Neutrina

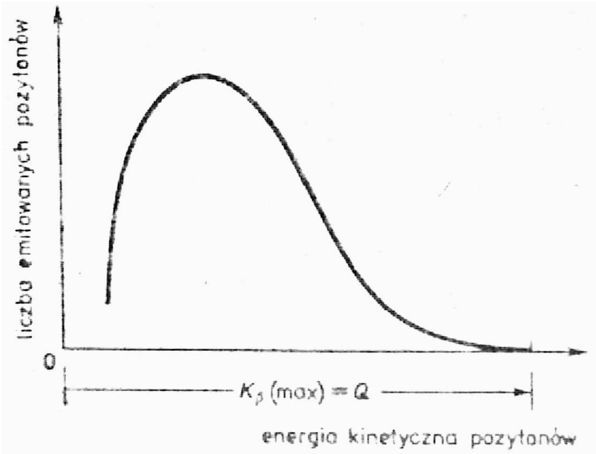
Elementy fizyki cząstek elementarnych
Wykład VII

- Wiązki neutrin
- Oddziaływania neutrin
- Neutrina atmosferyczne
- Eksperyment Super-Kamiokande
- Oscylacje neutrin

Neutrina

Rozpad β

Ciągłe widmo energii:

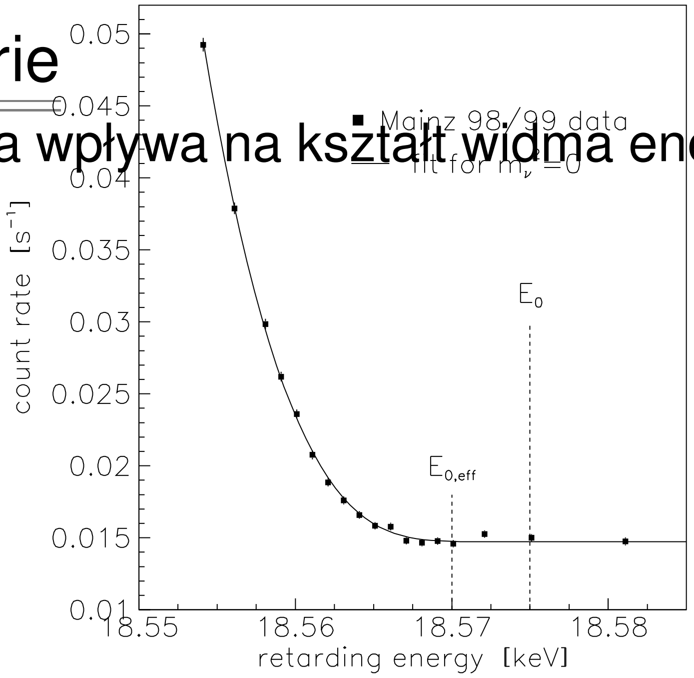


Pauli zaproponował istnienie neutrina: dodatkowej cząstki unoszącej część energii w rozpadzie β:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

Wykres Kurie

Masa neutrina wpływa na kształt widma energii elektronów:



Najnowsze wyniki (Mainz, 2001):

$$m_\nu < 2.2\,eV \;\; (95\%\,CL)$$

Neutrina

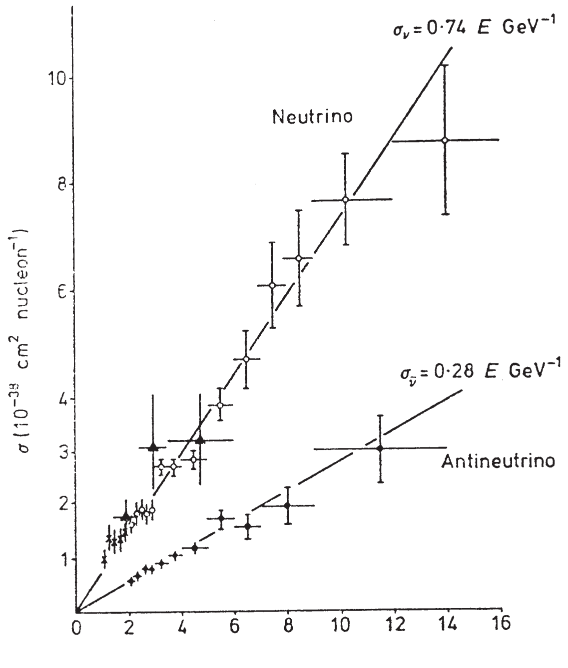
Przekrój czynny

Przekrój czynny na oddziaływanie neutrin z materią jest niewyobrażalnie mały. Dla neutrin o energii rzędu 1 MeV

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

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

Przekrój czynny na oddziaływanie neutrin rosnie z energią jedynie liniowo.



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

Neutrina

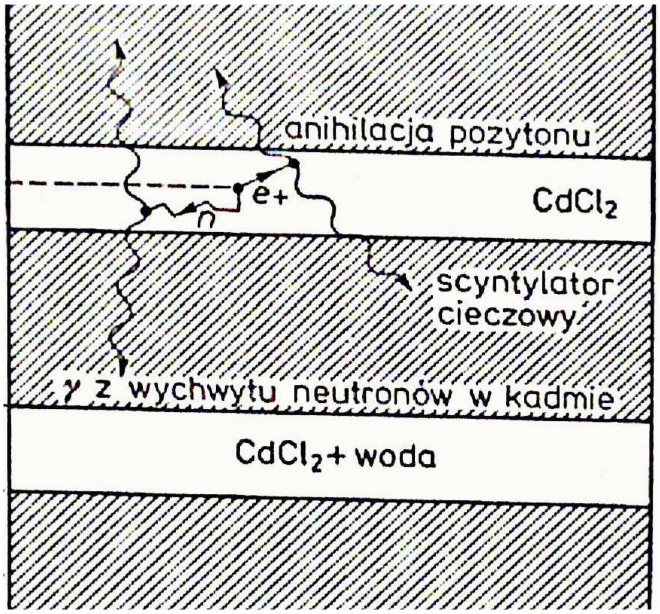
Doświadczenie Reinesa i Cowana (1959)

Oddziaływanie neutrin zaobserwowano po raz pierwszy wykorzystując jako źródło reaktor.

Zaobserwowano reakcję

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

$\longrightarrow$
$\bar{\nu}_e$



- produkowane pozytrony anihilują emitując fotony.
- kadm zawarty w wodzie wychwytuje neutrony co także prowadzi do emisji fotonów.

$\Rightarrow$ koincydencja dwóch sygnałów jest sygnaturą szukanej reakcji

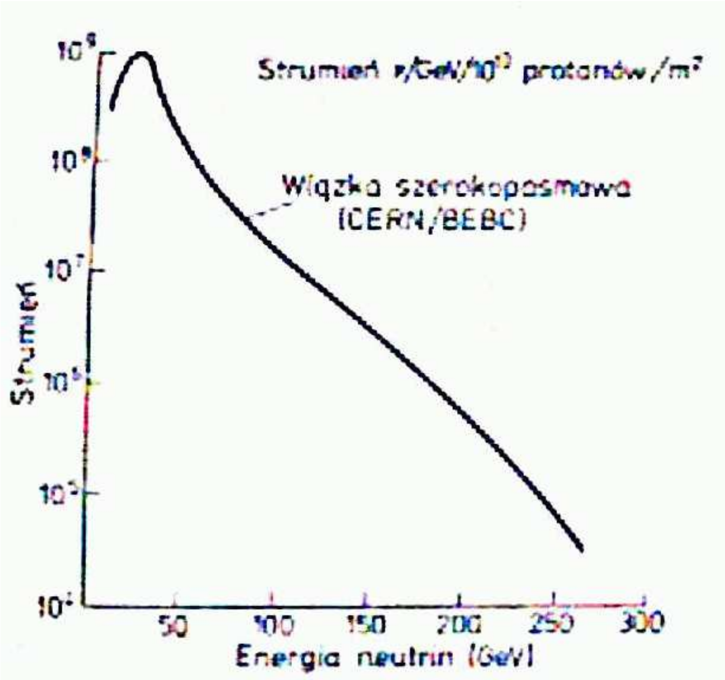
Neutrina

Wiązki neutrin

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

$$\begin{aligned} \pi^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \\ K^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \end{aligned}$$

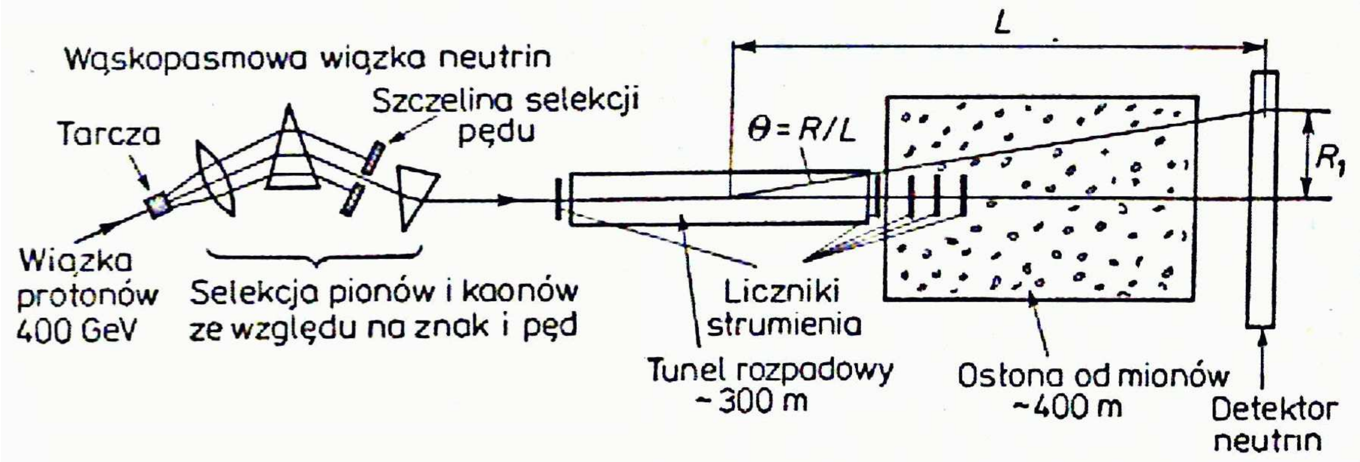
W ten sposób możemy otrzymujemać "szerokopasmową" wiązkę neutrin (Wide Band Beam, WBB):



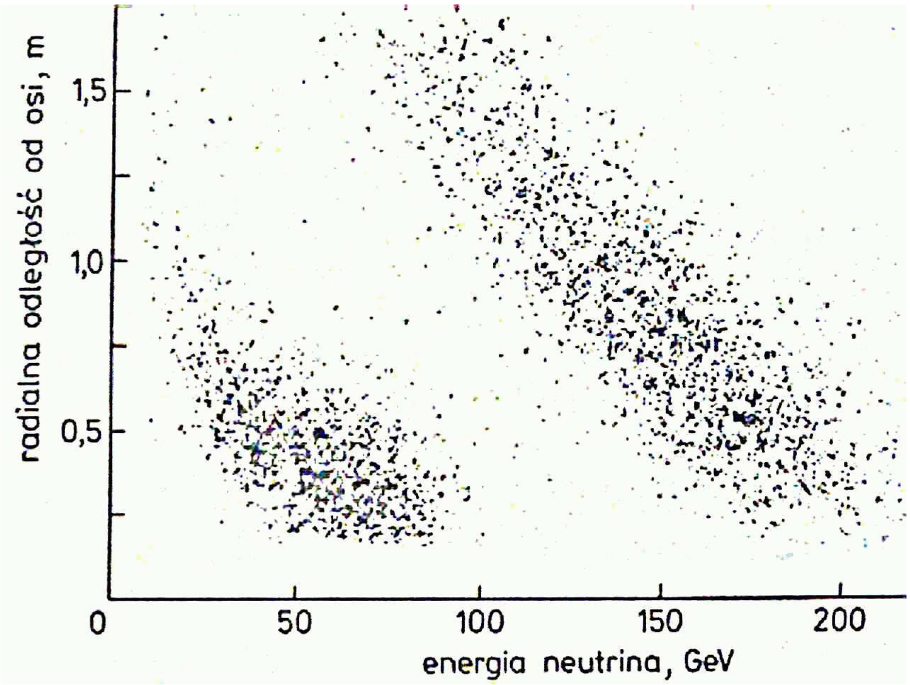
Neutrina

Wiązki neutrin

Jesli jednak 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.



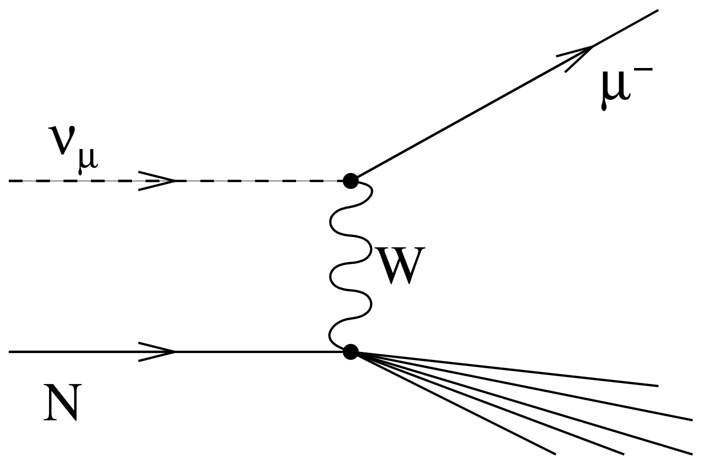
Wiązka “wąskopasmowa” (Narrow Band Beam; NBB)

Neutrina

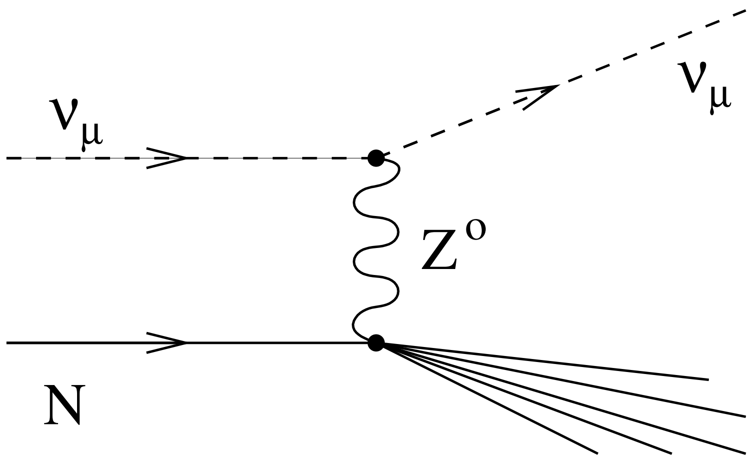
Oddziaływania

W rozpadach pionów i kaonów produkowane są prawie wyłącznie neutrina mionowe.

W wyniku ich oddziaływania w detektorze na ogół produkowany jest wysokoenergetyczny mion (oddziaływania typu CC):



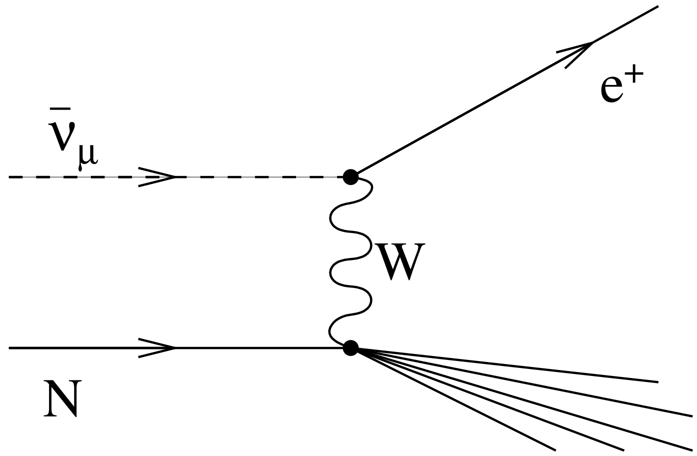
Choć obserwujemy też oddziaływania typu NC:



Neutrina

Zachowanie liczby leptonowej

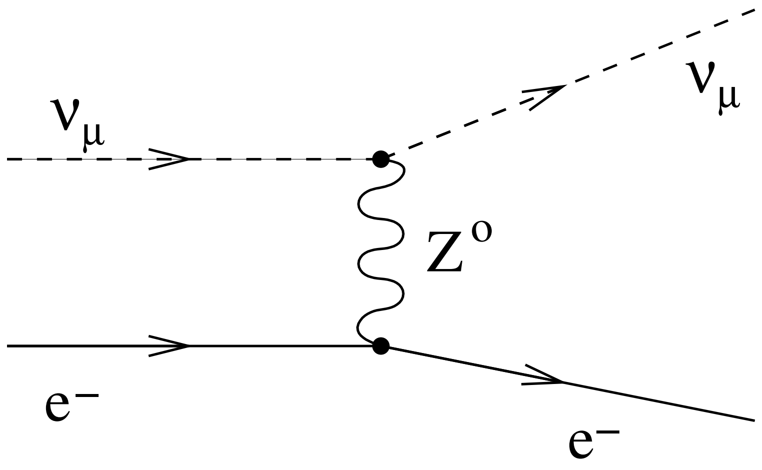
Nie obserwujemy natomiast oddziaływań $\bar{\nu}_\mu$ z produkcją pozytonu:



$\Rightarrow$ 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

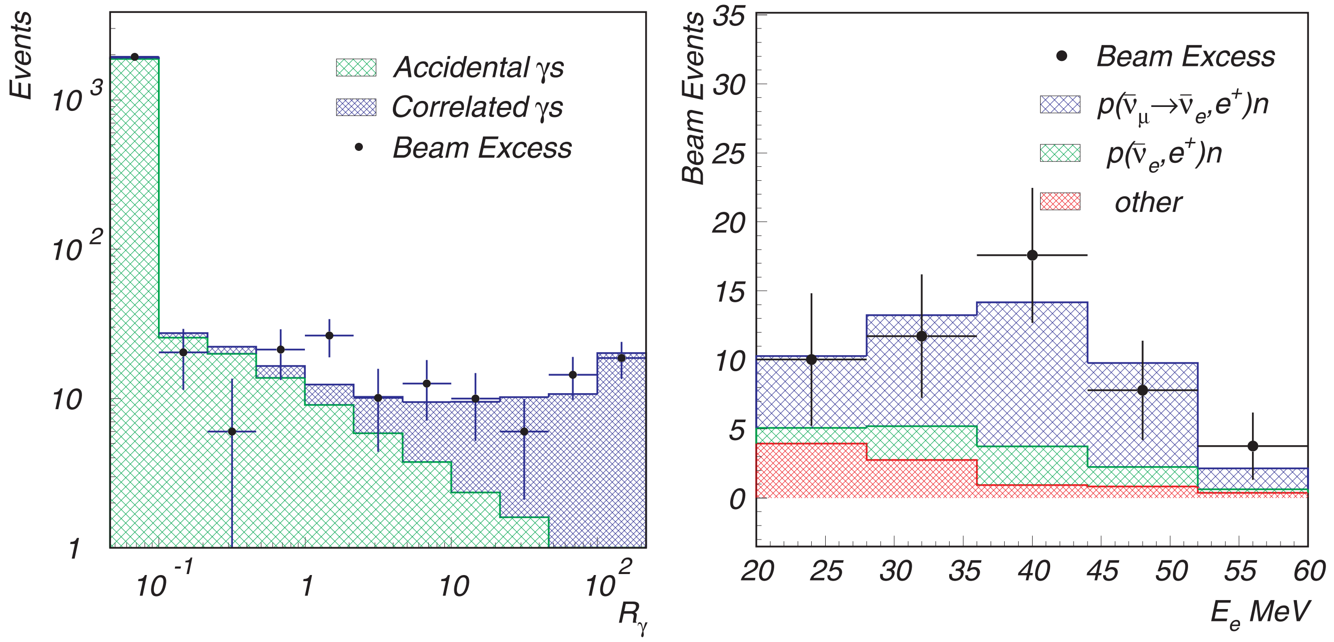
Sama teoria nie narzuca zachowania liczby leptonowej !

Eksperyment LSND w Los Alamos

167 ton scyntylatora na wiązce neutrin o dużej intensywności

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

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



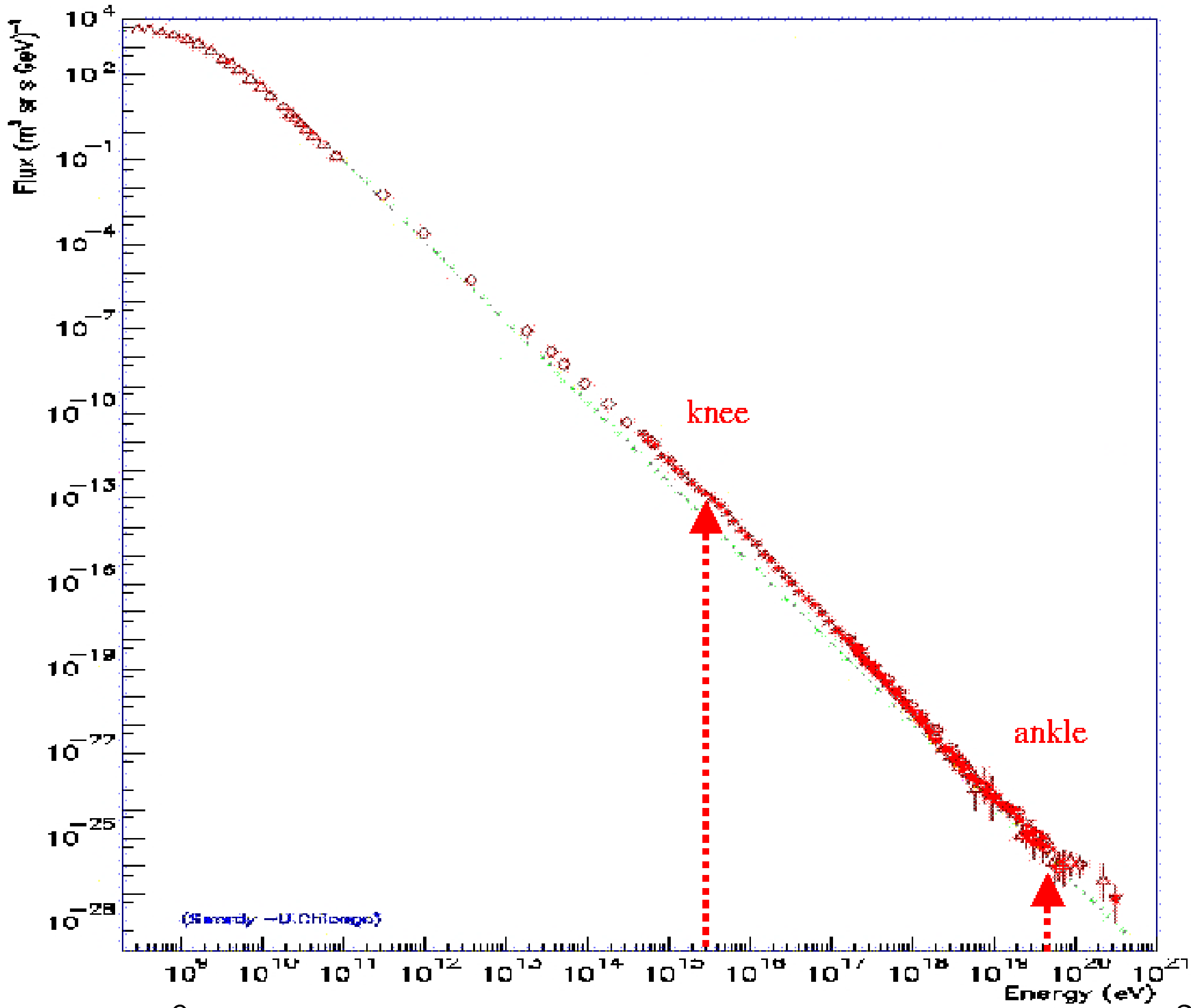
Łamane zachowanie liczby leptonowej !?

Neutrina atmosferyczne

Promieniowanie kosmiczne

Przestrzeń kosmiczna wypełniona jest cząstkami o energiach dochodzących do 10^{12} GeV. Są to głównie protony (86%) i cząstki α (13%). Strumień cząstek:

$$10^4 \frac{1}{m^2 sr\ s\ GeV}$$



10^9 eV $\qquad\qquad$ 10^{21} eV

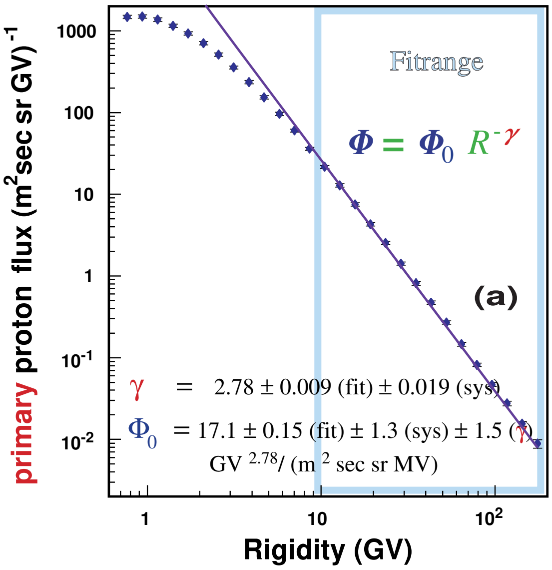
1 GeV $\qquad\qquad$ 10^{12} GeV

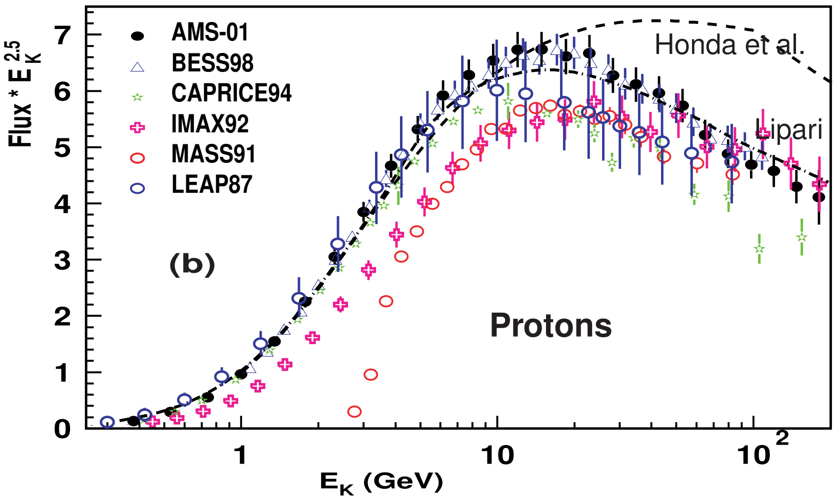
Promieniowanie kosmiczne poza atmosferą ziemską nazywamy promieniowaniem "pierwotnym"

Neutrina atmosferyczne

Promieniowanie kosmiczne

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





Wiekszość cząstek ma energie 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

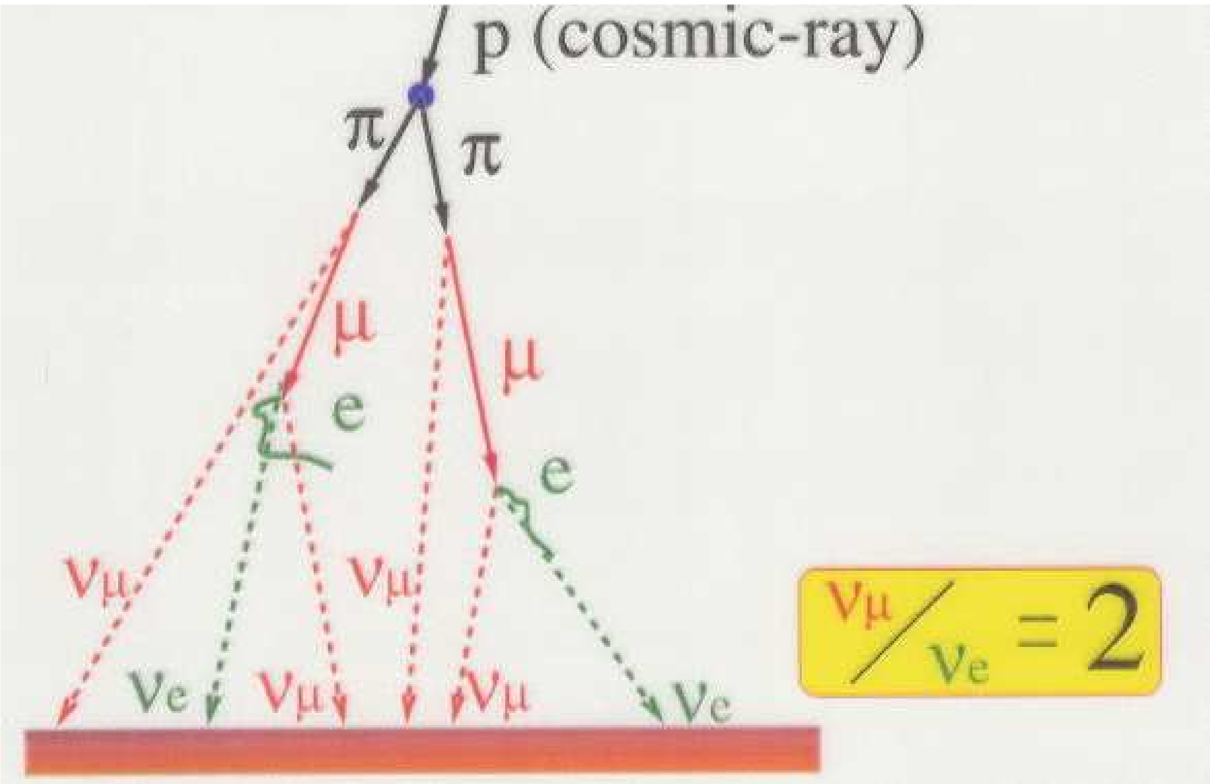
Promieniowanie kosmiczne

W wyniku rozpadów:

$$
\begin{aligned}
\pi^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \\
\mu^+ &\rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e
\end{aligned}
$$

(podobnie dla π^- i μ^-) produkowanych jest dwukrotnie większa liczba neutrin mionowych niż elektronowych

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

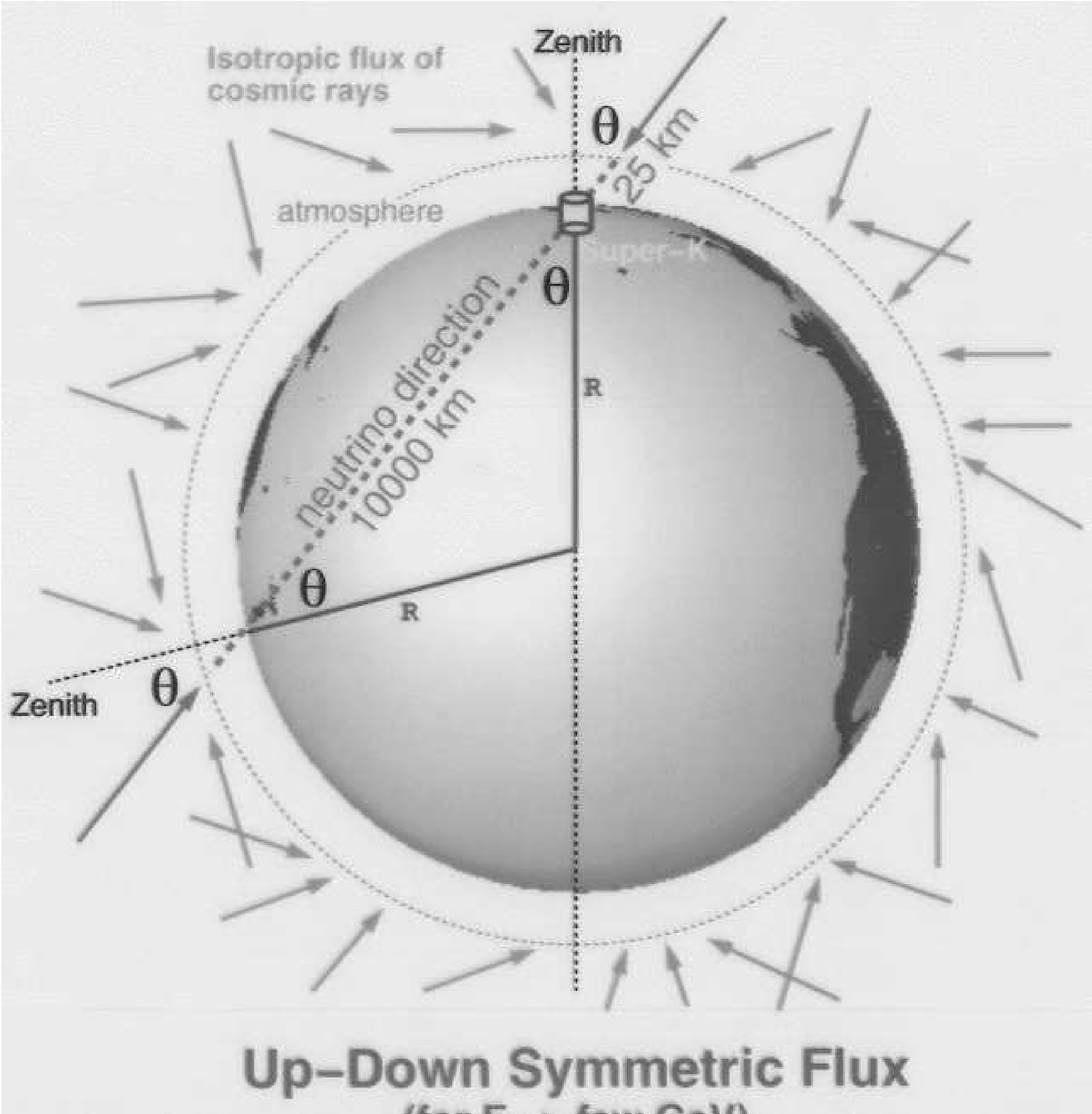


Neutrina atmosferyczne

Rozkład kątowy

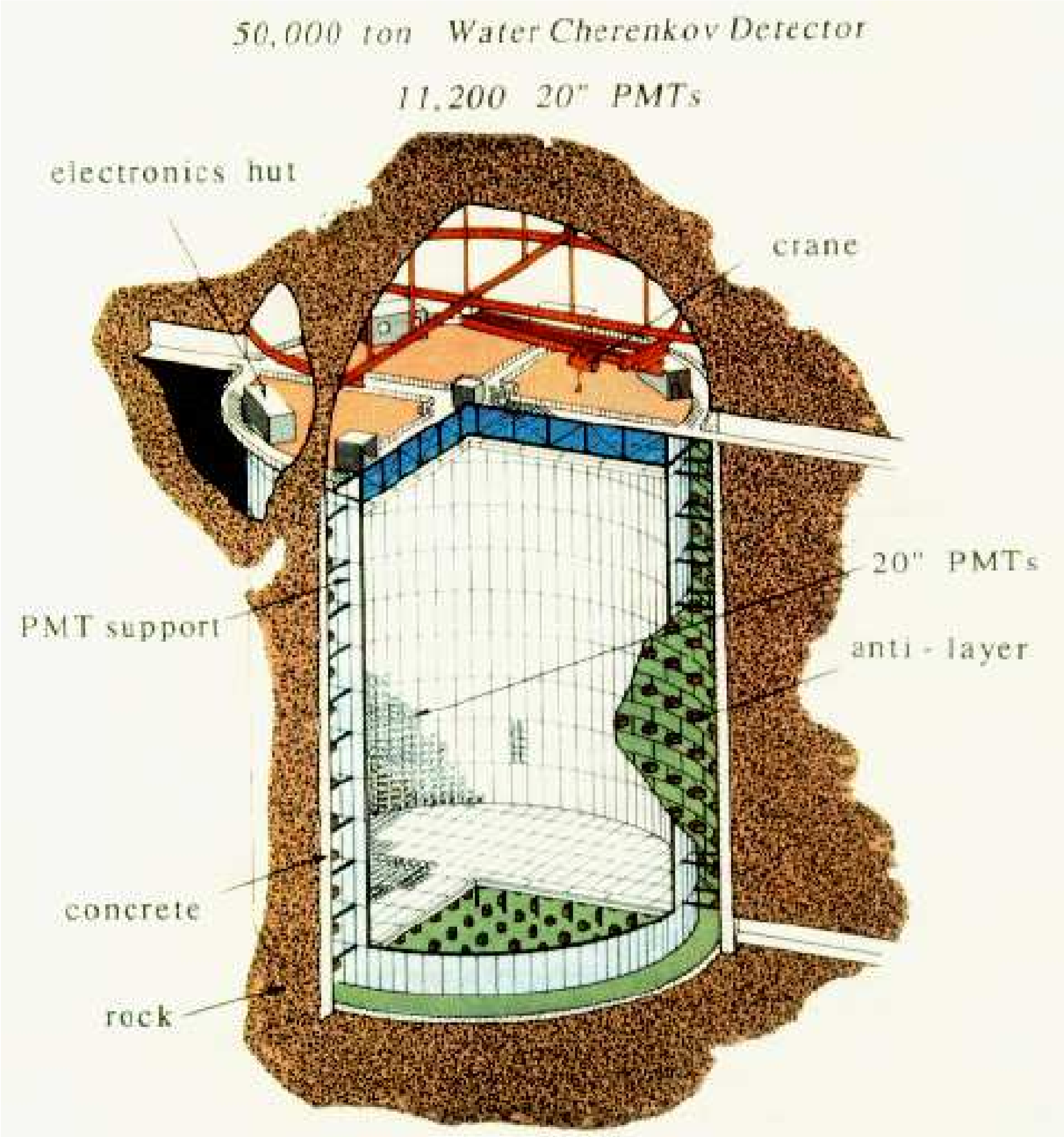
Pierwotne promieniowanie kosmiczne jest izotropowe.

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



Super-Kamiokande

1 km pod ziemią, komora o wysokości 40 m i średnicy 40 m

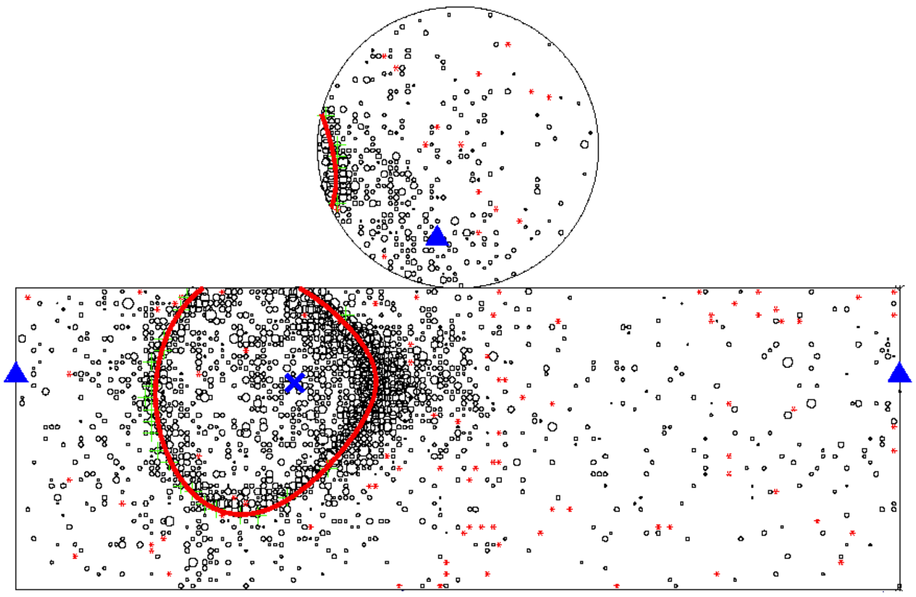


11'000 fotopowielaczy (50 cm średnicy każdy !) rejestruje **promieniowanie Czerenkowa**

Super-Kamiokande

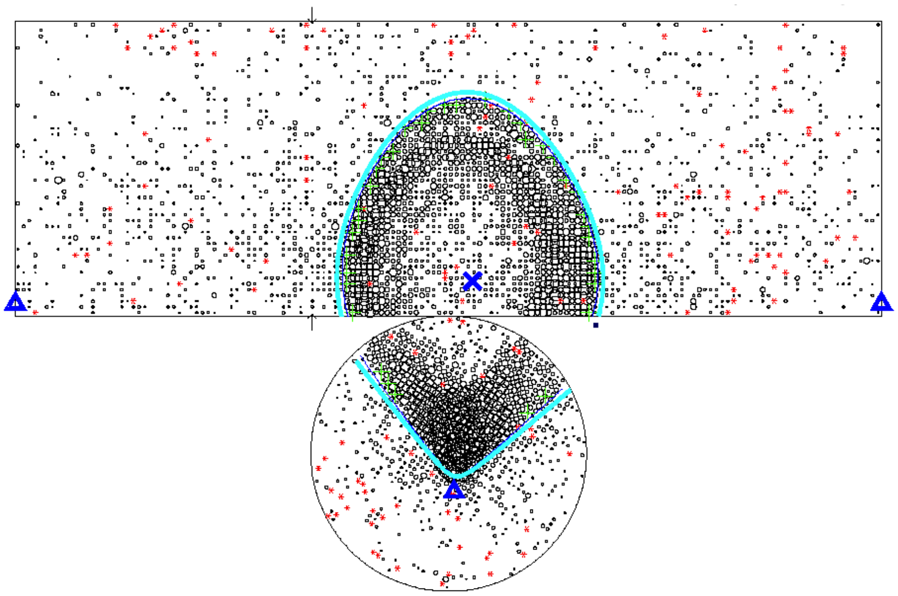
$\nu_e \; n \rightarrow e^- p$

Elektron wywołuje kaskadę elektromagnetyczną.
Krótki zasięg - “cienki” pierścień



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

Mion jonizuje. Długa droga - “gruby” pierścień.



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

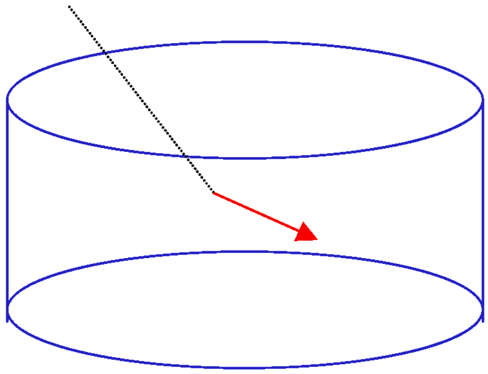
Super-Kamiokande

Klasyfikacja przypadków

Przypadki które rozpoznajemy jako oddziaływania neutrin:

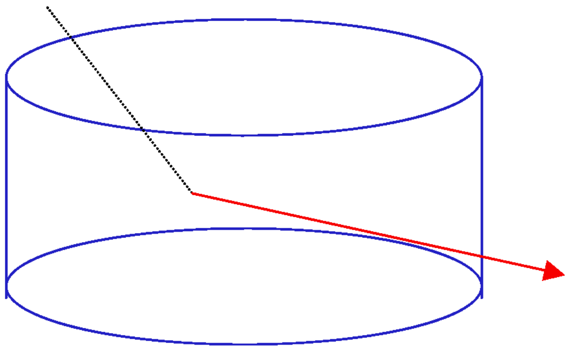
FC: Fully Contained

Elektron lub niskoenergetyczny mion wyprodukowany w detektorze zatrzymuje się w nim



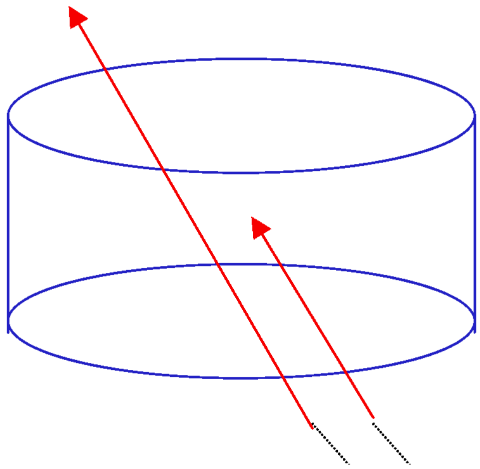
PC: Partially Contained

Wysokoenergetyczny mion wyprodukowany w środku ucieka z detektora



Upward

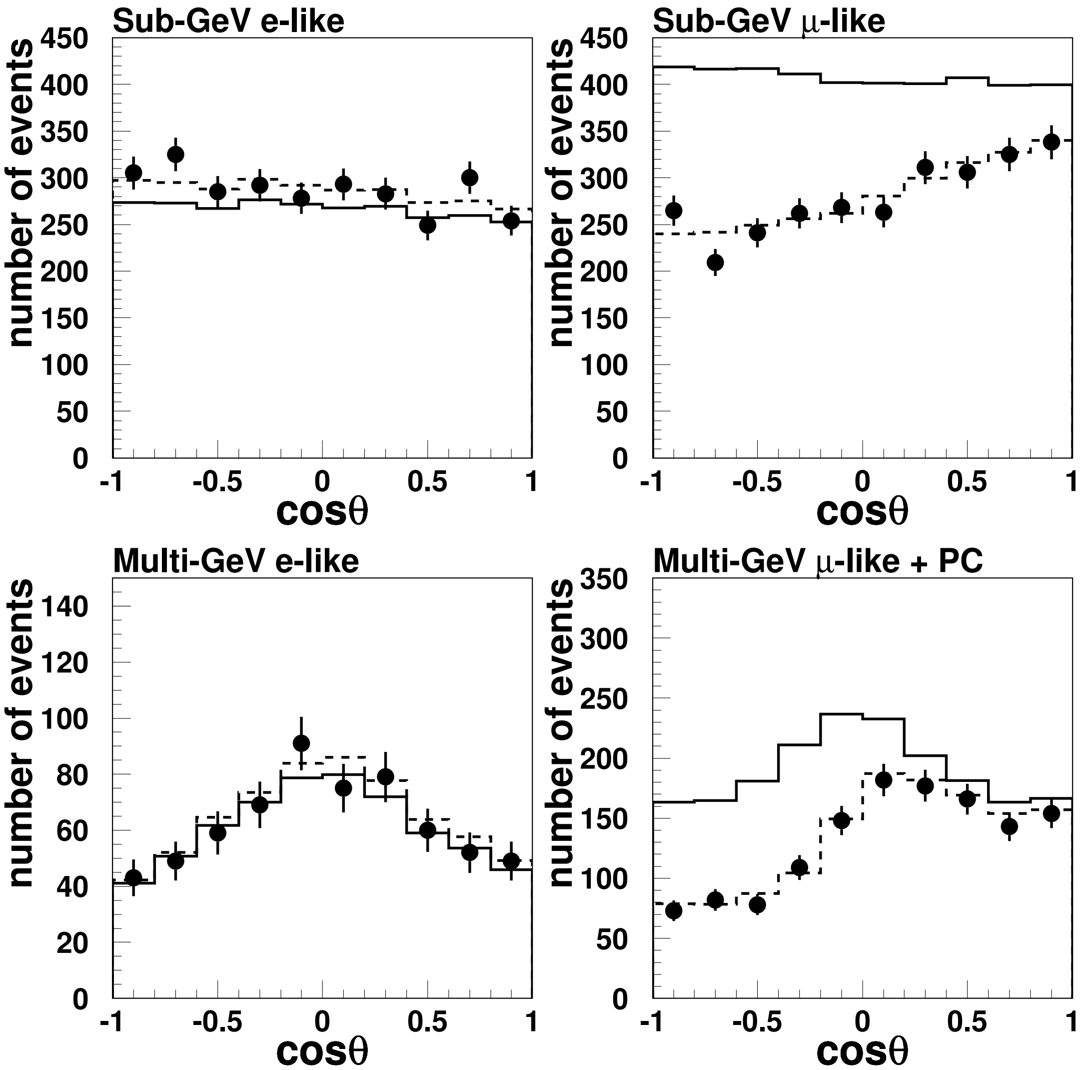
Miony wpadające do detektora od dołu



Super-Kamiokande

Wyniki

Zależność liczby obserwowanych przypadków elektronowych i mionowych od kierunku (przypadki typu FC):



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

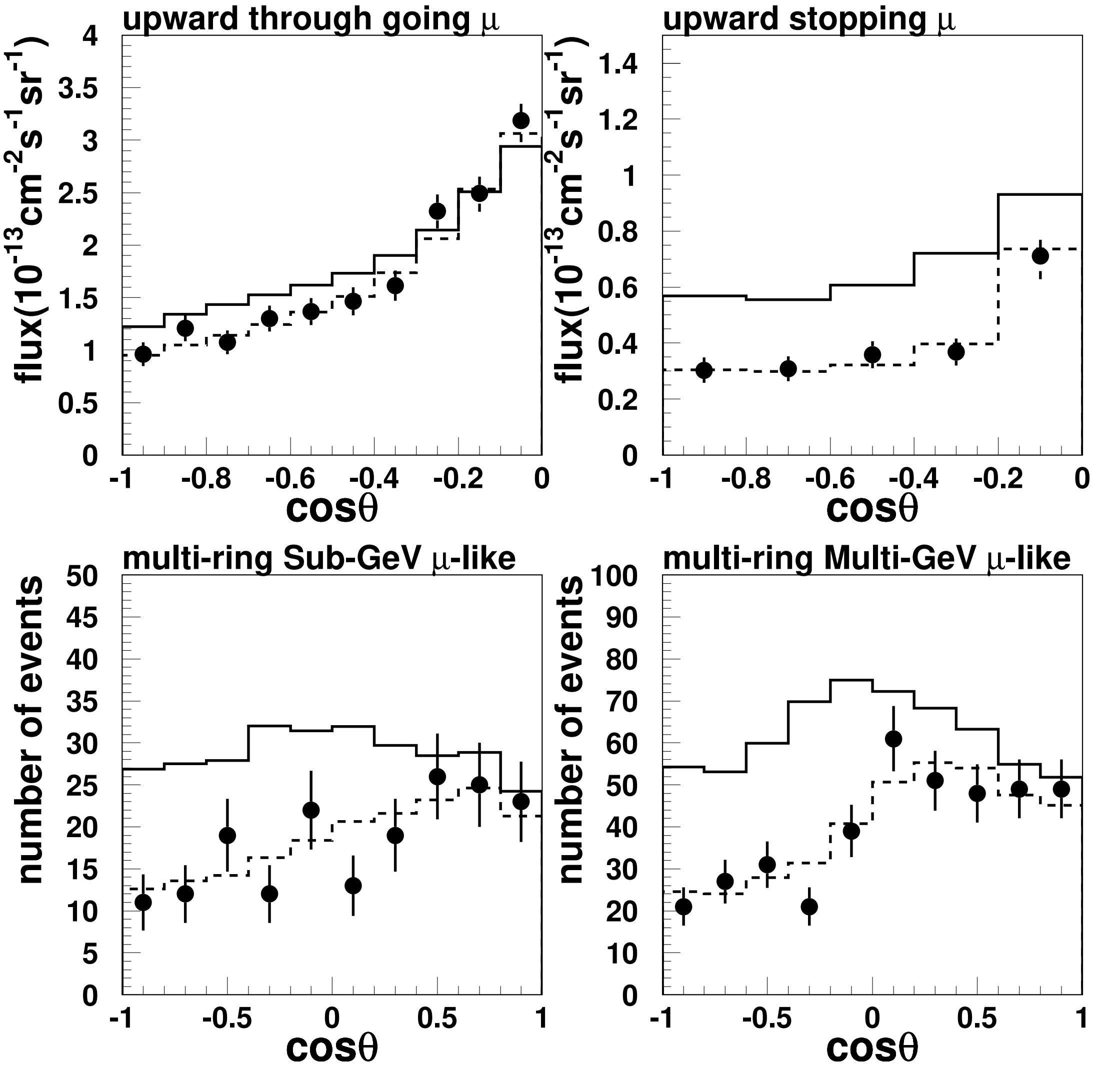
Neutrin mionowych mniej niż oczekujemy (ciągła linia) !

Wyraźnie mniej ν_μ lecących od dołu niż do góry !

Super-Kamiokande

Wyniki

Efekt widoczny we wszystkich rozważanych próbkach



Stosunek liczby przypadków mionowych do elektronowych:

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

Czy neutrina mionowe mogą “znikać” przechodząc przez Ziemię ?

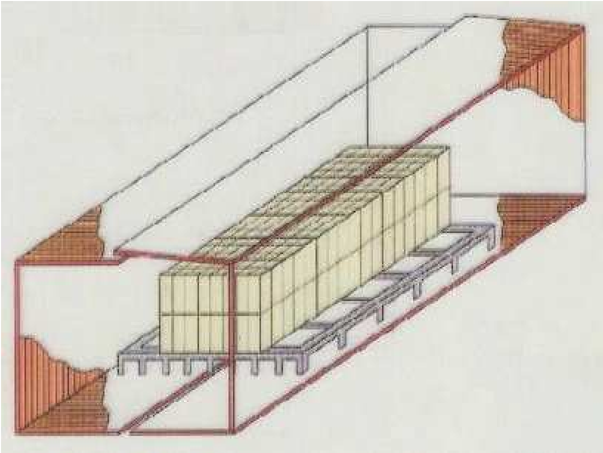
Inne eksperymenty

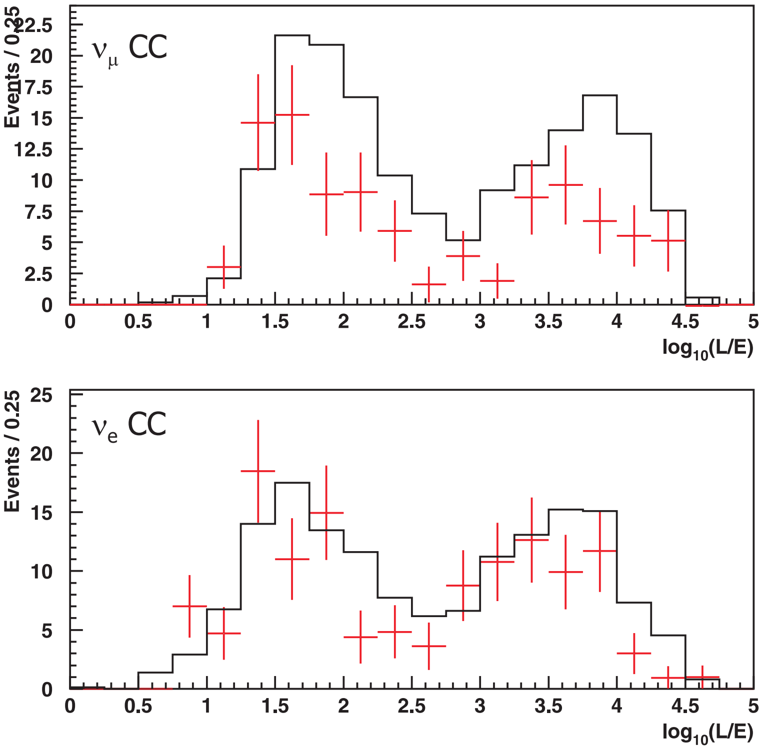
Super-Kamiokande jest największym istniejącym detektorem neutrin i ma najdokładniejsze dane.

Efekt widziany jest jednak także przez inne eksperymenty.

Sudan-2

Ogromny kalorymetr (963 t)
w kopalni Sudan w Minessocie.





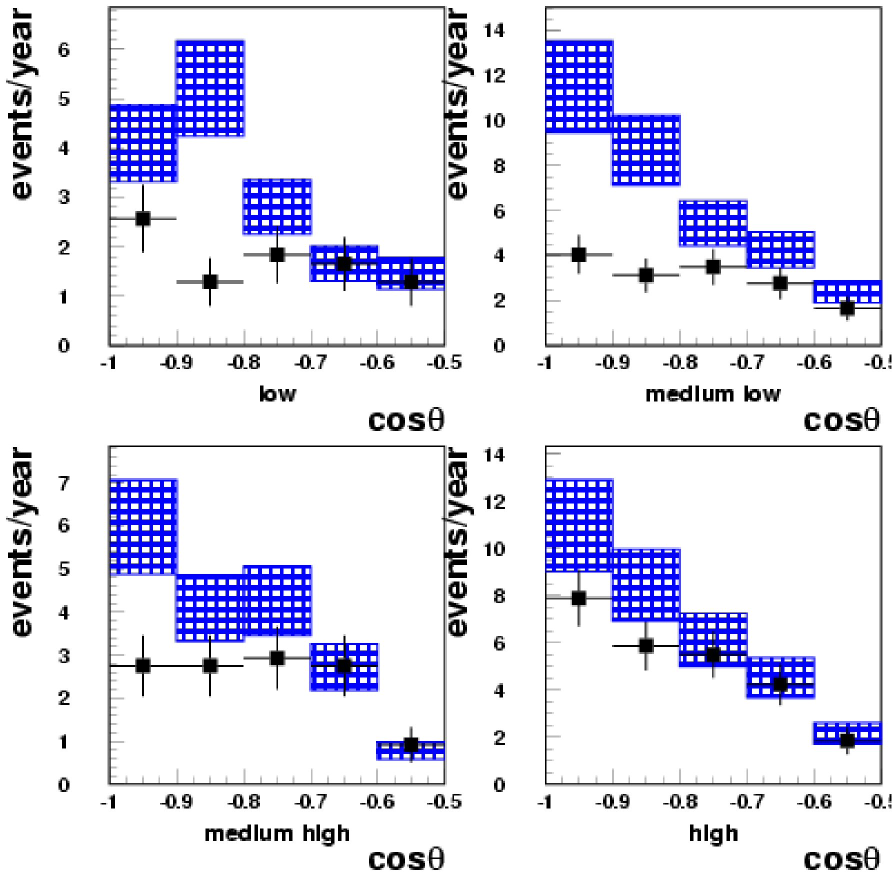
$$\frac{\left(\frac{N_\mu}{N_e}\right)_{obs}}{\left(\frac{N_\mu}{N_e}\right)_{th}} = 0.68 \pm 0.12$$

Inne eksperymenty

MACRO

Eksperyment neutrinowy w Gran Sasso (Włochy)

Zależność liczby obserwowanych przypadków mionowych od kierunku (punkty):

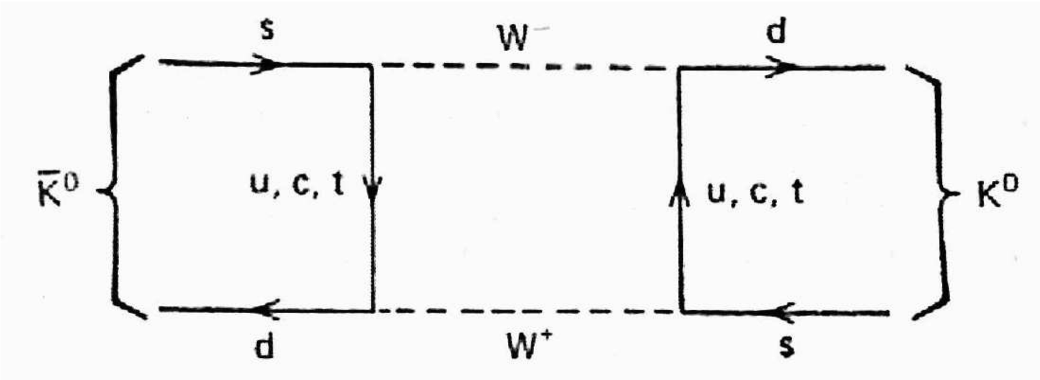


Deficyt neutrin mionowych w porównaniu z przewidywaniami modelu (prostokąty) zgodny z obserwacjami Super-Kamiokande.

Oscylacje neutrin

Przypomnienie

Oddziaływania słabe nie zachowują dziwności, mieszają kwarki u i s. Mezony $\bar{K}^\circ$ mogą się "przemieniać" w K°:



Cząstka wyprodukowana (w oddziaływaniach silnych) jako $\bar{K}^\circ$ może oddziałać jako K°.

Dzieje się tak dlatego, że stany K° i $\bar{K}^\circ$ nie są stanami cząstki swobodnej. Fizycznymi stanami są:

$$
\begin{aligned}
K_S &\sim K^\circ + \bar{K}^\circ \\
K_L &\sim K^\circ - \bar{K}^\circ
\end{aligned}
$$

Wyprodukowany stan K° możemy przedstawić jako:

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

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:

$$|\nu\rangle_{t=0} = \cos\theta_{12}\,|\nu_1\rangle + \sin\theta_{12}\,|\nu_2\rangle = |\nu_e\rangle$$

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

$$|\nu_i\rangle(t,\vec{x}) = |\nu_i\rangle_{t=0} \cdot \exp\left(-\frac{i}{\hbar}(Et - \vec{p}\,\vec{x})\right)$$

Jeśli $m_1 \neq m_2$ to względna faza stanów $|\nu_1\rangle$ i $|\nu_2\rangle$ zmienia się w czasie ! Czyli:

$$|\nu\rangle(t,\vec{x}) \neq \cos\theta_{12}\,|\nu_1\rangle + \sin\theta_{12}\,|\nu_2\rangle = |\nu_e\rangle$$

“Nowy” stan możemy jednak przedstawić jako

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

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) oddziała jako ν_e wyniosi:

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

Zakładając, że masy i różnice mas są małe

$$\Delta m \ll m_1 \sim m_2 \ll E_\nu$$

można pokazać że:

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

W bardziej "praktycznych" jednostkach,

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

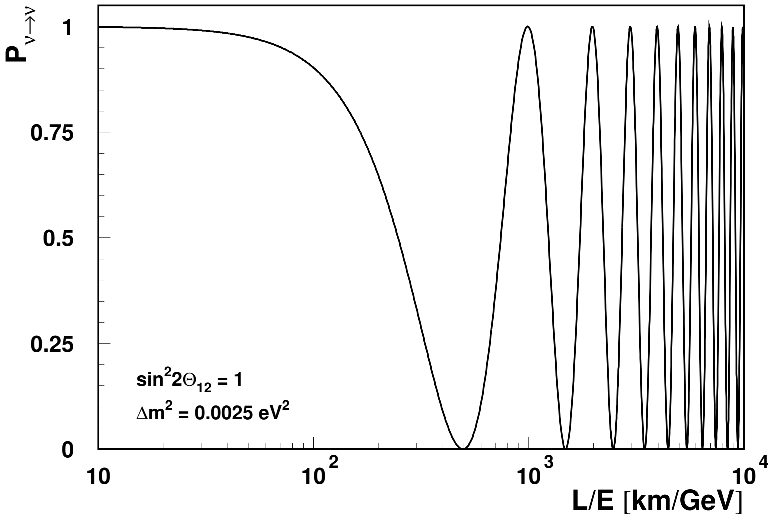
gdzie $L = ct$ [km], Δm^2[eV^2] i E [GeV].

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

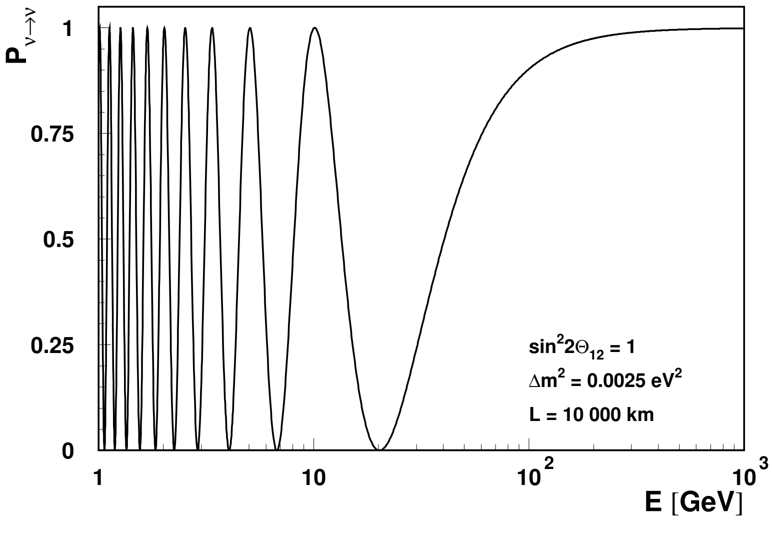
Super-Kamiokande

Prawdopodobieństwo przejścia

W funkcji odległości:



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



Zależność rozmywa się jesli neutrina mają różne energie !

Dla bardzo dużych L/E ($E/L \gg \Delta m^2$) otrzymujemy

$$P_{\nu_e\to\nu_e} \approx 0.5$$

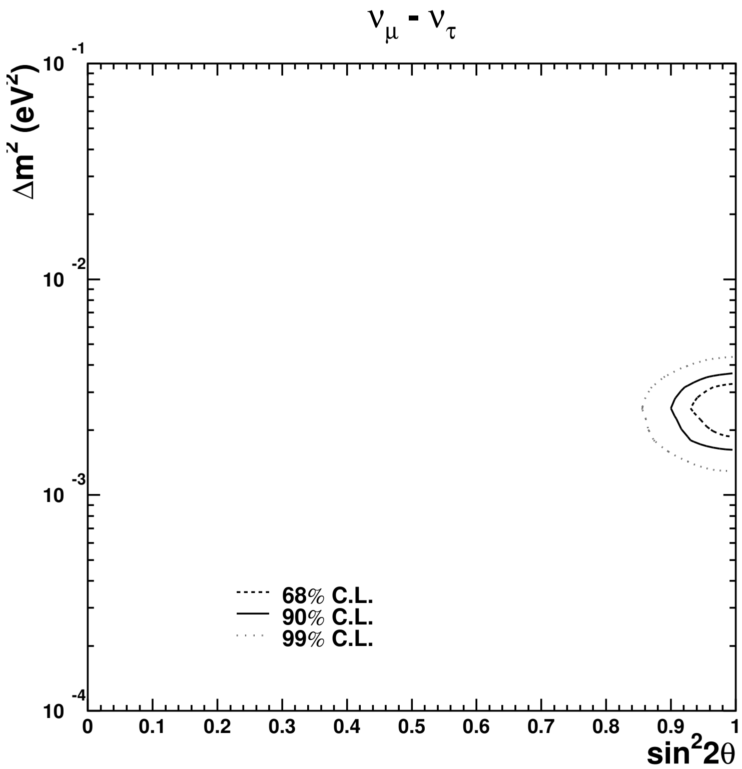
Super-Kamiokande

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)
$\Rightarrow$ najlepszym kandydatem jest neutrino taonowe ν_τ

Dopasowanie parametrów mieszania do wszystkich danych:



$$\sin^2 2\theta_{12} = 1.00$$
$$\Delta m^2_{12} = 0.0025\, eV^2$$

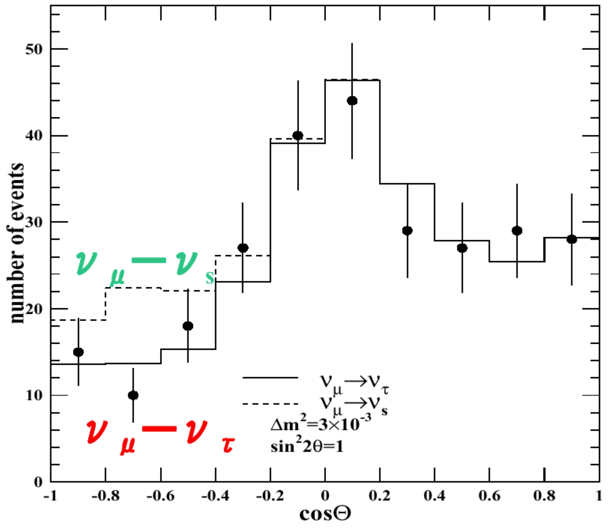
Super-Kamiokande

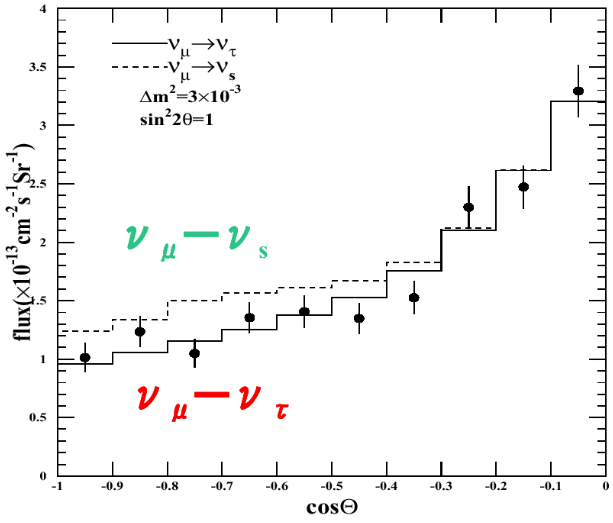
Poszukiwanie ν_τ

ν_τ nie jest jedynym kandydatem na "partnera" ν_μ

Rozważano także oscylacje w tzw. "neutrina sterylne" ν_s, które wogóle nie oddziałują z materią

Dane wskazuja jednak na oscylacje w ν_τ:





Są też pierwsze wyniki wskazujące na produkcję taonów

$$\nu_\tau \; N \to \tau^- X$$