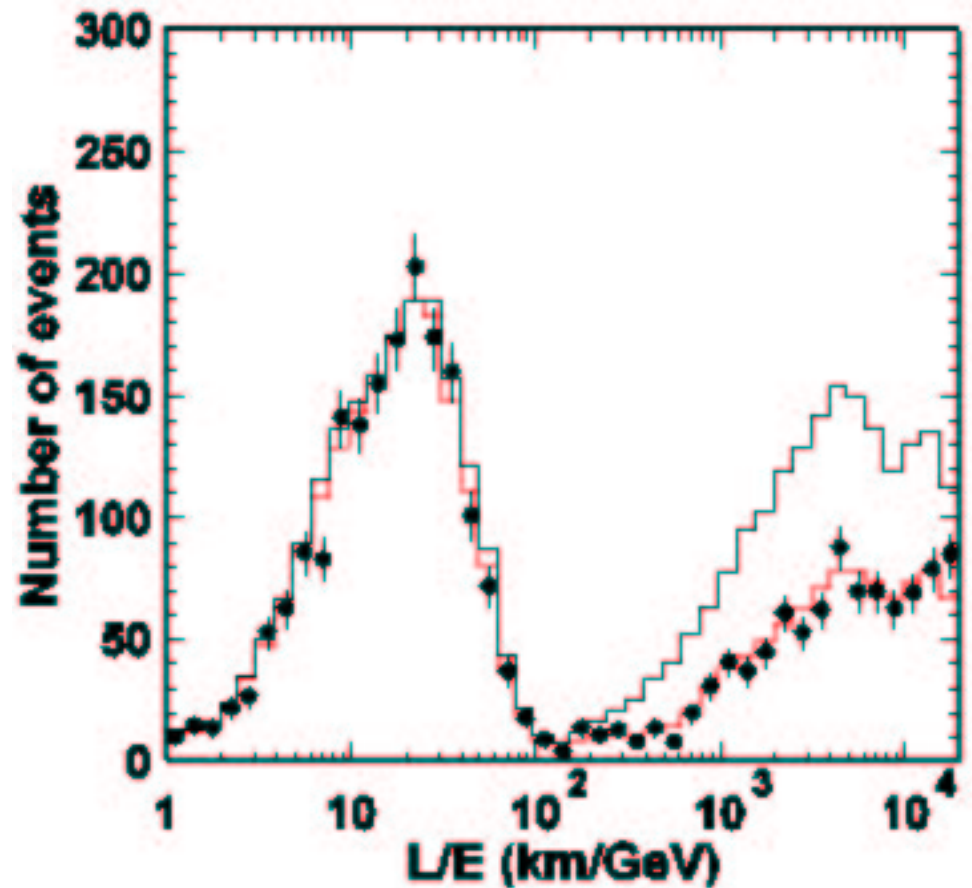
Nowa analiza Super-Kamiokande:
rozkład przypadków w funkcji **L/E**

Trudny pomiar ze względu na **duże błędy**:

$$\sigma_E/E \sim 30\%$$

$$\sigma_\theta \sim 30^\circ \quad (\text{dla } E=1 \text{ GeV})$$

Spadek liczby przypadków mionowych **w stosunku do przewidywań** (czarna linia) tylko dla **dużych L/E**



Super-Kamiokande

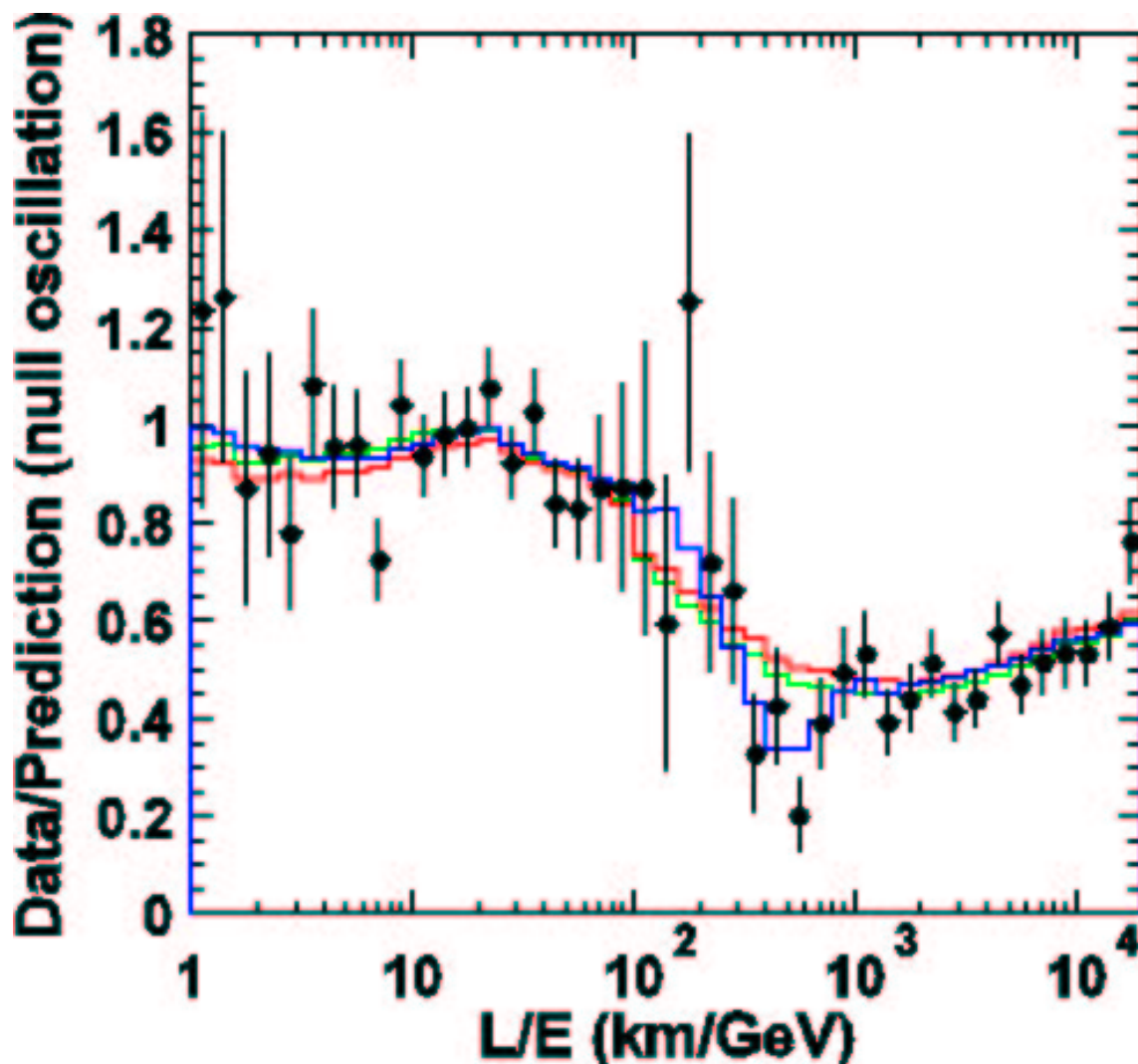
Wyniki

W rozkładzie $\frac{N_{obs}}{N_{exp}} \left(\frac{L}{E} \right)$ widoczne jest **minimum** przy $\frac{L}{E} \sim 500 \frac{km}{GeV}$

⇒ “regeneracja” neutrin dla większych $\frac{L}{E}$

Wyniki zgodne z hipotezą oscylacji (niebieska linia)

Wykluczają inne proponowane modele na poziomie $> 3\sigma$ (np. rozpad neutrin - zielona linia)

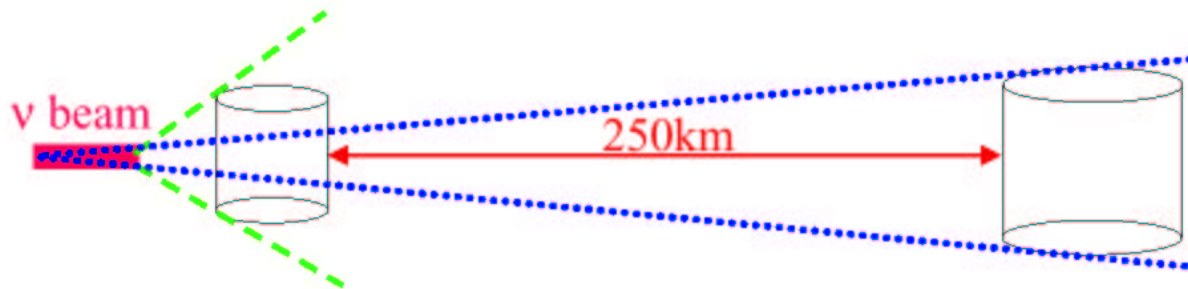


Doświadczenia z “długą bazą”

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...

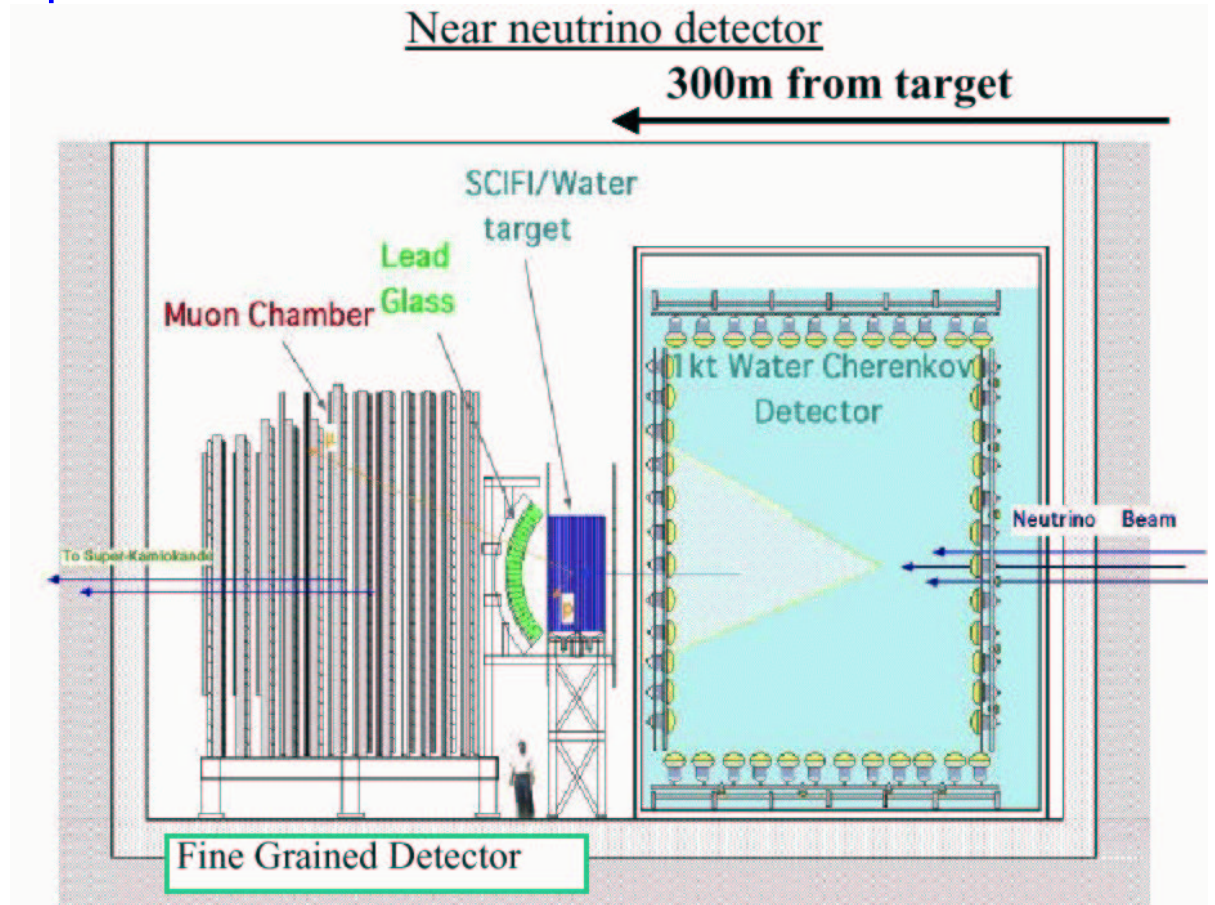
K2K

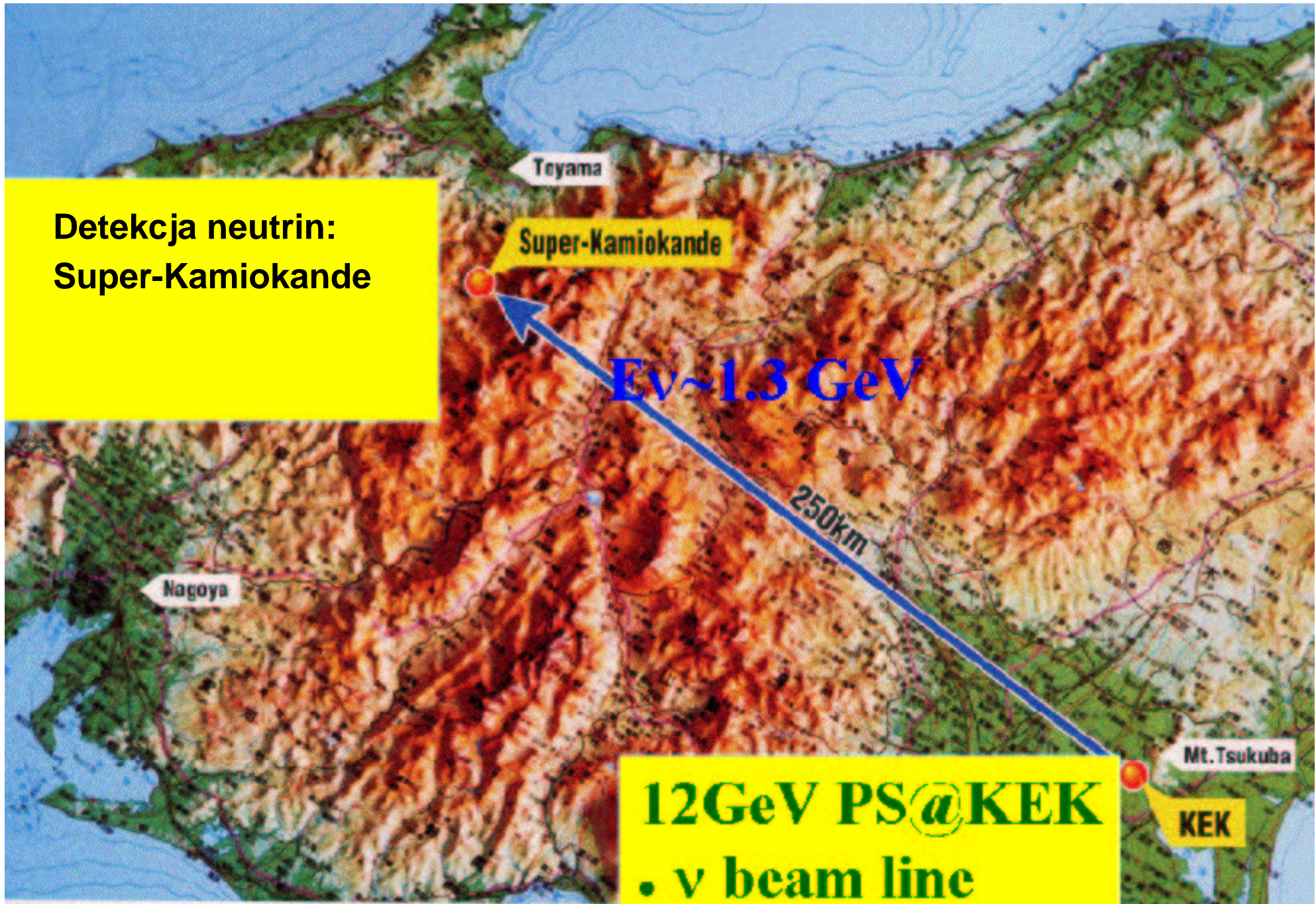
Eksperyment K2K

Pierwszym eksperymentem z “długą bazą” jest 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

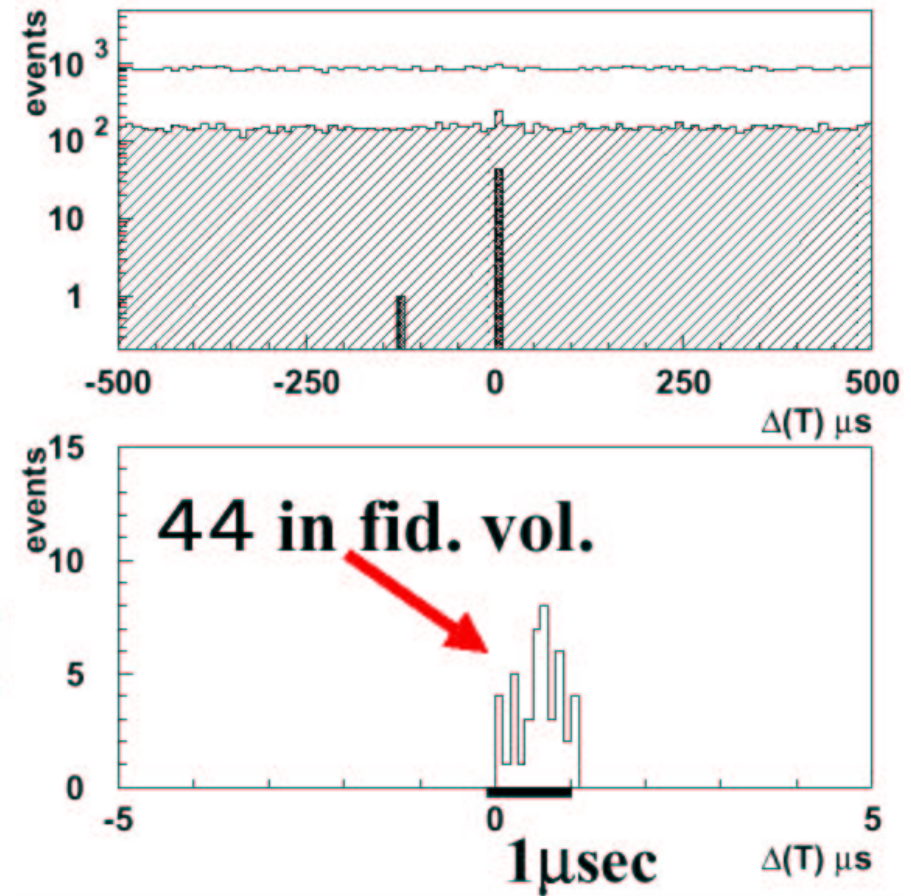




K2K

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 kwietnia 2003:

$$N_{obs} = 72$$

$$N_{exp} = 106.5^{+6.6}_{-5.8} \quad (\text{bez oscylacji})$$

Dopasowanie parametrów mieszania:

$$\sin^2 2\theta_{12} = 1.00$$

$$\Delta m_{12}^2 = 0.0028 \text{ eV}^2$$

W bardzo dobrej zgodności z wynikami SK.

Prawdopodobieństwo braku oscylacji: $\sim 10^{-3}$

Rozkład energii (po normalizacji)

