



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA  
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE  
AGH UNIVERSITY OF KRAKOW

# Puzzle z tajemniczych neutrin

Artur Ukleja

## Jednostki w HEP

- kg, m, s są jednostkami w skali makroskopowej
- Stają się dość niezdarne w skali kwantowej
- **Naturalne jednostki:**  $\hbar$ ,  $c$ , GeV

Energia	GeV	Czas	$(\text{GeV}/\hbar)^{-1}$
Pęd	$\text{GeV}/c$	Długość	$(\text{GeV}/\hbar c)^{-1}$
Masa	$\text{GeV}/c^2$	Powierzchnia	$(\text{GeV}/\hbar c)^{-2}$

- Fizycy cząstkowi upraszczają przyjmując  $\hbar = c = 1$

Energia	GeV	Czas	$\text{GeV}^{-1}$
Pęd	GeV	Długość	$\text{GeV}^{-1}$
Masa	GeV	Powierzchnia	$\text{GeV}^{-2}$

# Leptony

Znamy sześć leptonów (trzy rodziny)

Elektron  
 $e^-$   
1895

Mion  
 $\mu^-$   
1936

Taon  
 $\tau^-$   
1973

$$M=0.511\text{MeV} < M=106\text{MeV} < M=1777\text{MeV}$$

Neutrino elektronowe  
 $\nu_e$   
1956

Neutrino mionowe  
 $\nu_\mu$   
1963

Neutrino taonowe  
 $\nu_\tau$   
2000

Cięższe leptony rozpadają się do najlżejszych

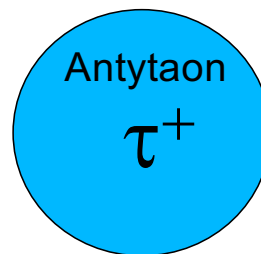
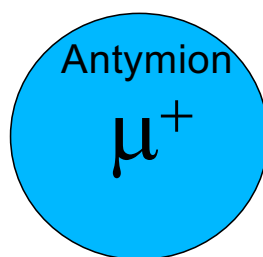
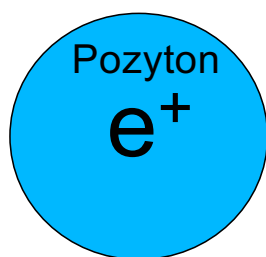
Ujemny ładunek elektryczny

Brak ładunku elektrycznego

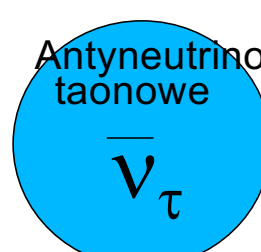
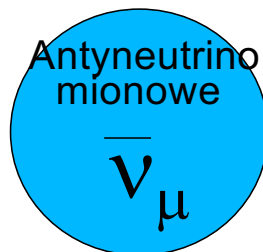
**Hierarchia mas i nie wiemy dlaczego!**

## Antyleptony – antycząstki

Antycząstki mają przeciwny ładunek elektryczny



Dodatni ładunek elektryczny



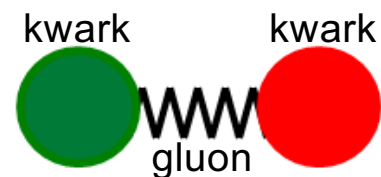
Brak ładunku elektrycznego

## Oddziaływania

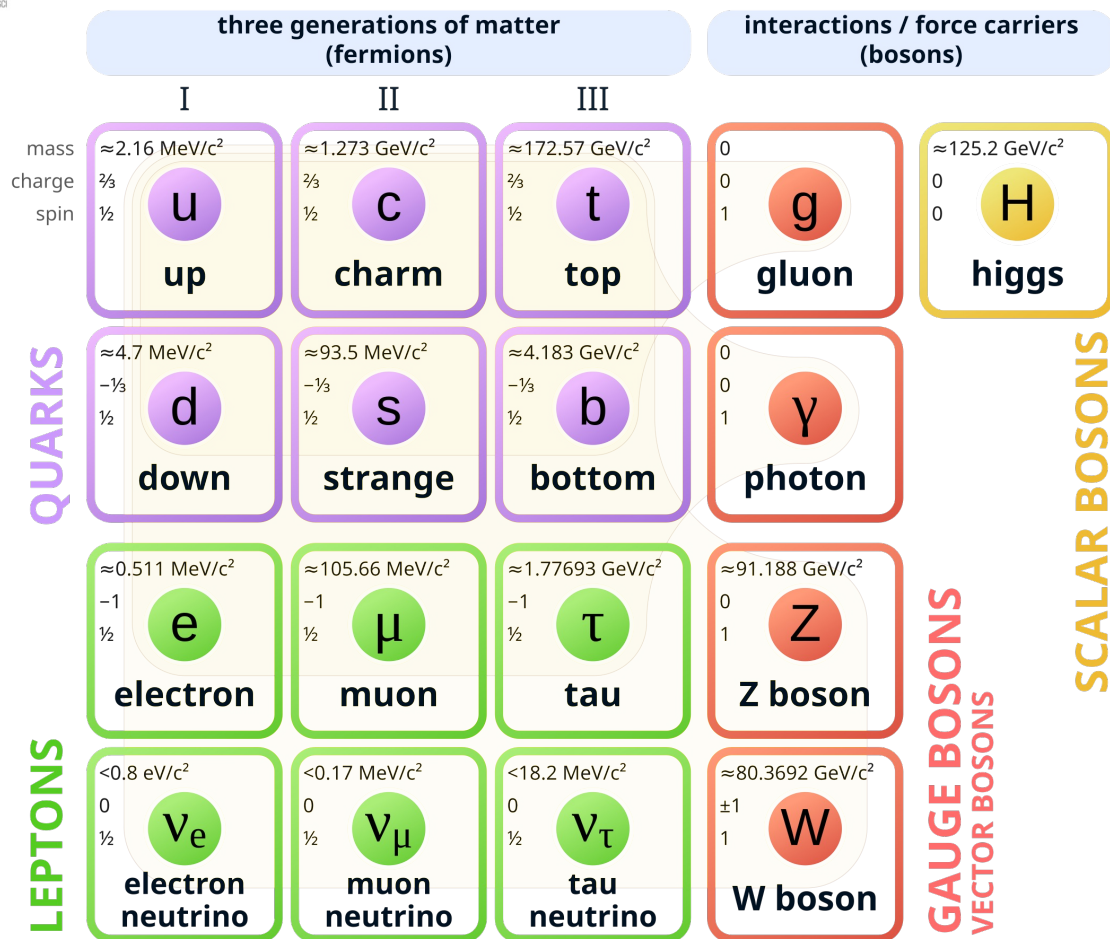
Oddziaływania są przenoszone przez cząstki (wymiana cząstki)  
Cząstki te nazywamy **bozonami pośredniczącymi**

Znamy cztery rodzaje oddziaływań:

1. Elektromagnetyczne – foton  $\gamma$
2. Słabe – bozony  $W^{\pm}$  i  $Z^0$
3. Silne – gluony
4. Grawitacyjne – grawiton



# Model standardowy



Kryje wiele tajemnic

Im bardziej próbujemy go obalić, tym bardziej skutecznie się broni

## Historia neutrin

1930 – Pauli postuluje istnienie cząstki, która nie może być wykryta

1950 – Reines i Cowan przygotowują się do detekcji  $\nu$  (eksperymenty reaktorowe)

Do 1962 tylko  $\nu_e$  jest znane (nazywane neutрино)

1962 – Schwartz, Steinberger i Lederman przedstawiają ewidencję  $\nu_\mu$  budując pierwszą wiązkę neutrin

2000 odkrycie  $\nu_\tau$

Dziś mamy wiele pytań, na które nie potrafimy odpowiedzieć

## Neutrino rzadko wchodzą w interakcje z materią

- Przekrój czynny na oddziaływanie (z teorii Fermiego):

$$\sigma \approx 10^{-38} \text{ cm}^2 \text{ (czyli 1 femtobarn) przy } E(\nu) \text{ w zakresie MeV}$$

- Średnia droga jaką neutrino przebywa przed wejściem w interakcję z materią jest duża  $\lambda = \frac{1}{n\sigma}$

Przy  $E(\nu) \sim \text{MeV}$  droga oddziaływania może wynosić  $10^{16} \text{ km}$ ,

co jest znacznie większe niż średnica naszej galaktyki (100 000 lat świetlnych  $\sim 946$  bilionów km)

- Prawdopodobieństwo oddziaływania:

$$P = \sigma \cdot n \cdot d$$

$n$  liczba cząstek na jednostkę objętości (np. liczba atomów w materiale)

$d$  droga przebyta przez neutrino w materii

np. w zbiorniku wody o objętości  $1 \text{ m}^3$ :  $P \sim 10^{-42} \text{ m}^2$

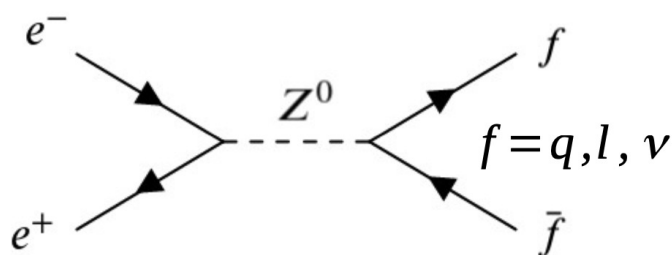


## Mnóstwo neutrin jest dookoła nas

- Neutrina przelatują przez każdego z nas bez oddziaływania w każdej sekundzie naszego życia, nawet 100 trilionów ( $10^{12}$ ) na sekundę
- Szansa, że neutrino oddziała w nas jest 1 na 1 trilion trilion
- Ta liczba jest tak mała, że trudno sobie nawet ją wyobrazić.
- **Będziemy mieli wyjątkowe szczęście, jeśli w ciągu naszego życia zostaniemy uderzeni chociażby przez jedno neutrino**

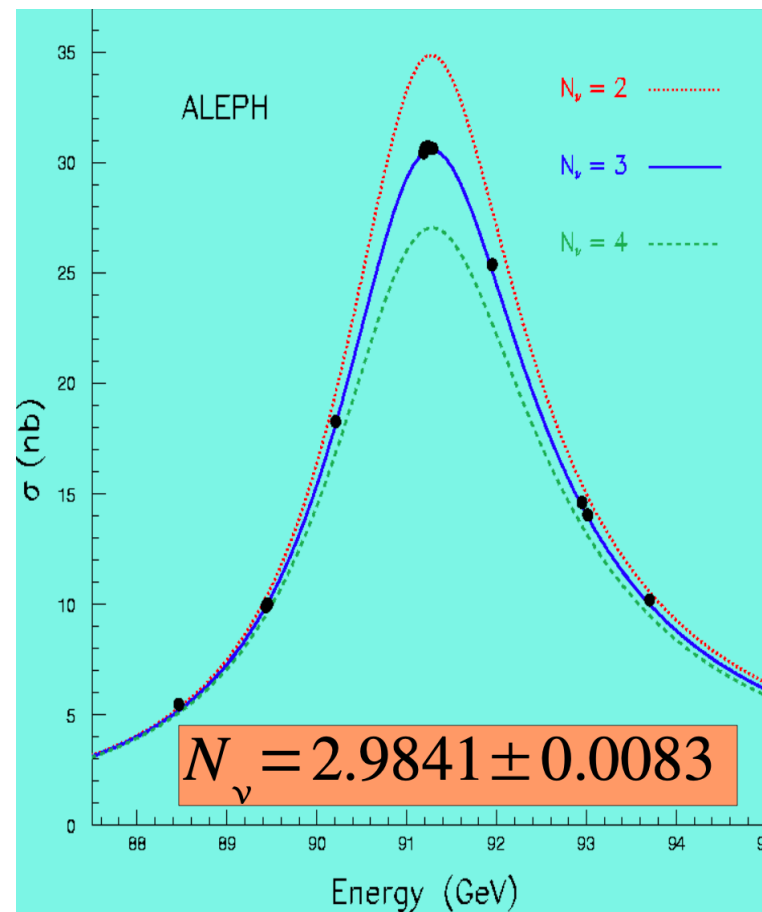
## Ile może być neutrino?

Odkrycie bozonu  $Z^0$  pozwoliło na pomiar liczby neutrino ponieważ  $Z^0$  rozpada się na parę: neutrino i antyneutrino



$$\Gamma_Z = \sum \Gamma_{q\bar{q}} + 3 \Gamma_{l\bar{l}} + N_\nu \Gamma_{\nu\bar{\nu}}$$

- Nie rozumiemy dlaczego są 3 neutrino
- Wiemy tylko, że 3 to najmniejsza liczba, żeby opisać dane



## Skrętność i parzystość

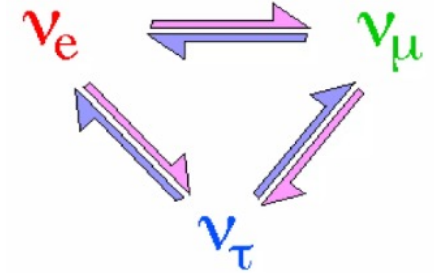
- W modelu standardowym przyjmuje się, że neutrino są cząstkami **bezmasowymi opisanymi równaniem Diraca**
- Jeśli tak to ich skrętność powinna być stałą cechą (projekcja spinu cząstki na kierunek jej ruchu):

neutrino Diraca ( $L = 1$ ):  $\nu_L, \nu_R$  powinny mieć odrębne antyneutrino ( $L = -1$ ):  $\bar{\nu}_L, \bar{\nu}_R$

- Możliwe także, że neutrino nie mają odrębnych antycząstek i istnieją tylko dwa stany  $\nu_L, \nu_R$  bez liczby leptonowej (neutrino Majorany)
- Neutrino Majorany są całkowicie neutralnymi (bez ładunku, bez liczby leptonowej) cząstkami o spinie 1/2, które są identyczne z ich antycząstkami
- **Natomiast obserwujemy  $\nu_L, \bar{\nu}_R$ , co oznacza to, że spin neutrino jest przeciwnie skierowany do jego pędu, a spin antyneutrino jest zgodny z jego pędem.**

## Mieszanie neutrin

- Jeżeli neutrino mają masę, to powinny się mieszać podobnie jak kwarki
- Macierz mieszania: **PMNS** (Pontecorvo, Maki, Nakagawa, Sakata)



$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} \Rightarrow U = \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix}$$

where  $c_{ij} = \cos\theta_{ij}$ , and  $s_{ij} = \sin\theta_{ij}$

Zmiana zapachu neutrina jest możliwa tylko jeśli masa nie jest zero

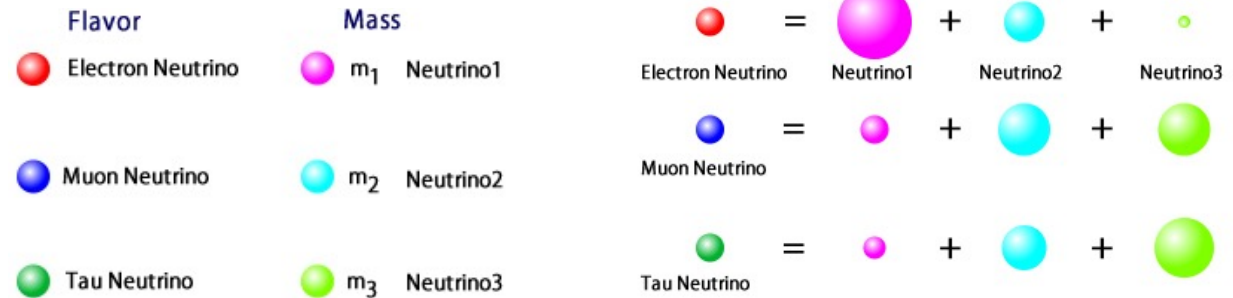
# Mieszanie neutrin

W strumieniu  $\nu_e$  słonecznych obserwujemy  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$  ( $\nu_e \rightarrow a\nu_\mu + b\nu_\tau$ )

1998 – odkrycie oscylacji neutrin

Może dojść do mieszania, wówczas stany masowe różnią się od stanów zapachowych (obserwowanych w eksperymentach)

$\nu_e$      $m_1$   
 $\nu_\mu$      $m_2$   
 $\nu_\tau$      $m_3$



Neutrina powstają w słabych oddziaływaniach (stany zapachowe), ale propagują się jako stany własne masy (**stany zapachowe są mieszanką stanów masowych**)

## Oscylacje neutrin – sytuacja z dwoma stanami

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

$$m_1(t) = m_1(0)e^{-iE_1 t}$$

$$m_2(t) = m_2(0)e^{-iE_2 t}$$

- Relacja  $m_1/m_2$  zmienia się w czasie lotu

$$\nu(t, x) = m_1(t, x)\cos\theta + m_2(t, x)\sin\theta$$

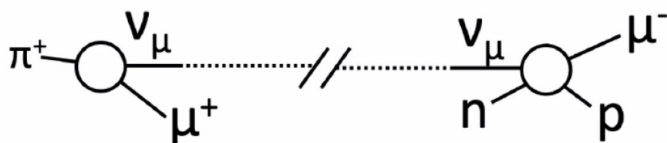
- Prawdopodobieństwo przejścia  $\nu_1$  w  $\nu_2$

$$P(\nu_1 \rightarrow \nu_2) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left( 1.27 \frac{\Delta m^2 L}{E_\nu} \right)$$

zapach neutrin jest funkcją oscylacji czasu i odległości lotu

- Parametry mieszania: różnica masy  $\Delta m^2 = m_1^2 - m_2^2 [eV^2]$  i kąt mieszania  $\theta$
- Oscylacje są możliwe jeśli przynajmniej jeden ze stanów ma niezerową masę

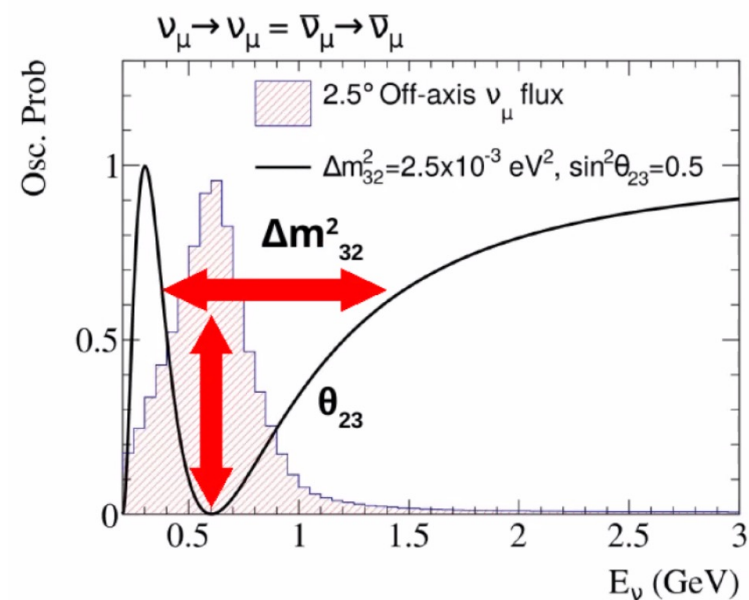
# Prawdopodobieństwo „znikania”



$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) \approx 1 - \sin^2 2\theta_{23} \sin^2\left(\frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E}\right)$$

$\sin^2 2\theta_{23}$  kąt mieszania zmienia amplitudę oscylacji

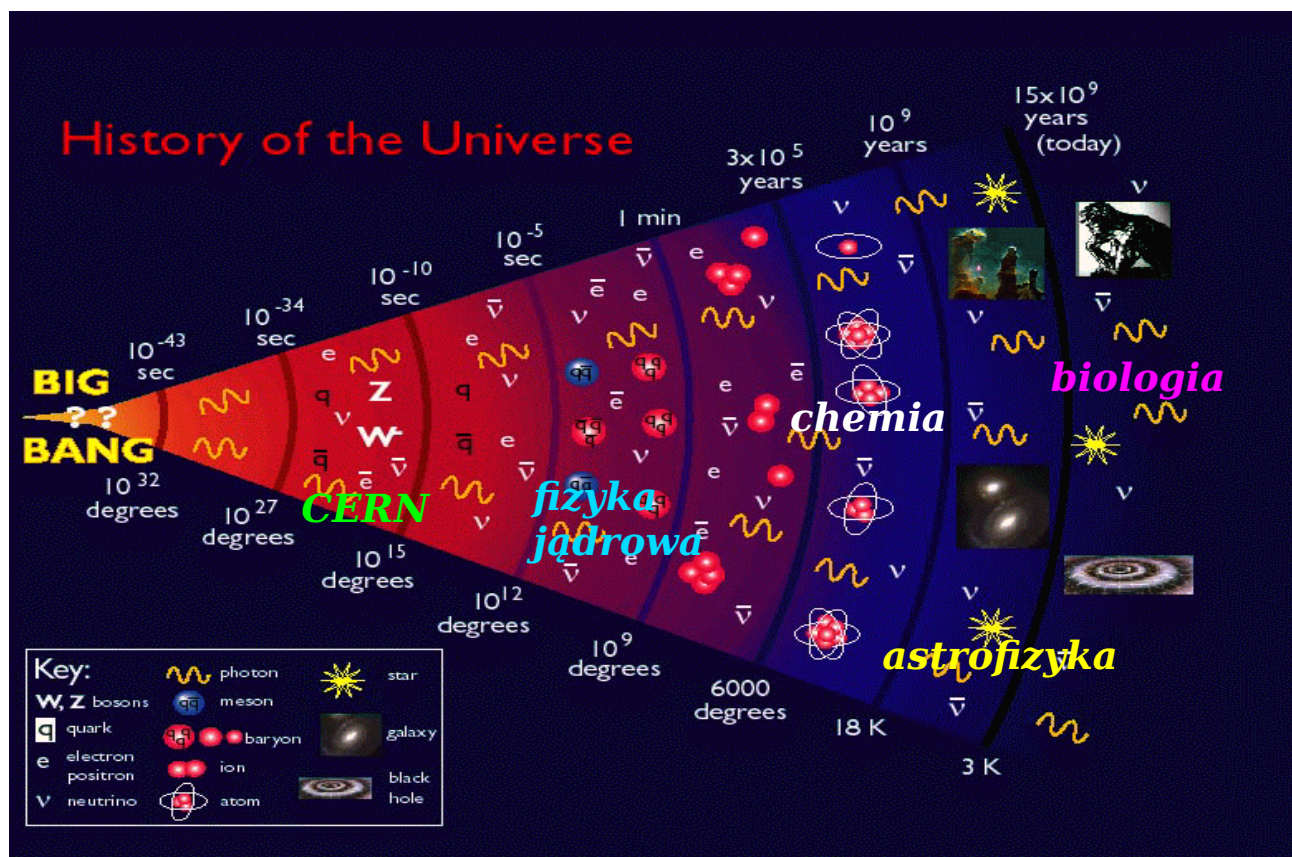
$\Delta m_{32}^2$  kwadrat różnicy mas zmienia częstość oscylacji



Max  $\sin^2 2\theta_{23} = 1$  oznacza maksymalne mieszanie  $\theta_{23} = 45^\circ$

# Wielki wybuch – początek czasu i przestrzeni

Prawie 15 miliardów lat temu w wielkim wybuchu powstał nasz wszechświat. W nieskończenie małym obszarze przestrzeni energia zamieniła się w równe ilości materii i antymaterii



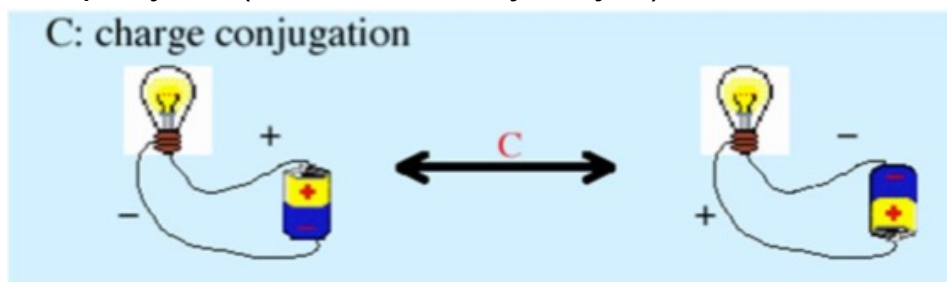


## Gdzie podziła się antymateria?

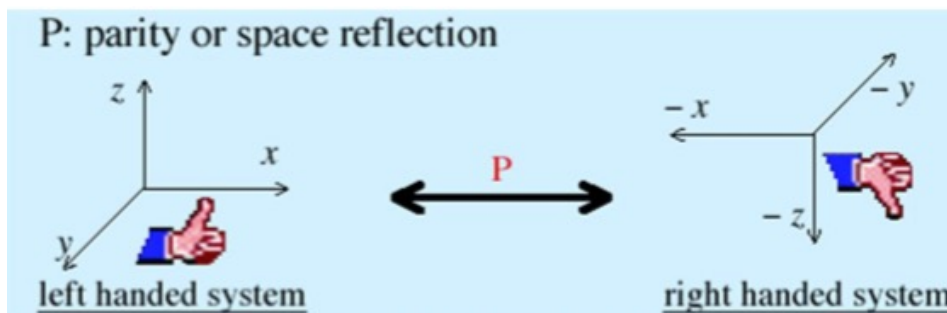
- W miarę jak **wszechświat rozszerzał się i oziębiał** zmieniały się jego składniki. W ułamku sekundy cała antymateria znikła, zamieniając się w energię promieniowania (fotony) w **procesie anihilacji z materią**. **Pozostała tylko niewielka nadwyżka materii (kilka protonów na 10 miliardów anihilacji)**.
- **Z tej małej resztki powstał cały nasz wszechświat** z miliardami galaktyk, gwiazdami, Słońcem, Ziemią i życiem na Ziemi.
- Nie wiemy jak powstała ta mała nadwyżka materii, z której jesteśmy zbudowani. Wiemy jednak, że do jej uzyskania potrzebne były **oddziaływania łamiące symetrię między materią i antymaterią**.

## Łamanie symetrii materia – antymateria (CP)

**C (charge)** – zamiana cząstki na antycząstkę, np. elektron (ładunek elektryczny -) na pozyton (ładunek elektryczny +)



**P (parity)** – zamiana kierunków wszystkich współrzędnych  $(x,y,z) \rightarrow (-x,-y,-z)$

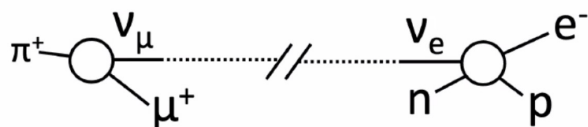


**CP** – złożenie C i P

## Łamanie symetrii CP w modelu standardowym

- Łamanie CP potwierdzono w rozpadach mezonów „ciężkich” K, B, B<sub>s</sub>, D
- Wielkość tego łamania symetrii CP jest miliard razy za mała, żeby wyjaśnić ilość pozostałej we wszechświecie materii
- Przy tak małym naruszeniu symetrii materia – antymateria pozostała po wielkim wybuchu nadwyżka materii wystarczyłaby na utworzenie tylko jednej z miliardów obserwowanych galaktyk
- Musimy więc szukać nowych źródeł łamania symetrii CP poza modelem standardowym, czyli tzw. nowej fizyki
- Czy w sektorze „lekkich” neutrin też występuje łamanie CP?

## Prawdopodobieństwo „pojawiania się”

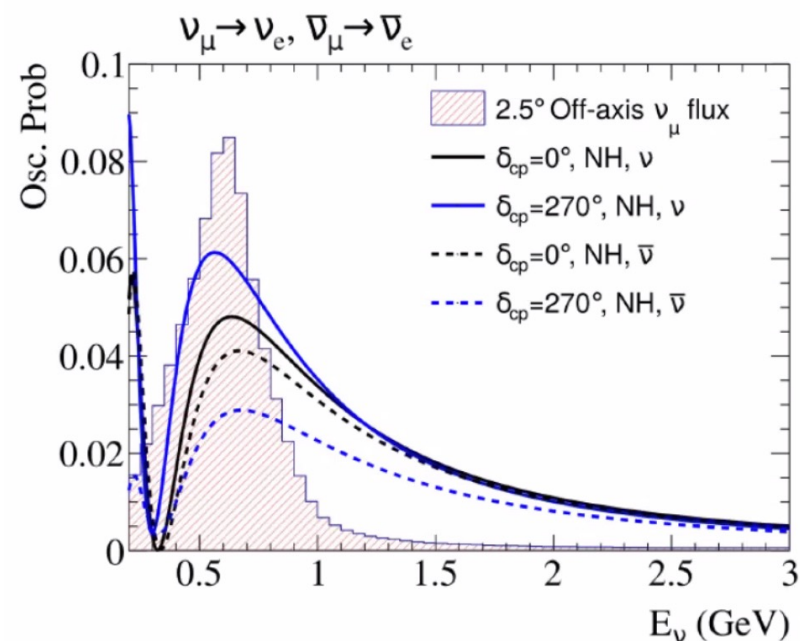


$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \approx \sin^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \left( \frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E} \right)$$

- +  $\delta_{CP}$  człon związany z łamaniem CP
- +  $\delta_{CP}$  człon związany z zachowaniem CP
- + inne człony

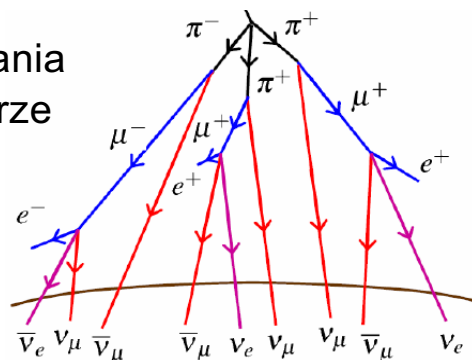
$\delta_{CP} = \frac{\pi}{2}$  to mniej  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ , więcej  $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$

$\delta_{CP} = -\frac{\pi}{2}$  to więcej  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ , mniej  $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$



Naturalne (atmosferyczne, kosmiczne):

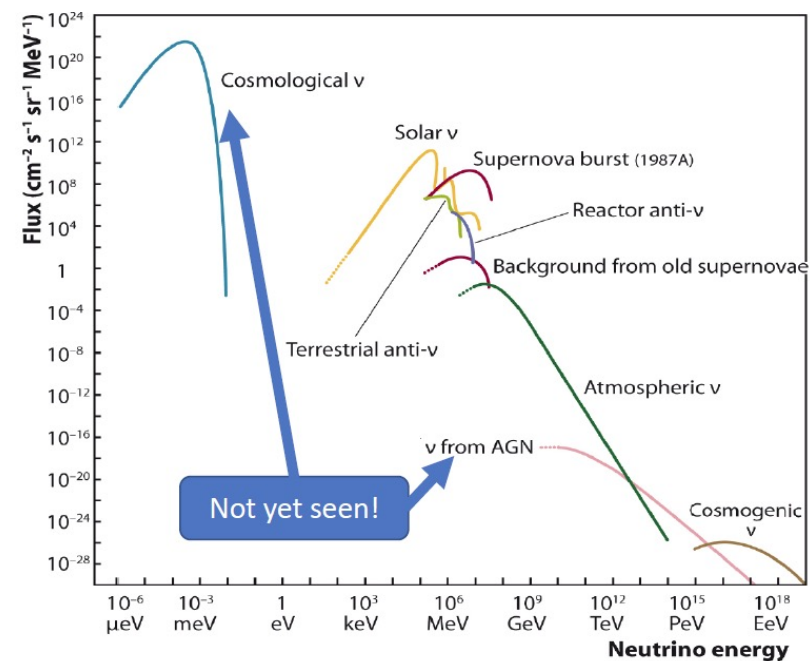
- Big Bang
- Słońce
- oddziaływania w atmosferze



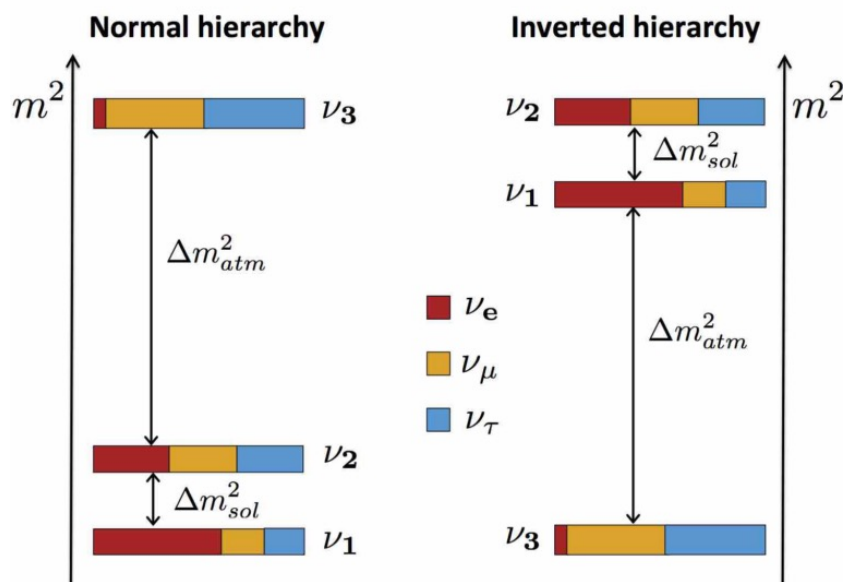
- eksplozje gwiazd (Supernowe)
- Blazary
- odległe galaktyki ( $E > \text{PeV}$ )
- promieniowanie kosmiczne

Sztuczne – stworzone przez człowieka:

- reaktory jądrowe
- akceleratory cząstek



# Hierachia mas



Obecnie jedno z kluczowych pytań w sektorze neutrin

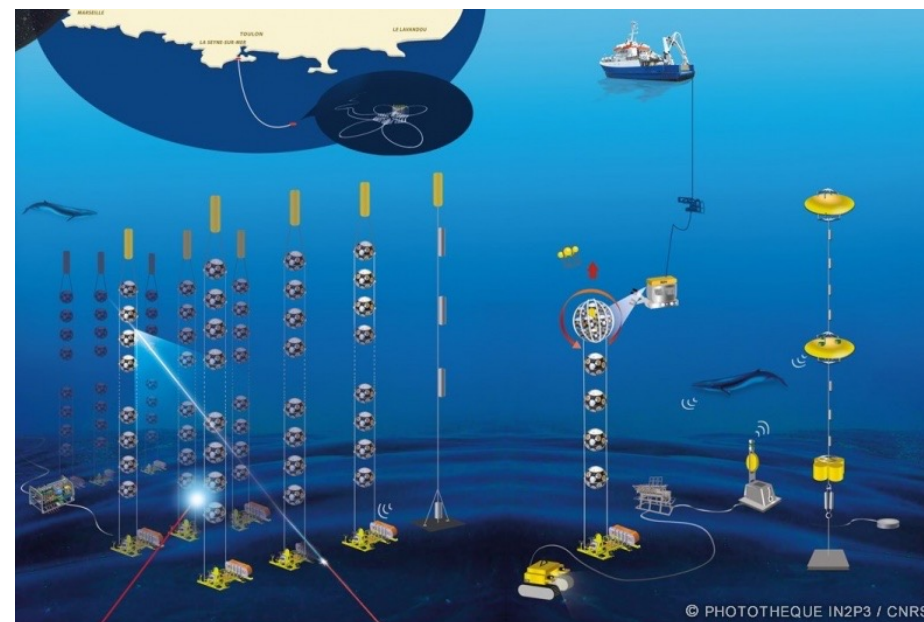
W głębinach wód Morza Śródziemnego

- **ORCA** (Oscillation Research with Cosmics in the Abyss)

na głębokości około 2500 metrów  
niedaleko wybrzeży Toulonu Francji

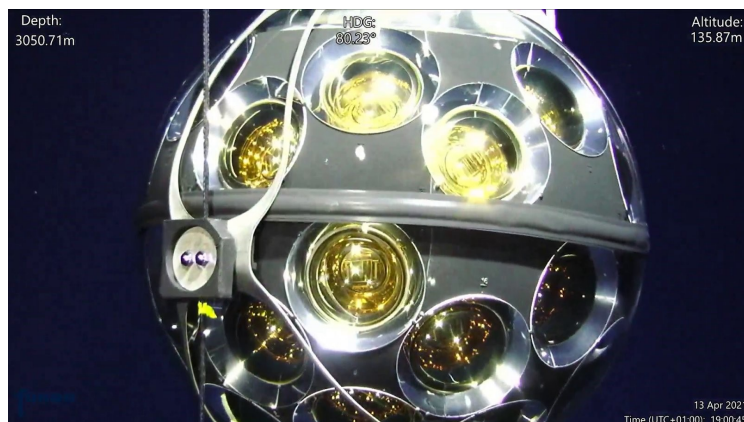
- **ARKA** (Advanced Research in Cosmology and Astrophysics)

na głębokości około 3000 metrów  
w pobliżu Portopalo di Capo Passero na  
Sycylii we Włoszech

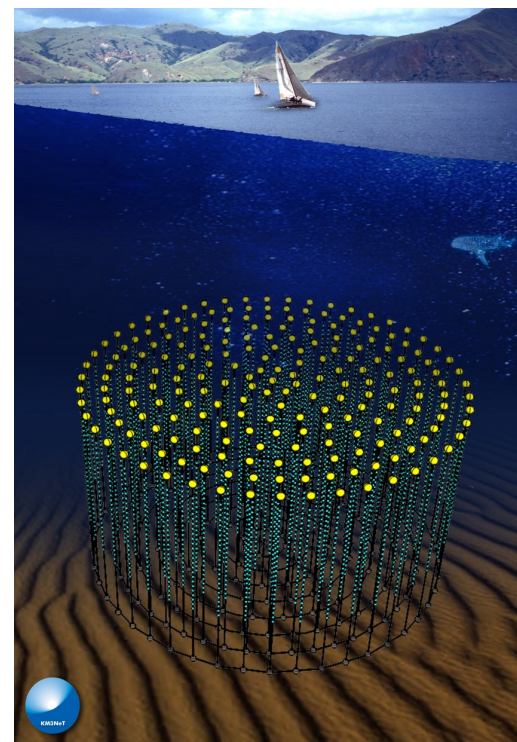


## Moduły optyczne

DOM (Digital Optical Module)  
31 fotopowielaczy



DU (Detection Unit)  
18 DOMów rozmieszczonych wzdłuż  
pionowego kabla

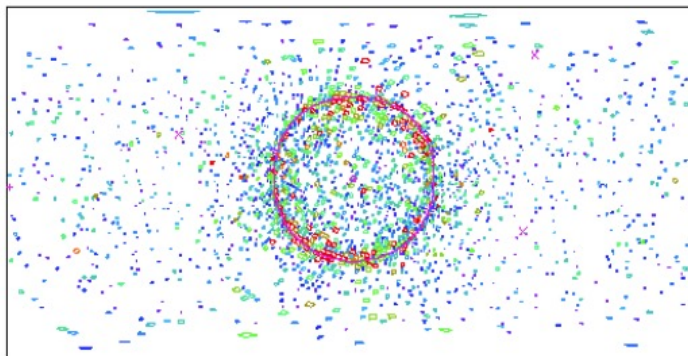




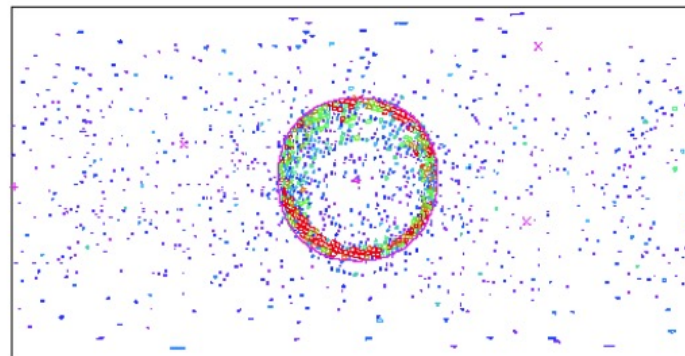
## Promieniowanie Cherektova

Okrąg elektronowy wygląda inaczej niż okrąg mionowy (wyraźniejsze granice)

Electron-like

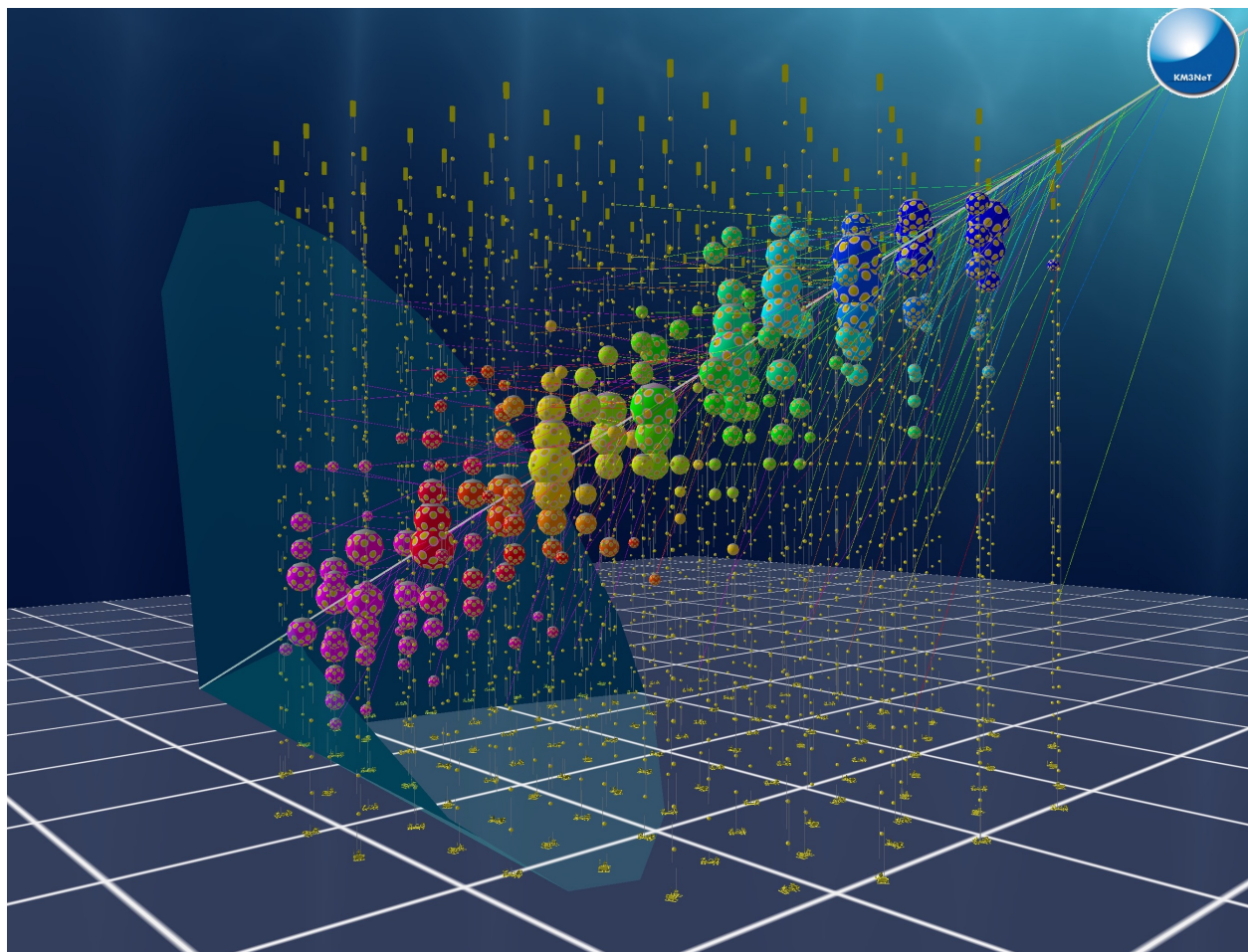


Muon-like

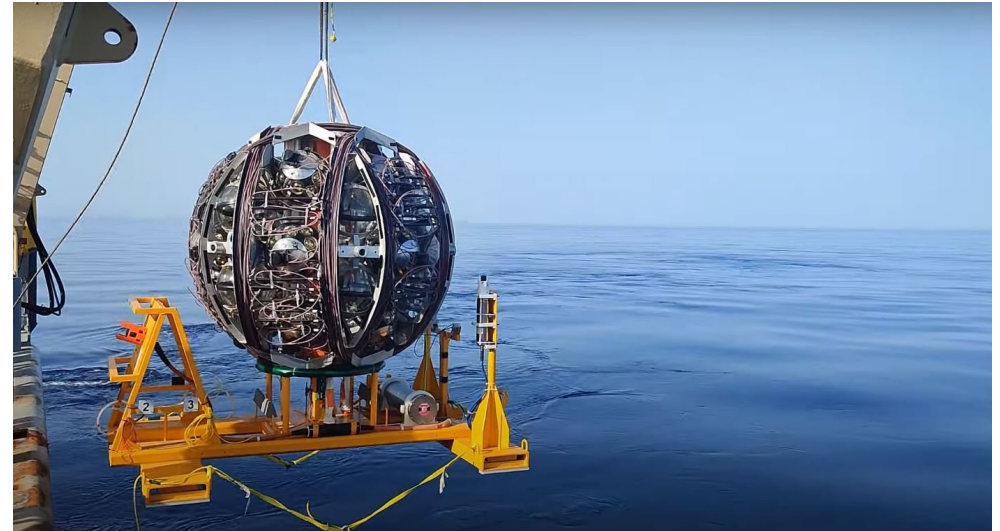
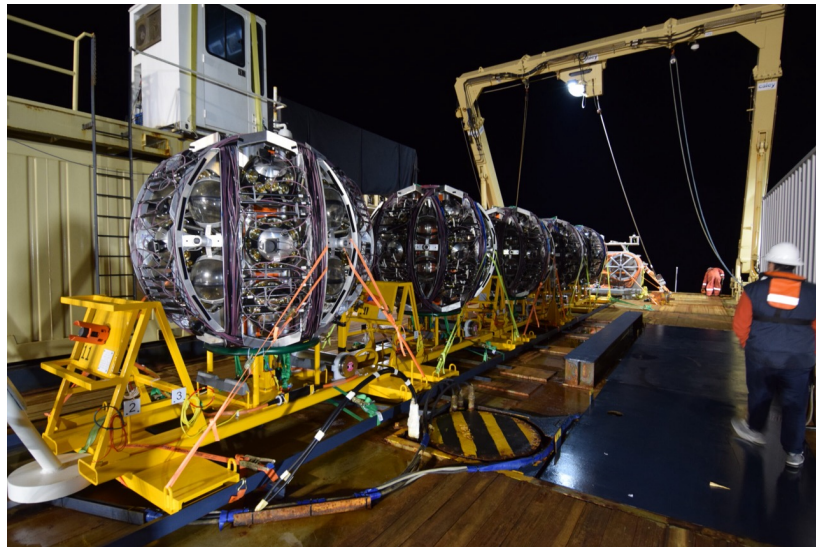




# Rejestracja oddziaływania



## KM3NeT jest w trakcie konstrukcji



## Czy neutrino mogą pomóc w systemach ostrzegania przed trzęsieniami ziemi?

Czy wiemy, że?

- Systemy ostrzegania przed trzęsieniami ziemi opierają się głównie na **danych sejsmicznych** i technologii sztucznej inteligencji do identyfikacji wczesnych sygnałów sejsmicznych
- Istnieje hipoteza mówiąca, że **zmiany oscylacji antyneutrin** (emitowane przez reaktory jądrowe) **przechodzących przez obszar podatny na trzęsienia ziemi mogą być obserwowalne** i mogą one dostarczyć tomografii tego regionu

neutrino jako sondy nadchodzącego trzęsienia ziemi

## Podsumowanie: własności neutrin

- Brak ładunku elektrycznego
- Tylko przez oddziaływania słabe
- Spin  $\frac{1}{2}$
- Neutrino są lewoskrętne, antyneutrino są tylko prawoskrętne
- Istnieją (przynajmniej) trzy aktywne zapachy
- Mają bardzo małą masę

### Otwarte pytania:

- Czy są tylko trzy neutrino?
- Czy istnieje neutrino sterylne?
- Czy neutrino jest własną antycząstką (czyli czy jest cząstką Majorany)?
- Czy są najczęściej występującymi fermionami we wszechświecie?
- Jakie są indywidualne masy neutrin?
- Czy symetria CP jest łamana w sektorze neutrin?
- Czy neutrino ma moment magnetyczny?
- Czy są stabilne?