

# Czego dowiedzieliśmy się ostatnio o neutrinach ?



## Odpowiedzi na kilka fundamentalnych pytań:

- Najbardziej poszukiwany parametr modelu oscylacji neutrin  $\Rightarrow$  łamanie symetrii CP  $\Rightarrow$  pochodzenie asymetrii materii i antymaterii
- Czy neutrina zachowują się tak samo jak antyneutrina ?
- Prędkość neutrin ?



- Wprowadzenie
- Oscylacje neutrin
- Eksperymenty T2K i MINOS
- Wyniki



**Neutrino** - cząstka zaproponowana w 1930 r jako sposób na utrzymanie zasady zachowania energii w promieniotwórczych rozpadach  $\beta$

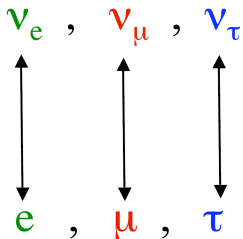


Wolfgang Pauli

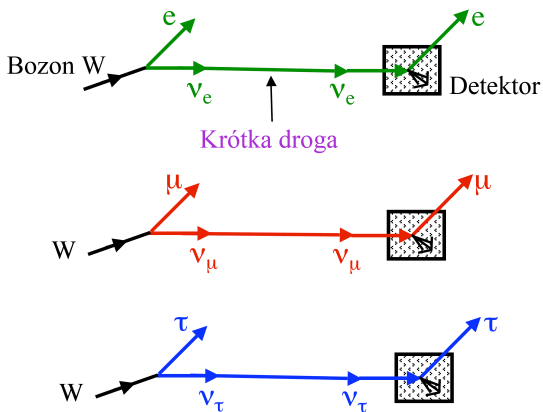
- Neutrino mają zerowy ładunek elektryczny
- Oddziałują bardzo słabo (średnia droga na oddziaływanie neutrino o energii 10 MeV przechodzącego przez Ziemię:  
 $\lambda \simeq 2.5 \times 10^{13} km$ )

# Neutrino - Wprowadzenie

Znamy trzy rodzaje (zapachy) neutrino odpowiadające trzem rodzajom naładowanych leptonów.

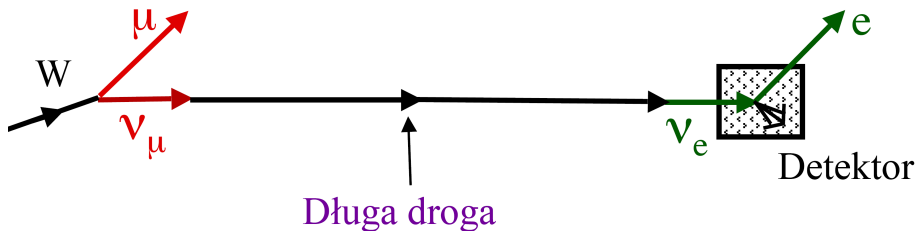


Co oznacza ta odpowiedniość:



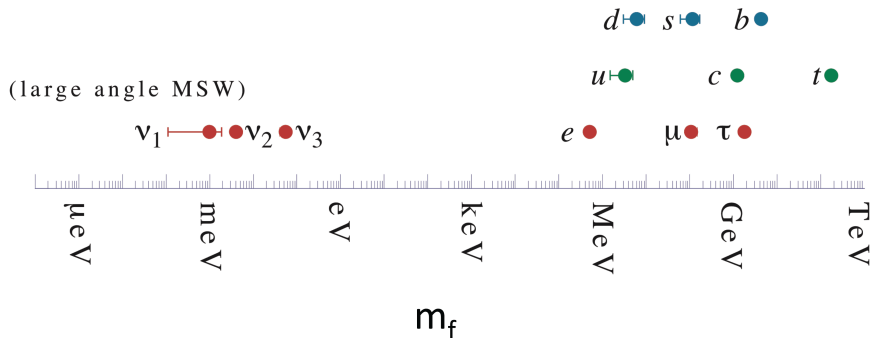
# Neutrino - Wprowadzenie

**Oscylacje neutrin:** neutrino mogą zmieniać zapach w czasie propagacji w przestrzeni



# Neutrino - Wprowadzenie

Neutrino oscylują  $\Rightarrow$  mają masę.



- masy bardzo małe (ograniczenia m.in. z eksperymentów badających rozpad  $\beta$  trytu)
- W eksperymentach badających oscylacje można wyznaczyć tylko różnice kwadratów mas  $\Delta m^2$  ( $\Delta m_{kj}^2 \equiv m_k^2 - m_j^2$ ).

# OSCYLACJE NEUTRIN

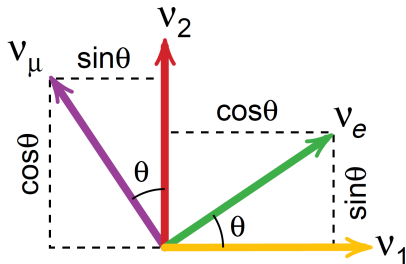
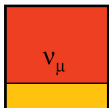
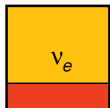


# Oscylacje neutrin dla 2 zapachów

Neutrino o określonym zapachu są kombinacją stanów o określonej masie.

Przykład dla dwóch rodzajów neutrin,  $\nu_e$  i  $\nu_\mu$ :

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

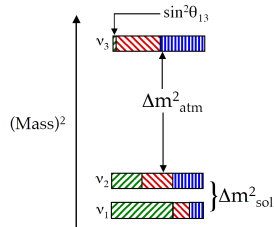


# Model z trzema zapachami neutrin

## MACIERZ MIESZANIA

Trzy zapachy neutrin jako kombinacja trzech stanów własnych masy.

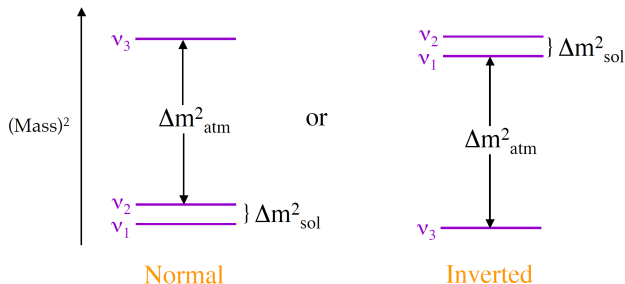
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$



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

$s_{ij} = \sin \theta_{ij}$ ,  $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$ ,  $\delta \rightarrow$  faza łamania CP

# Model z trzema zapachami neutrin



$$\Delta m_{\text{sol}}^2 \cong 7.5 \times 10^{-5} \text{ eV}^2, \quad \Delta m_{\text{atm}}^2 \cong 2.3 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

W sytuacji gdy widmo mas neutrin ma efektywnie tylko 2 poziomy:

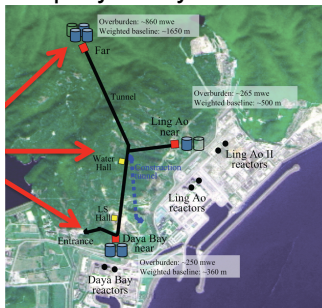
$$P(\nu_{\alpha} \rightarrow \nu_{\beta}) \simeq \sin^2 2\theta_{\alpha\beta} \sin^2 \left[ 1.27 \Delta m^2 (\text{eV}^2) \frac{L(\text{km})}{E_{\nu}(\text{GeV})} \right]$$

# EKSPERYMENTY

The image shows the interior of a large particle detector, likely a bubble chamber or a similar tracking detector. The central region is filled with a dense grid of small, cylindrical detector elements, possibly photomultiplier tubes or scintillators, arranged in a regular pattern. The background is a curved, metallic surface composed of many small, reflective spheres, creating a complex, textured environment. The overall scene is illuminated with a warm, golden light, highlighting the intricate details of the detector's structure.

# Eksperymenty do pomiarów $\theta_{13}$

## Eksperymenty reaktorowe:



Daya Bay



RENO



Double CHOOZ

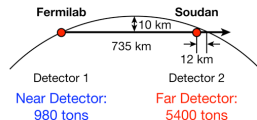
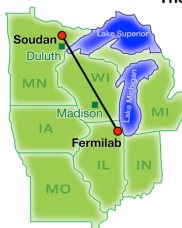
## Eksperymenty akceleratorowe,

udział IFD UW



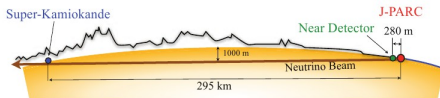
## MINOS

The MINOS Experiment

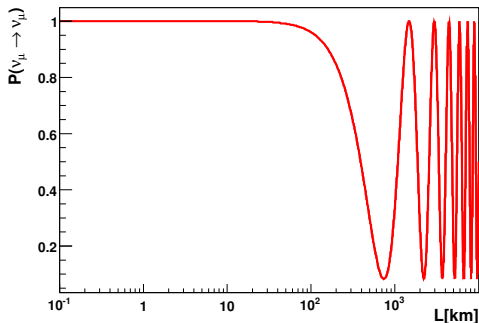


## T2K

Super-Kamiokande

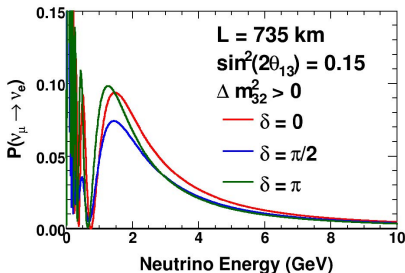
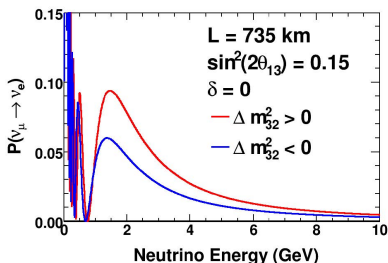


- **Bliski Detektor** →  
widmo energii  
niezakłócone  
przez oscylacje
- **Daleki Detektor** →  
poszukiwanie  
oscylacji



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

## Poszukiwanie $\theta_{13}$ w eksperymentach T2K i MINOS = poszukiwanie pojawiania się $\nu_e$ w wiązce $\nu_\mu$ z akceleratora



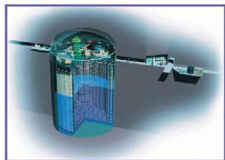
Mierzona kombinacja parametrów, a nie samo  $\theta_{13}$ . Dostęp do  $\delta_{CP}$  (!)

# Akceleratorowe eksperymenty mierzące $\theta_{13}$

	T2K	MINOS
Lokalizacja	Japonia	USA
Odległości	295km	735km
Energia	0.6 GeV (pik)	3 GeV (pik)
Oddziaływania	$\nu_e + n \rightarrow e^- + p$	$\nu_e + N \rightarrow e^- + X$
Daleki det.	22kt Wodny detektor	4.5kt Warstwy żelaza + warstwy scyntylatora
Metoda detekcji	Światło Czerenkowa	Światło scyntylicyjne



# EKSPERYMENT T2K



**Super-Kamiokande**  
(ICRR, Univ. Tokyo)

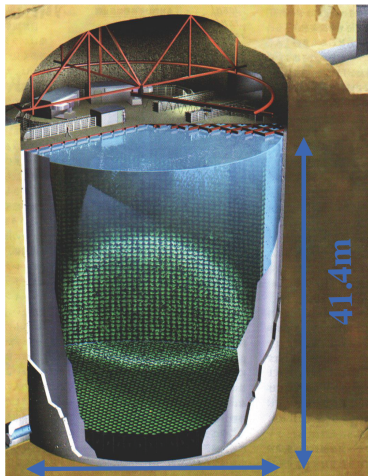


**J-PARC Main Ring**  
(KEK-JAEA, Tokai)



- Eksperyment w Japonii (J-PARC-Kamioka)
- Współpraca: instytucje z całego świata (w tym 6 z Polski)
- Bliski detektor (ND280) złożony z kilku komponentów, pole magnetyczne
- Daleki detektor (Super Kamiokande)
- Odległość do dalekiego detektora: 295km

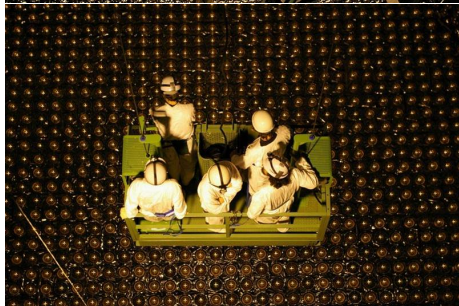
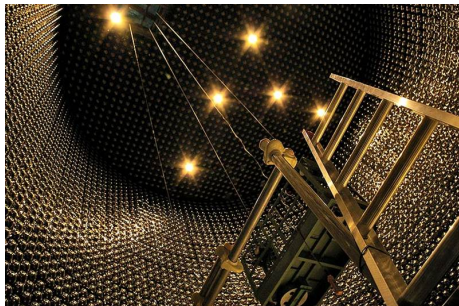
# T2K - daleki detektor (Super-Kamiokande)



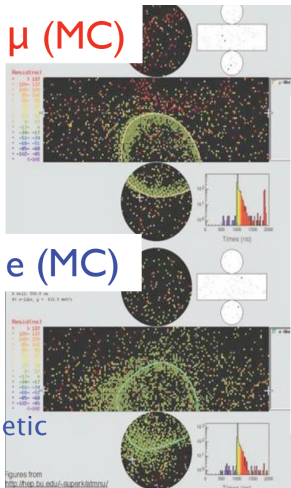
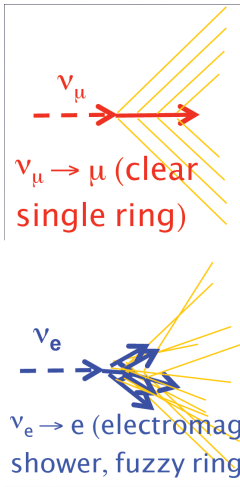
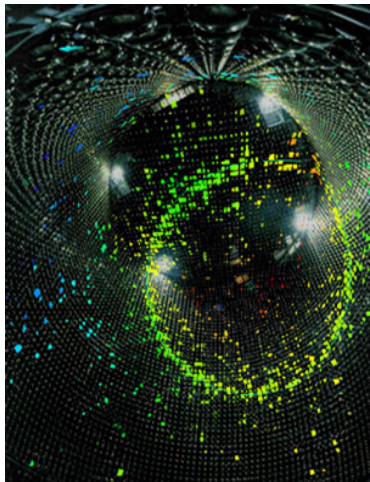
## Detektor Super-Kamiokande

- zbiornik z nierdzewnej stali
- wypełniony ultra-czystą wodą
- Optycznie podzielony na część wewnętrzną i zewnętrzną
- Odczyt: fotopowielacze
- 1000 m pod ziemią

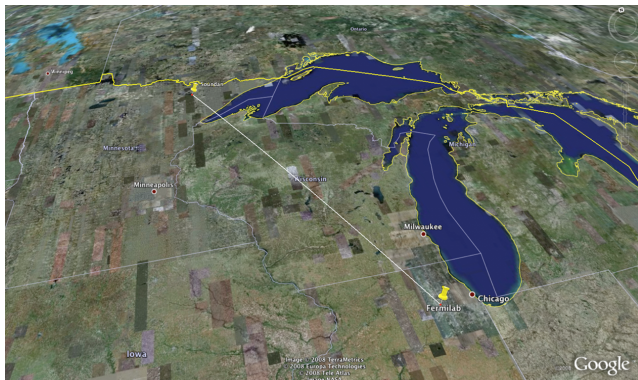
# T2K - detektor Super-Kamiokande



# Oddziaływania w detektorze T2K

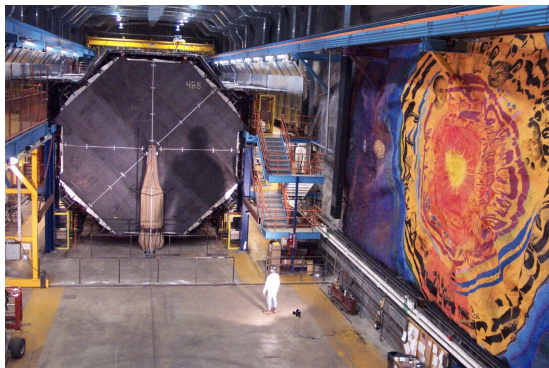


# EKSPERYMENT MINOS



- Eksperyment w USA (Fermilab-Minnesota)
- Współpraca: USA, UK, Grecja, Brazylia i Polska
- Bliski i daleki detektor o bliźniaczej konstrukcji
- Pole magnetyczne !
- Odległość do dalekiego detektora: 735km

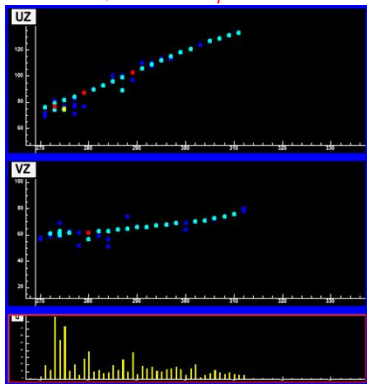
# MINOS - daleki detektor



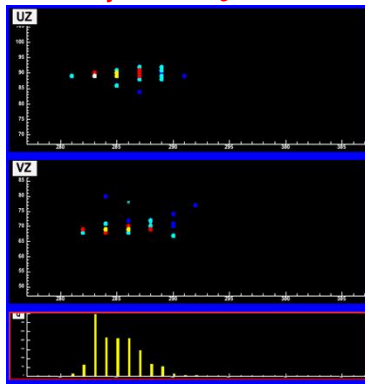
- Naprzemiennie: stalowe płyty (2.54 cm) i paski scyntylatora (1cm)
- Światło scyntylicyjne doprowadzane światłowodami do fotopowielaczy
- 710 m pod ziemią

# Oddziaływania w detektorze MINOS

## Oddziaływanie $\nu_\mu$



## Oddziaływanie $\nu_e$



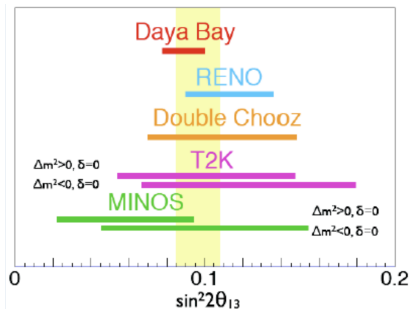
Kierunek wiązki  $\longrightarrow$



# WYNIKI

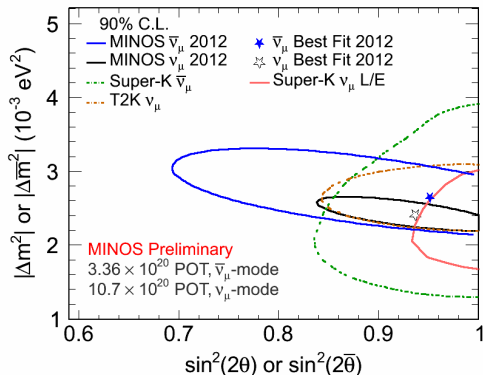


# Wyniki pomiarów $\theta_{13}$



- 13.06.2011 Pierwsze doniesienie o pomiarze niezerowej wartości  $\theta_{13}$ :  
**6** kandydatów  $\nu_e$   
(tło  $1.5 \pm 0.3$ ) ( $2.5 \sigma$ ):  
**eksperyment T2K**
- eksp. reaktorowe: dokładny pomiar  $\theta_{13}$
- eksp. akceleratorowe: dostęp do pomiarów  $\delta_{CP}$  i hierarchii mas

# Oscylacje neutrin vs oscylacje antyneutrin

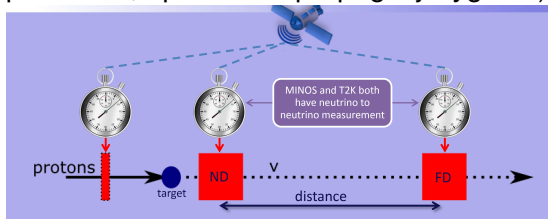


2012: Neutrina oscylują tak samo jak antyneutrina.

**MINOS** - unikalny detektor → w polu magnetycznym. Obecnie najbardziej precyzyjny na świecie pomiar większego  $\Delta m^2$  i  $\Delta \bar{m}^2$ .

# Prędkości neutrin

Pomiar prędkości neutrin → precyzyjne pomiary geodezyjne odległości od źródła do detektora i pomiar czasu przelotu (synchronizacja pomiarów, opóźnienia propagacji sygnału)



2012: Niezależny pomiar prędkości neutrin z eksperymentu MINOS, dwie metody analizy:

$$\delta_t = TOF_c - TOF_\nu = 11.4 \pm 11.2(stat) \pm 29(syst)ns$$

$$\delta_t = TOF_c - TOF_\nu = 18 \pm 11(stat) \pm 29(syst)ns$$

- **Od 2012 roku  $\theta_{13}$  znamy wszystkie kąty mieszania neutrin !**
- Niezerowa wartość  $\theta_{13}$  otwiera eksperymentom akceleratorowym drogę do zbadania pozostałych niewiadomych w sektorze neutrin
- Oscylacje neutrin - co dalej ?
  - Dalsze precyzyjne pomiary parametrów oscylacji
  - Pojawianie się neutrin taonowych
  - Czy istnieje czwarte neutrino (neutrino sterylne) ?
  - Odwrócona czy normalna hierarchia mas neutrin ?
  - Łamanie symetrii CP w sektorze neutrinowym ?