

Metamorfozy neutrin

Katarzyna Grzelak

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych
IFD UW

Symposium IFD 2008
6.12.2008

PLAN

- Wprowadzenie
- Oscylacje neutrin
- Eksperyment MINOS
- Wyniki



Image © 2008 TerraMetrics
© 2008 Europa Technologies
© 2008 Tele Atlas
Image NASA

©2008 Google

Neutrino - cząstka zaproponowana w 1930 r jako sposób na utrzymanie zasady zachowania energii w promieniotwórczych rozpadach β



Wolfgang Pauli

Co dzisiaj wiemy o neutrinach ?

- mają zerowy ładunek elektryczny
- oddziałują bardzo słabo (średnia droga na oddziaływanie neutrino o energii 10 MeV przechodzącego przez Ziemię:
 $\lambda \simeq 2.5 \times 10^{13} km$)
- znamy trzy rodzaje (zapachy) neutrin: ν_e, ν_μ i ν_τ :
 $(\nu_e, e), (\nu_\mu, \mu), (\nu_\tau, \tau)$

Co dzisiaj wiemy o neutrinach ?

- neutrino mogą zmieniać zapach w czasie propagacji w przestrzeni (oscylacje neutrin)
- **oscylacje neutrin \Rightarrow neutrino mają masę**
- masy bardzo małe: $m_\nu < 4 \times 10^{-4} m_e$
- masowe neutrino :
 - okno na nową fizykę
 - wkład do masy Wszechświata
 - poszukiwanie przyczyn asymetrii materii i antymaterii

Neutrino jako źródło informacji o Wszechświecie

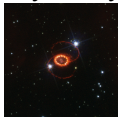
Źródła neutrin:

- Wielki Wybuch (przewidywane)



- Słońce

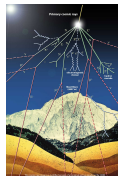
- Wybuchy Supernowych



- Wnętrze Ziemi (głównie

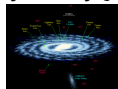


rozpad U i Th)



- Atmosfera

- Aktywne jądra galaktyk



...

OSCYLACJE NEUTRIN

OSCYLACJE NEUTRIN

Neutrino o określonym zapachu są kombinacją stanów o określonej masie.

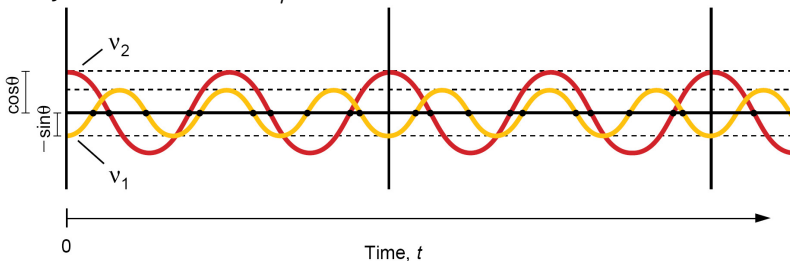
Przykład dla dwóch rodzajów neutrino, ν_e i ν_μ :



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



Stany o różnych masach poruszają się z różną prędkością \Rightarrow jeśli wyprodukowane zostało ν_μ to po pewnym czasie możemy zarejestrować ν_e lub ν_μ



MACIERZ MIESZANIA DLA NEUTRIN

Trzy zapachy neutrin jako kombinacja trzech stanów własnych masy.

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix}}_{\text{neutrino atmosferyczne}} \underbrace{\begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix}}_{\text{poszukiwane}} \underbrace{\begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\text{deficyt}} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

neutrino

atmosferyczne

poszukiwane

deficyt

neutrino słonecznych

$$s_{ij} = \sin \theta_{ij}$$

$$c_{ij} = \cos \theta_{ij}$$

$\delta \rightarrow$ faza łamania CP

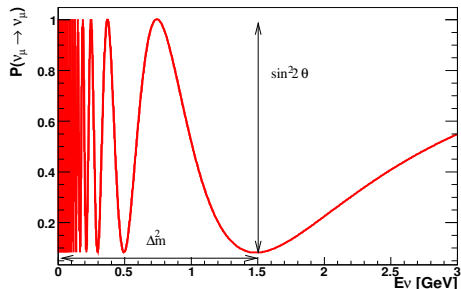
$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(L) = \sum_k |U_{\alpha k}|^2 |U_{\beta k}|^2 + 2\text{Re} \sum_{k>j} U_{\alpha k}^* U_{\beta k} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* \exp\left[-i \frac{\Delta m_{kj}^2}{2E_\nu} L\right]$$
$$\Delta m_{kj}^2 \equiv m_k^2 - m_j^2$$

Parametry modelu: 3 kąty mieszania θ_{23} , θ_{13} i θ_{12} , 1 faza δ i dla trzech rodzajów neutrin 2 niezależne różnice mas Δm^2 .

PRAWDOPODOBIEŃSTWO OSCYLACJI W EKSPERYMENTACH AKCELERATOROWYCH

- obserwacje znikania neutrin mionowych

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) \simeq 1 - \sin^2 2\theta_{23} \sin^2 \frac{1.27 \Delta m_{atm}^2 L}{E_\nu}$$



Rysunek dla $L=735\text{km}$

Jednostki:

$$\Delta m^2 [eV^2]$$

$$E_\nu [GeV]$$

$$L [km]$$

Maksimum oscylacji dla

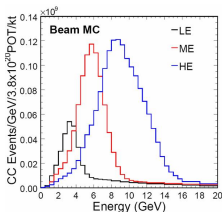
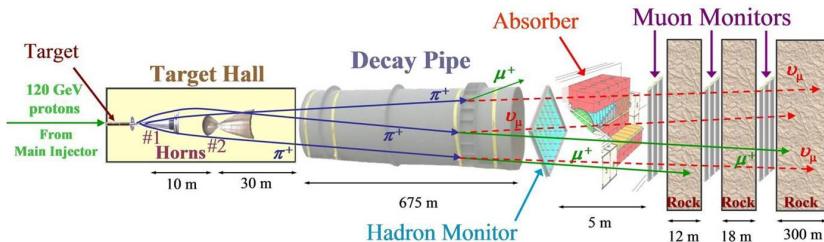
$$\frac{1.27 \Delta m_{atm}^2 L}{E_\nu} = \frac{\pi}{2}$$

EKSPERYMENT MINOS

- MINOS: eksperyment zbudowany w celu potwierdzenia hipotezy oscylacji neutrin i precyzyjnego zmierzenia parametrów modelu oscylacji
- Kontrolowana wiązka neutrin z akceleratora
- 27 instytucji, 147 fizyków



WIĄZKA NEUTRIN



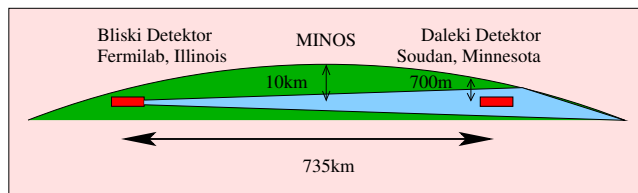
Wiązka pierwotna (protony): wysyłana w pulsach (3×10^{13} protonów/puls co 2.2s)

Wiązka wtórna (neutrino): skład wiązki (LE):

92.9 % ν_μ , 5.8 % $\bar{\nu}_\mu$, 1.3 % ($\nu_e + \bar{\nu}_e$)

ν_μ głównie z rozpadów $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$

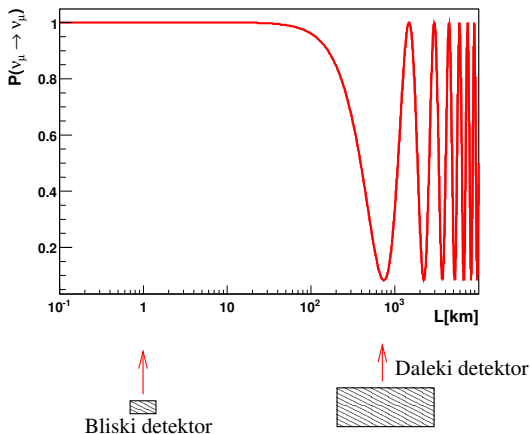
MINOS - WPROWADZENIE



- MINOS: drugi w historii eksperyment akceleratorowy z długą bazą
- Bliski Detektor (ND) (1kt) w ośrodku Fermilab pod Chicago,
- Daleki Detektor (FD) (5.4 kt) znajduje się 735km dalej w kopalni Soudan, w Minnesocie
- Czas przelotu neutrina z Fermilab'u do Soudan: $\sim 2.5ms$

POŁOŻENIE DETEKTORÓW

- **Bliski Detektor (ND)** → widmo energii niezakłócone przez oscylacje
- **Daleki Detektor (FD)** → poszukiwanie oscylacji

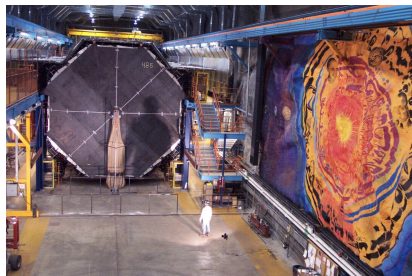


Rysunek dla $E=3\text{GeV}$

DALEKI DETEKTOR: KOPALNIA SOUDAN



MINOS: BLISKI I DALEKI DETEKTOR



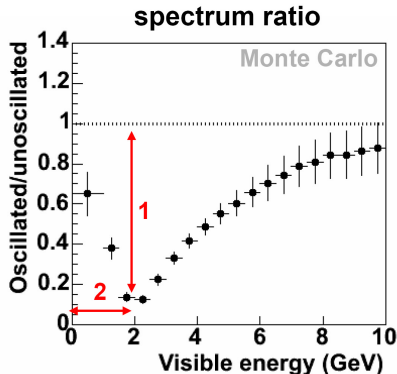
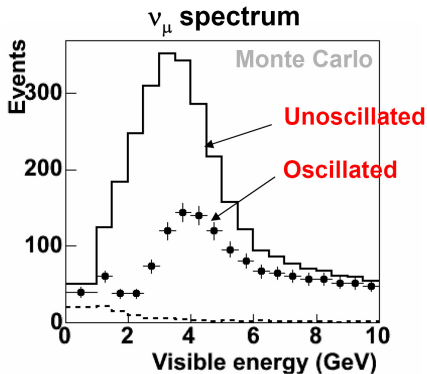
- Budowa detektorów:
 - naprzemiennie: stalowe płyty (2.54 cm) i paski scyntylatora (1cm)
 - paski w co drugiej płaszczyźnie są do siebie prostopadłe
- Bliski Detektor: 1kt, 282 płaszczyzny, 3.8m × 4.8m × 15m
100m pod powierzchnią ziemi
- Daleki Detektor: 5.4kt, 484 płaszczyzny , 8m × 8m × 30m
710m pod powierzchnią ziemi
- $B \sim 1.3$ T w obu detektorach

OSCYLACJE NEUTRIN AKCELERATOROWYCH w MINOS'ie

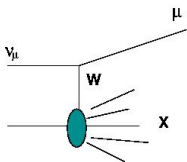
PRZYKŁAD ANALIZY ZNIKANIA ν_μ

Symulacja Monte Carlo

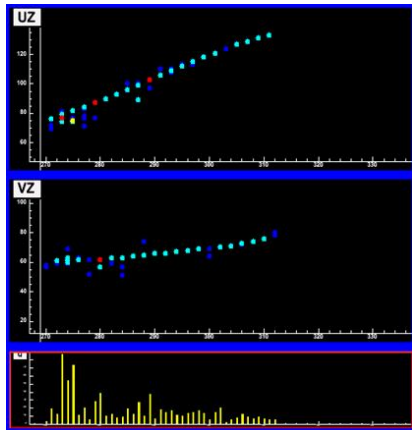
$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \underbrace{\sin^2 2\theta}_1 \sin^2 \left(1.267 \underbrace{\Delta m^2}_2 L / E \right)$$



SELEKCJA ODDZIAŁYWAŃ NEUTRIN ν_μ w MINOS'ie

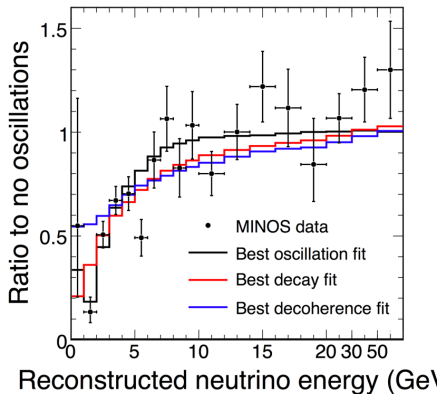
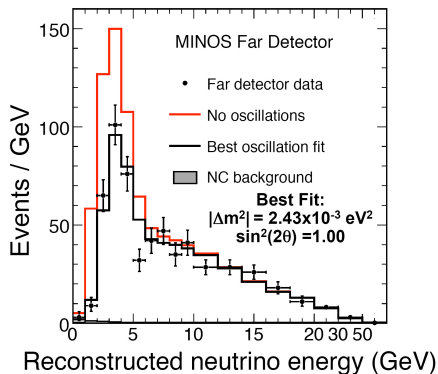


- $\nu_\mu N \rightarrow \mu X$
- Sygnaturą oddziaływania ν_μ jest obecność długiego toru mionu
- $E_\nu = E_{shower} + E_\mu$



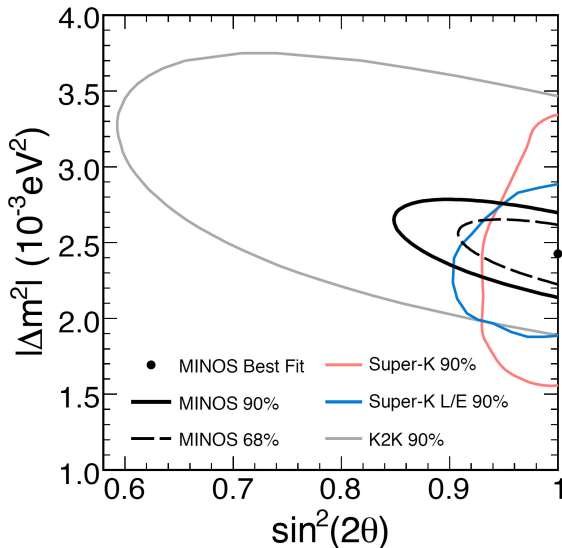
Kierunek wiązki neutron

Widmo energii w FD i krzywa oscylacyjna



- Oczekiwane 1065 ± 60 przypadków bez oscylacji
 - Zaobserwowano 848 przypadków
- Pierwsze oddziaływanie neutrino z wiązki w dalekim detektorze: 7 marzec 2005

Wyniki na płaszczyźnie parametrów oscylacji



Obecnie najbardziej precyzyjne pomiary Δm_{23}^2 na świecie.
 $\Delta m_{23}^2 = 2.43 \pm 0.13 \times 10^{-3} eV^2$
 $\sin^2 2\theta_{23}$ zgodny z jednością \rightarrow możliwe maksymalne mieszanie pomiędzy stanami ν_2 i ν_3

- Eksperyment MINOS to jeden z nielicznych obecnie eksperymentów neutrinowych dostarczających nowych, ciekawych danych
- Najbardziej precyzyjne pomiary parametru oscylacji Δm_{23}^2
Ten wynik będzie wkrótce jeszcze poprawiony !
- Poszukiwania θ_{13}
Gorąca tematyka - planowane kilka nowych eksperymentów.
Następny etap: eksperyment T2K w Japonii
z udziałem IFD UW i IPJ !
- Badania z mikroświata → wiedza o makroświecie