Fizyka neutrin – wykład 5

Agnieszka Zalewska 9.04.2008

- Oscylacje neutrin podstawowe pojęcia
- Odkrycie oscylacji neutrin atmosferycznych w eksperymencie Superkamiokande
- Potwierdzenie tej obserwacji w akceleratorowym eksperymencie K2K
- Dalsze eksperymenty akceleratorowe z długą bazą pomiarową: MINOS, OPERA, ICARUS

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:

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

gdzie $\Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$ wyrażone jest w [eV⁻²], L w [km], a E w [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:

$$\begin{split} L &\sim 1 \text{ km}, \quad E_v \sim 1 \text{ GeV} \Rightarrow \Delta m^2 \sim \text{ eV}^2 \text{ (eksp. NOMAD i CHORUS)} \\ L &\sim 10^4 \text{ km}, E_v \sim 100 \text{ MeV} \Rightarrow \Delta m^2 \sim 10^{-5} \text{ eV}^2 (v_{atm} \text{ i średnica Ziemi}) \\ L &\sim 10^4 \text{ km}, E_v \sim 100 \text{ MeV} \Rightarrow \Delta m^2 \sim 10^{-5} \text{ eV}^2 (v_{atm} \text{ i średnica Ziemi}) \\ L &\sim 10^2 \text{ km}, E_v \sim 1 \text{ MeV} \Rightarrow \Delta m^2 \sim 10^{-5} \text{ eV}^2 (v_{reakt} \text{ i baza L rzędu 100 km}) \\ L &\sim 10^8 \text{ km}, E_v \sim 10 \text{ MeV} \Rightarrow \Delta m^2 \sim 10^{-10} \text{ eV}^2 (v_{ston} \text{ i odległość Stońce-Ziemia}) \end{split}$$

Oscylacje neutrin słonecznych i atmosferycznych są całkiem nieźle opisywane przez ten prosty model z udziałem dwu stanów zapachowych i dwu stanów masowych

Aspekty eksperymentalne

Eksperymenty poszukujące sygnału β w wiązce α :

$$P(\nu_{\alpha} \to \nu_{\beta}) \ge 0$$

Eksperymenty mierzące osłabienie wiązki α :

$$P(\nu_{\alpha} \to \nu_{\alpha}) \leq 1$$

Liczba obserwowanych przypadków N_{obs} oddziaływań neutrin jest proporcjonalna do fizycznego przekroju czynnego na oddziaływanie σ [cm²], wielkości strumienia neutrin Φ [cm⁻²] oraz liczby atomów tarczy N na ich drodze:

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

→ Potrzebne jak najsilniejsze źródło neutrin i wielki oraz wydajny detektor: optymalizacja eksperymentów neutrinowych polega na łącznym traktowaniu źródła neutrin, bazy pomiarowej L i detektora A.Zalewska, w.5, 9.04.2008

Pomiary oscylacji

1998-2002 wielkie odkrycia

w eksperymentach SuperKamiokande (v atmosferyczne) , K2K (akceleratorowe), SNO (v słoneczne) i KamLAND (v reaktorowe) 2003

początek precyzyjnych pomiarów w badaniach oscylacji neutrin



SupenKamiokande08





SNO

"Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos", komunikat na konferencji Neutrino '98 w Takayama w Japonii, publikacja w Phys. Rev. Lett. **81** (1998) 1562

SuperKamiokande Collaboration

Najbardziej cytowana praca z fizyki cząstek

Zapoczątkowała silny wzrost liczby publikacji z fizyki neutrin



<u>Przypomnijmy</u>

Neutrina atmosferyczne-oddziaływania z materią



Zauważmy: Wykres przedstawia przekroje czynne podzielone przez energię neutrina

Neutrina atmosferyczne-strumień

Stosunek strumieni ν_{μ}/ν_{e} - dla neutrin niskiej energii powinien być 2

 $\begin{cases} \pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu \\ \mu^+ \to e^+ + \overline{\nu}_\mu + \nu_e \end{cases}$ $\begin{cases} \pi^- \to \mu^- + \overline{\nu}_\mu \\ \mu^- \to e^- + \nu_\mu + \overline{\nu}_e \end{cases}$ $\frac{\Phi(\nu_\mu)}{\Phi(\nu_e)} \approx 2 \ (E_\nu < 3 \, GeV)$



Stosunek strumieni mionów (z oddziaływań neutrin) przychodzących do detektora z góry i z dołu – dla wysokoenergetycznych neutrin powinien być 1

W obu przypadkach, celem zmniejszenia błędów systematycznych, lepiej jest badać tzw. podwójny stosunek, tzn. stosunek strumieni podzielonych przez ich wartości oczekiwane przy braku oscylacji A.Zalewska, w.5, 9.04.2008

Neutrina atmosferyczne-strumień

Kąt zenitalny – miarą długości drogi neutrina od miejsca powstania do detektora Przewidywania MC wielkości strumienia neutrin atmosferycznych w funkcji kąta zenitalnego dla 3 energii neutrin



Zauważmy: 4 rzędy wielkości dla długości drogi od miejsca powstania do detektora, szybka zmiana długości drogi w pobliżu horyzontu, dla wyższych energii strumień neutrin staje się symetryczny

"Anomalia" neutrin atmosferycznych

Pomiar: przypadków quasi-elastycznych oddziaływań neutrin w latach 80-tych w eksperymentach poszukujących rozpadu protonu

$$R = \frac{(\nu_{\mu} / \nu_{e}) \text{ measured}}{(\nu_{\mu} / \nu_{e}) \text{ predicted}}$$

Wyniki: wskazujące na niedobór neutrin mionowych

- Kamiokande: R=0.60^{+0.06}-0.05
- IMB: R=0.54+-0.05+-0.12
- Frejus: R=1.00+-0.15+-0.08
- NUSEX: R=0.99 ^{+0.35}-0.25
- SOUDAN2: R=0.58+-0.11+-0.05
- Super-Kamiokande: R=0.668^{+0.024}-0.023 +-0.052

Niejednoznaczne - rozstrzygnięcie w eksperymencie SuperKamiokande

Zasada działania wodnego detektora Czerenkowa

Zbiornik z bardzo czystą wodą, - jeśli naładowane cząstki powstałe w oddziaływaniach neutrin poruszają się w wodzie szybciej niż światło, to wzdłuż ich torów emitowane jest promieniowanie Czerenkowa (niebieskawe światło z widzialnej części widma) pod kątem θ (cos θ =1/n β).



Fotony czerenkowskie, w postaci pierścienia, rejestruje się przy pomocy fotopowielaczy

 rozkład i czas powstania sygnału służą do wyznaczenia kierunku naładowanej cząstki (-> kierunku neutrina) i miejsca oddziaływania

wielkość sygnału, kąt rozwarcia stożka oraz jego "wygląd" pozwalają wyznaczyć energię i rodzaj cząstki (-> energię i rodzaj neutrina)



Detektor SuperKamiokande



SK-1 1996-2001

50 kton wody, z czego 22.5 ktony to masa pomiarowa ("fiducial mass") – 2 m od ścian

11146 fotopowielaczy 50-cm (40% pokrycie)

1885 fotopowielaczy 20-cm w zewnętrznym detektorze

SK-2 2003-2005

5182 fotopowielacze 50-cm(19% pokrycie)

Detektor zewnętrzny w pełni odbudowany

SK-3 od 2006

Powrót do oryginalnego pokrycia, ale bezpieczniejsze rozwiązania,

Detektor SuperKamiokande



Zdjęcia sprzed wypadku

"Oczy" SuperKamiokande

 $\nu_{\mu}(\nu_{e}) + n \rightarrow \mu^{-}(e^{-}) + p$



 $\overline{\nu}_{\mu}(\overline{\nu}_{e}) + p \rightarrow \mu^{+}(e^{+}) + n$



non-showering or µ-like_U



SuperK – e i μ w stanie końcowym



SuperK – kilka cząstek w stanie końcowym



Symulacja

SuperK – kategorie analizowanych przypadków

SuperK-1 - analiza w oparciu o pełne dane sprzed awarii, kategorie analizowanych przypadków



SuperK-1 widma energii neutrin



Prawie 5 rzędów wielkości w energii neutrin

SuperK-1 stosunki strumieni neutrin



SuperK-1 - rozkłady kąta zenitalnego



SuperK-1 – parametry oscylacji $\nu_{\mu} \leftrightarrow \nu_{\tau}$



SuperKamiokande – analiza L/E – wynik z 2004 r.

Rozkład L/E - bezpośrednie wskazanie na oscylacje



A.Zalewska, w.5, 9.04.2008

SuperK – inne wyniki badań v atmosferycznych

 W granicy dokładności pomiarów w SuperK nie obserwuje się oscylacji $v_{\mu} \leftrightarrow v_{e}$

 \bullet Wybór przypadków odpowiadających oddziaływaniom ν_τ spośród wysokoenergetycznych przypadków wielocząstkowych – efekt na poziomie 2.5 σ

Eksperyment K2K pierwszy eksperyment akceleratorowy z długą bazą pomiarową



Eksperyment K2K - zasada pomiaru



Pomiar pędów i kierunków mionów w bliskim detektorze w KEK --> strumień neutrin i rozkład energii neutrin w bliskim detektorze --> przewidywania strumienia i rozkładu energii w det. SuperK Pomiar oddziaływań neutrin w det. SuperK --> wnioski na temat oscylacji na podstawie zanikania strumienia i

modyfikacji widma energii neutrin w porównaniu z przewidywaniami z ekstrapolacji, przywzałożeniu braku oscylacji

K2K – wybór przypadków w detektorze SuperK



Eksperyment K2K – wyniki pomiarów



Brak przypadków

A.Zalewska, w.5, 9.04.2008

 Zmiana kształtu rozkładu energii neutrin zgodnie z oczekiwaniami dla oscylacji

 Parametry oscylacji w zgodzie z wynikami SuperK dla neutrin atmosferycznych

- Najlepsze wyniki fitu $\sin^2 2\theta = 1.53$ $\Delta m^2 = 2.12 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$
- Najlepsze wyniki fitu przy ograniczeniu do fizycznych wartości:

 $\sin^2 2\theta = 1.00$ $\Delta m^2 = 2.73 \times 10^{-3} \, eV^2$

Amerykański i europejski projekt eksperymentów z długą bazą pomiarową

 NuMi - wiązka z FNAL do detektora MINOS w kopalni Soudan pod granicą kanadyjską, start w styczniu 2005 roku

CNGS - wiązka z
CERN-u do Gran
Sasso do detektorów
OPERA i ICARUS,
start w 2006 roku



Program NuMI (Neutrinos from Main Injector)

niskoenergetyczna wiązka neutrin mionowych, celem jest lepszy pomiar parametrów oscylacji w oparciu o zanikanie wiązki i pomiar kształtu rozkładu energii,





Wiązka NuMI w FNAL – parametry:

- protony z MI o energii 120 GeV,
- + pojedyncza ekstrakcja o długości 10 μs i 4x1013 p
- długość cyklu przyspieszania 1.867 s

Charakterystyka wiązki NuMI

- regulowalna energia wiązki (przez zmianę odległości między tarczą i magnesami-"rożkami")
- Większość danych zebrana przy najniższej energii wiązki (LE)
- Skład wiązki: 92.9% v_{μ} , 5.8% \overline{v}_{μ} , 1.3 v_{e} + \overline{v}_{e}



Expected no of events (no osc.) in Far Detector

Beam	Target z position (cm)	FD Events per 1e20 pot
LE-10	-10	390
pME	-100	970
pHE	-250	1340

Events in fiducial volume

A.Zalewska, w.5, 9.04.2008

Detektor MINOS

Iski detektor o masie 1 ktony w FNAL, daleki o masie 5.4 ktony w kopalni Soudan w stanie Minessota, obydwa zbudowane z namagnesowanych płyt z żelaza, przełożonych scyntylatorami

Daleki detektor MINOS









Eksperyment MINOS

Jak wyznacza się parametry oscylacji:

- Pomiar widma energii neutrin w bliskim detektorze (bez oscylacji)
- Ekstrapolacja tego widma do dalekiego detektora
- Porównanie z widmem zmierzonym w dalekim detektorze (po oscylacjach)



Eksperyment MINOS - wyniki

Eksperyment MINOS rozpoczął zbieranie danych na początku 2005 roku, w 2006 roku ogłosił swoje pierwsze wyniki w oparciu o 1.27x10²⁰ POT



Eksperyment MINOS - wyniki



Program CNGS

→ CNGS — wiazka wysokoenergetycznych neutrin mionowych z CERN-u do Gran Sasso, program nastawiony na zaobserwowanie oddziaływań neutrin taonowych (i elektronowych) pochodzących z oscylacji neutrin mionowych, start w 2006 roku



 u_{μ}

 v_{e}

Wiązka neutrin z CERN-u do Gran Sasso

CERN

Gran Sasso



Eksperyment OPERA



Wiązka CNGS



Rencontres de Moriond EW 2008

C.Pistillo - Bern Univ.

Eksperyment OPERA



Detektor OPERA



Eksperyment OPERA

- Kończy się instalacja detektora start w czerwcu 2008
- Trochę danych zebranych w 200 roku z niekompletnym detektorem

Event 178969961: $v_{\mu}CC$ interaction



SIDE VIEW (Vertical projection)



Eksperyment ICARUS

(Imaging Cosmic And Rare Underground Signals)

Problematyka fizyczna:

Badanie oddziaływań neutrin słonecznych, atmosferycznych, z wybuchu Supernowej i z wiązki akceleratorowej CNGS oraz poszukiwanie rozpadu protonu przy użyciu wielkich komór TPC wypełnionych ciekłym argonem.

Dwa etapy:

T600 - detektor o całkowitej masie 600 ton, na etapie instalacji Detektor o docelowej masie kilku-kilkudziesięciu kton, na etapie projektowania i R&D



ICARUS - wielkie komory TPC wypełnione ciekłym argonem

- → Wykorzystywane zjawisko jonizacji w ciekłym argonie wzdłuż torów cząstek naładowanych, trójwymiarowy obraz przypadku oddziaływania w oparciu o pomiar sygnałów na drutach (dwie współrzędne) i o pomiar czasu dryfu (trzecia współrzędna).
- Uniwersalny detektor dla fizyki neutrin, pozwalający na równoczesne rejestrowanie oddziaływań neutrin słonecznych, atmosferycznych i neutrin z wiązki



T600-pojedyncza komora TPC w fazie konstrukcji



View of the inner detector Million Continuent Wires of the TPC Drift Length (1.5 m) ΡМ Cathode Wire Chamber Structure

Field Shaping Electrodes (during installation)

T600-dane z testów pierwszej komory TPC

Nowatorska technika eksperymentalna: całkowicie elektroniczny detektor, dający trójwymiarowy obraz przypadku oddziaływania o jakości porównywalnej z obrazami z komór pęcherzykowych oraz bardzo dobry pomiar energii w oparciu o dE/dx na drutach.

Przykładowy przypadek:

