



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

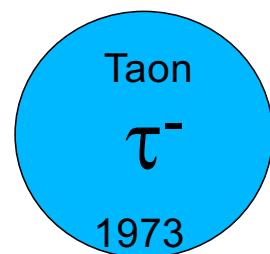
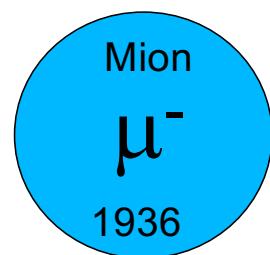
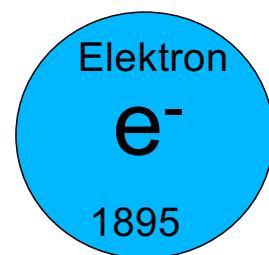
Energia	GeV	Czas	$(\text{GeV}/\hbar)^{-1}$
Pęd	GeV/c	Długość	$(\text{GeV}/\hbar c)^{-1}$
Masa	GeV/c^2	Powierzchnia	$(\text{GeV}/\hbar c)^{-2}$

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

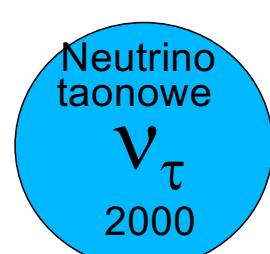
Energia	GeV	Czas	GeV^{-1}
Pęd	GeV	Długość	GeV^{-1}
Masa	GeV	Powierzchnia	GeV^{-2}

Leptony

Znamy sześć leptonów (trzy rodziny)



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



Cięższe leptony rozpadają się do najlżejszych

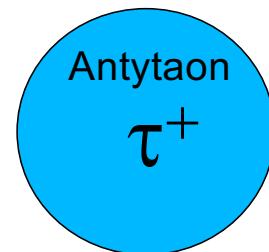
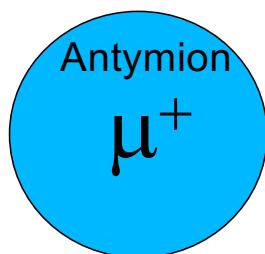
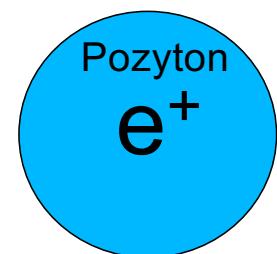
Ujemny ładunek elektryczny

Brak ładunku elektrycznego

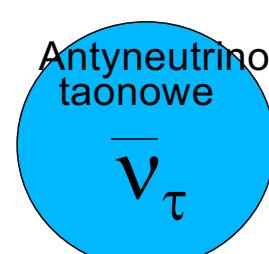
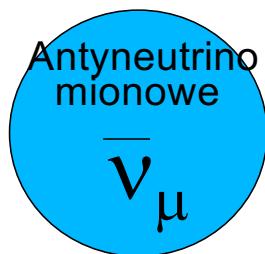
Hierarchia mas i nie wiemy dlaczego!

Antyleptony – antycząstki

Antycząstki mają przeciwny ładunek elektryczny



Dodatni ładunek
elektryczny



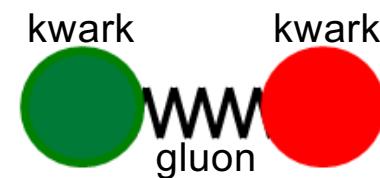
Brak ładunku
elektrycznego

Oddziaływanie

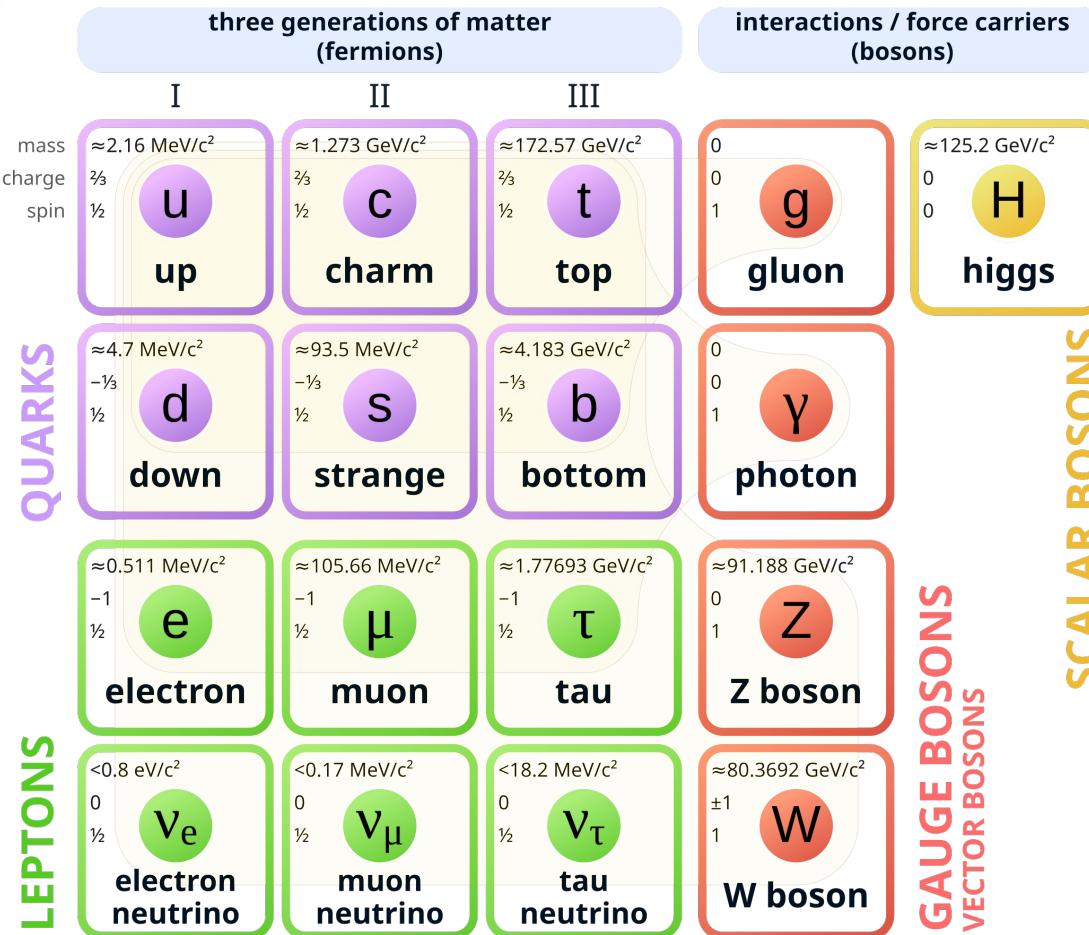
Oddziaływanie są przenoszone przez cząstki (wymiana cząstki)
Cząstki te nazywamy **bozonami pośredniczącymi**

Znamy cztery rodzaje oddziaływań:

1. Elektromagnetyczne – foton γ
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 bronimy

Historia neutrin

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

1950 – Reines i Cowan przygotowują się do detekcji ν (eksperymenty reaktorowe)

Do 1962 tylko ν_e jest znane (nazywane neutrino)

1962 – Schwartz, Steinberger i Lederman przedstawiają ewidencję ν_μ budując pierwszą wiązkę neutrin

2000 odkrycie ν_τ

Dziś mamy wiele pytań, na które nie potrafimy odpowiedzieć

Neutrina rzadko wchodzą w interakcje z materią

- Przekrój czynny na oddziaływanie (z teorii Fermiego):

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

- 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} km ,

co jest znacznie większe niż średnica naszej galaktyki (100 000 lat świetlnych ~ 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

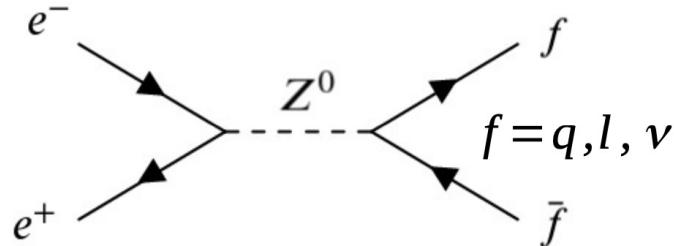
np. w zbiorniku wody o objętości 1 m^3 : $P \sim 10^{-42} \text{ m}^2$

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 trillion trillion
- 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**

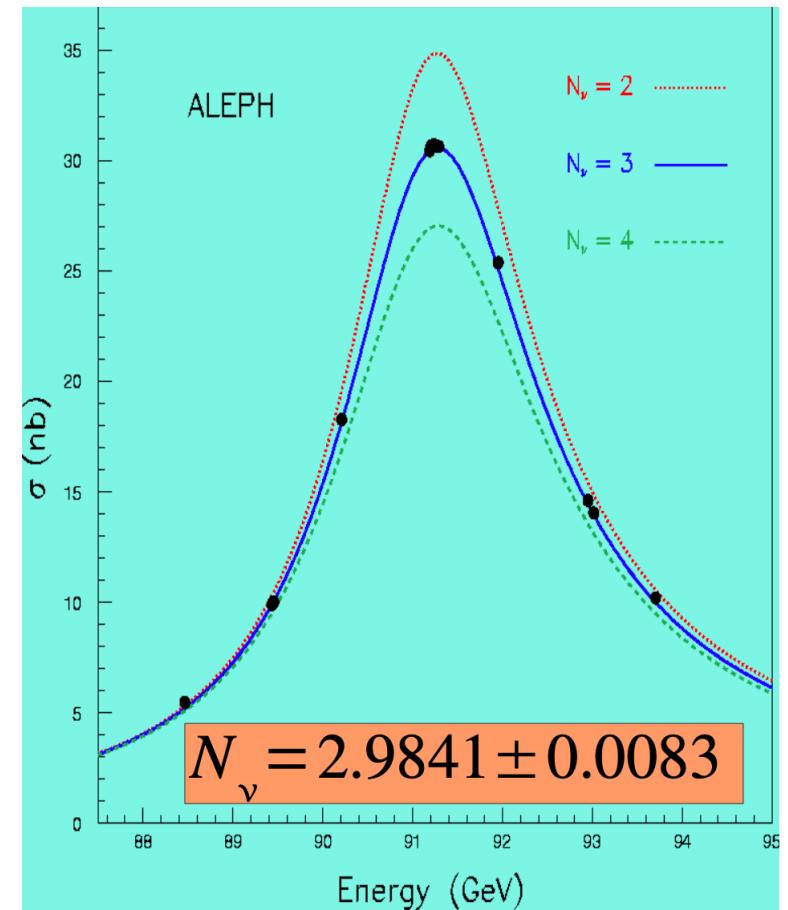
Ille może być neutrin?

Odkrycie bozonu Z^0 pozwoliło na pomiar liczby neutrin 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 neutrina
- Wiemy tylko, że 3 to najmniejsza liczba, żeby opisać dane

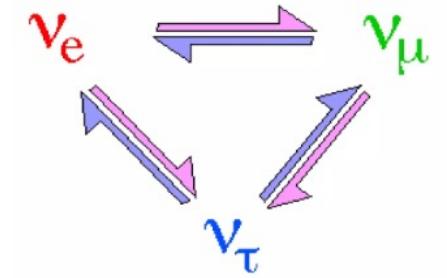


Skrętność i parzystość

- W modelu standardowym przyjmuje się, że neutrina są cząstkami **bezmasowymi opisanymi równaniem Diraca**
- Jeśli tak to ich skrętność powinna być stałą cechą (projekcja spinu cząstki na kierunek jej ruchu):
neutrina Diraca ($L = 1$): ν_L, ν_R powinny mieć odrębne antyneutrina ($L = -1$): $\bar{\nu}_L, \bar{\nu}_R$
- Możliwe także, że neutrina nie mają odrębnych antycząstek i istnieją tylko dwa stany ν_L, ν_R bez liczby leptonowej (neutrina Majorany)
- Neutrina 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 neutrina jest przeciwnie skierowany do jego pędu, a spin antyneutrina jest zgodny z jego pędem.

Mieszanie neutrin

- Jeżeli neutrina mają masę, to powinny się mieszkać 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 $c_{ii} = \cos \theta_{ii}$, and $s_{ii} = \sin \theta_{ii}$

Zmiana zapachu neutrina jest możliwa tylko jeśli masa nie jest zero

Mieszanie neutrin

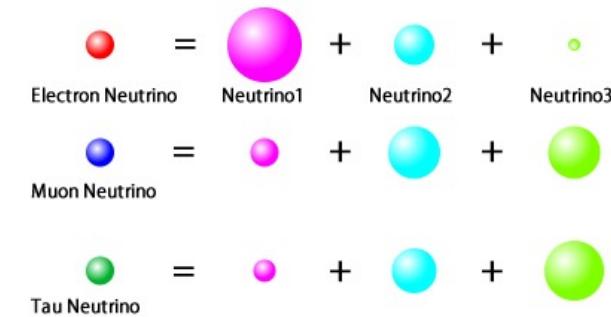
W strumieniu ν_e słonecznych obserwujemy ν_e, ν_μ, ν_τ ($\nu_e \rightarrow a\nu_\mu + b\nu_\tau$)

1998 – odkrycie oscylacji neutrin

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

ν_e m_1
 ν_μ m_2
 ν_τ m_3

Flavor	Mass
Electron Neutrino	 m_1 Neutrino1
Muon Neutrino	 m_2 Neutrino2
Tau Neutrino	 m_3 Neutrino3



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

Oscylacje neutrin – sytuacja z dwoma stanami

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

$$m_1(\textcolor{red}{t}) = m_1(0)e^{-iE_1\textcolor{red}{t}}$$
$$m_2(\textcolor{red}{t}) = m_2(0)e^{-iE_2\textcolor{red}{t}}$$

- Relacja m_1/m_2 zmienia się w czasie lotu

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

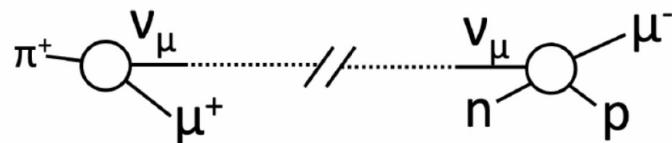
- Prawdopodobieństwo przejścia ν_1 w ν_2

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

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 θ
- Oscylacje są możliwe jeśli przynajmniej jeden ze stanów ma niezerową masę

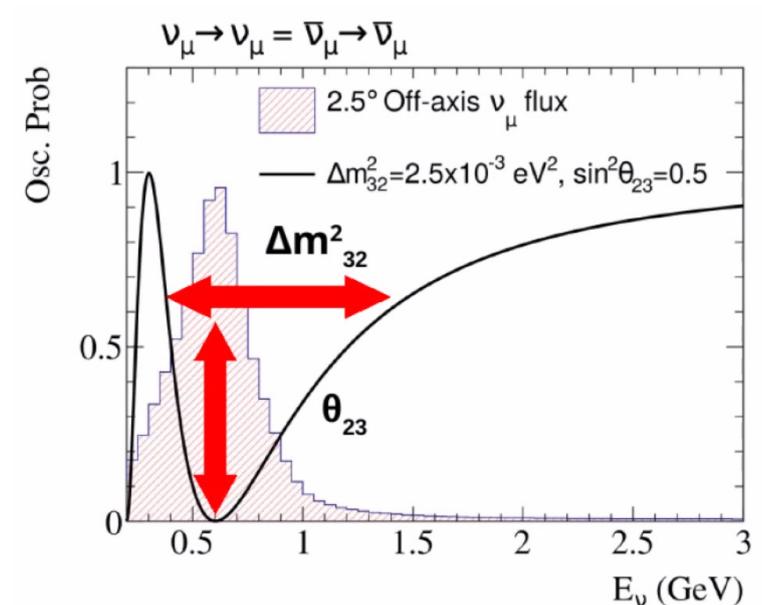
Prawdopodobieństwo „znikania”



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

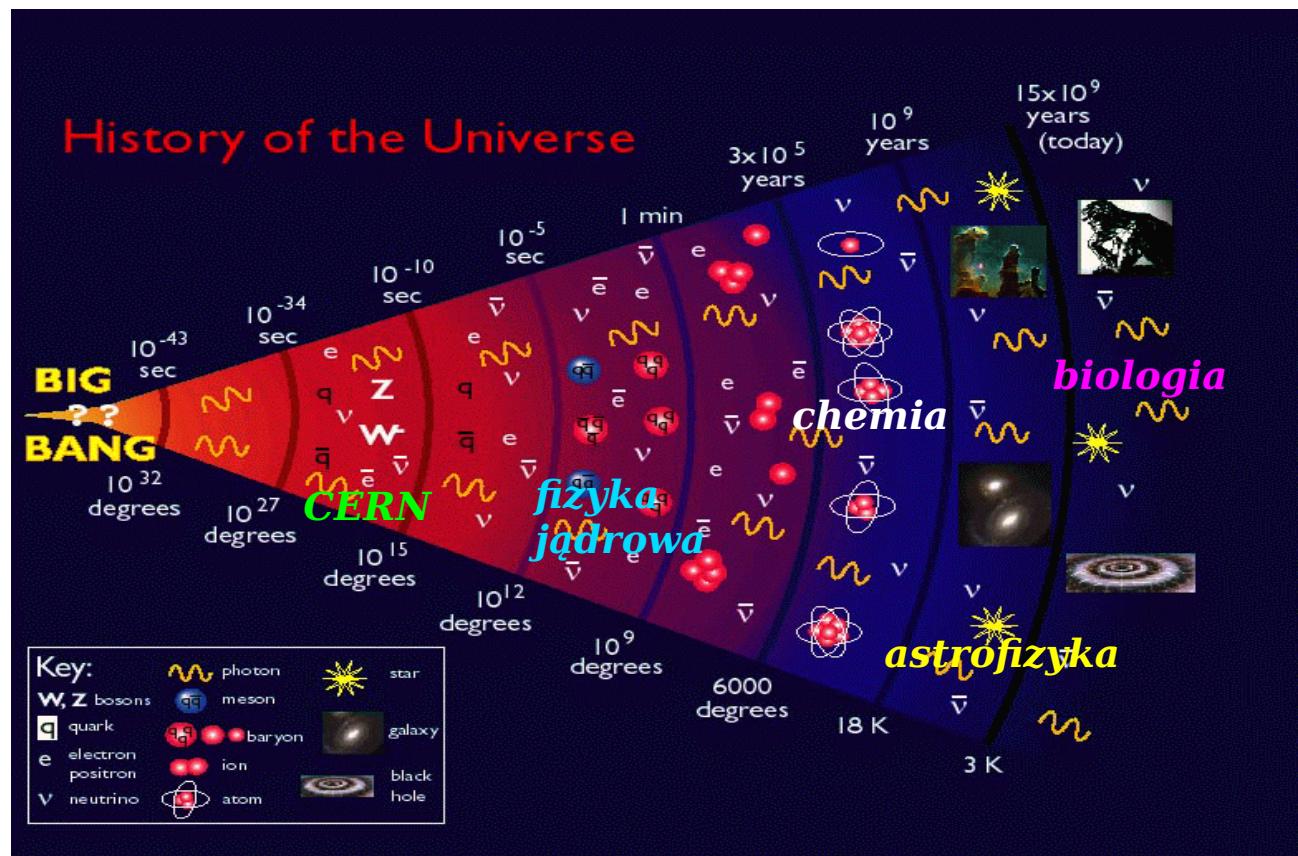
$\sin^2 2\theta_{23}$ kąt mieszania zmienia amplitudę oscylacji
 Δm_{32}^2 kwadrat różnicy mas zmieniaczęstość oscylacji

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 nieskończonym małym obszarze przestrzeni energia zamieniła się w **równe ilości materii i antymaterii**

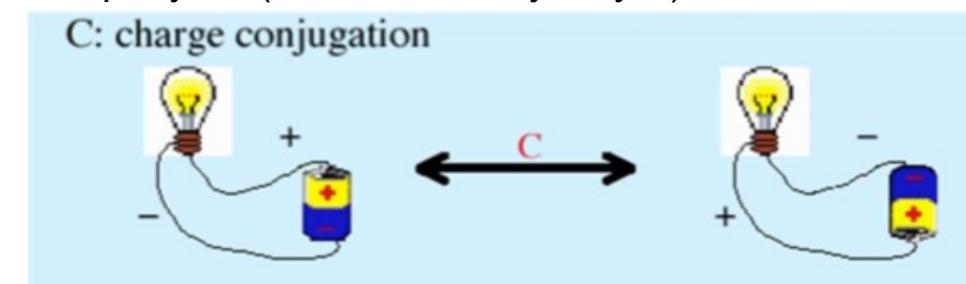


Gdzie podziała się antymateria?

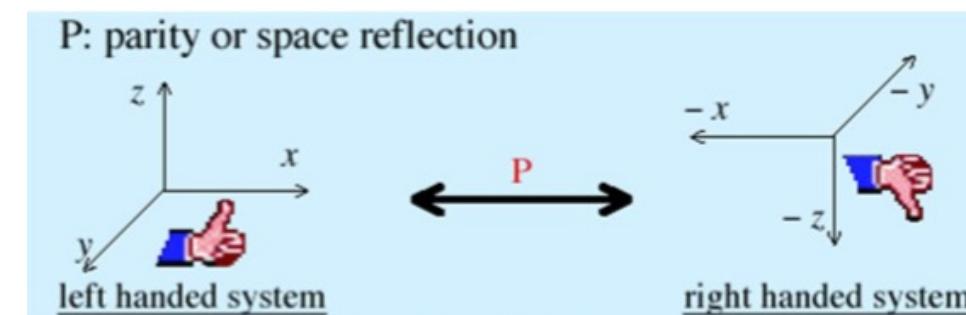
- W miarę jak wszechświat rozszerzał się i oziębiał zmieniały się jego składniki. W ułamku sekundy cała antymateria znikła, zamieniając się w energię promieniowania (fotony) w procesie anihilacji z materią. Pozostała tylko niewielka nadwyżka materii (kilka protonów na 10 miliardów anihilacji).
- Z tej 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 oddziaływanie 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 $(x,y,z) \rightarrow (-x,-y,-z)$

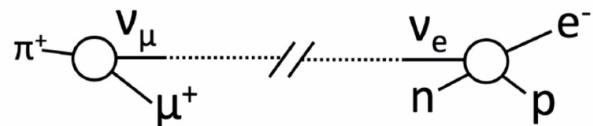


CP – złożenie C i P

Łamanie symetrii CP w modelu standardowym

- Łamanie CP potwierdzono w rozpadach mezonów „ciężkich” K, B, B_s , D
- Wielkość tego łamania symetrii CP jest miliard razy za mała, żeby wyjaśnić ilość pozostałej we wszechświecie materii
- Przy tak małym naruszaniu symetrii materia – antimateria 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?

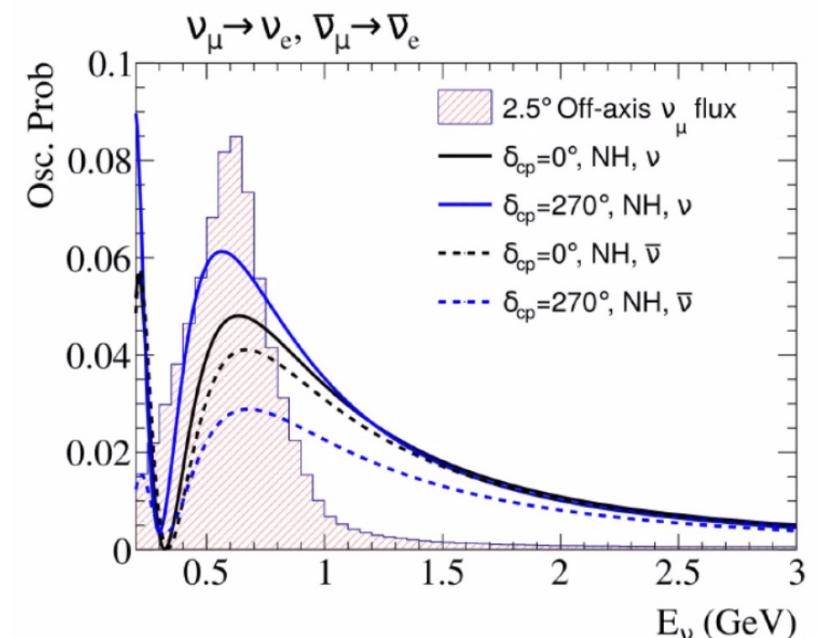
Prawdopodobieństwo „pojawiania się”



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

- + δ_{CP} człon związany z łamaniem CP
- + δ_{CP} człon związany z zachowaniem CP
- + inne człony

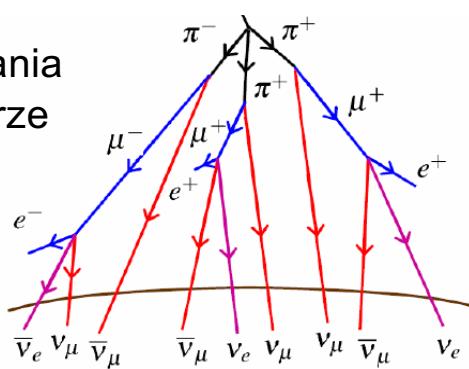
$\delta_{CP} = \frac{\pi}{2}$ to mniej $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$, więcej $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$
 $\delta_{CP} = -\frac{\pi}{2}$ to więcej $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$, mniej $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$



Źródła neutrin

Naturalne (atmosferyczne, kosmiczne):

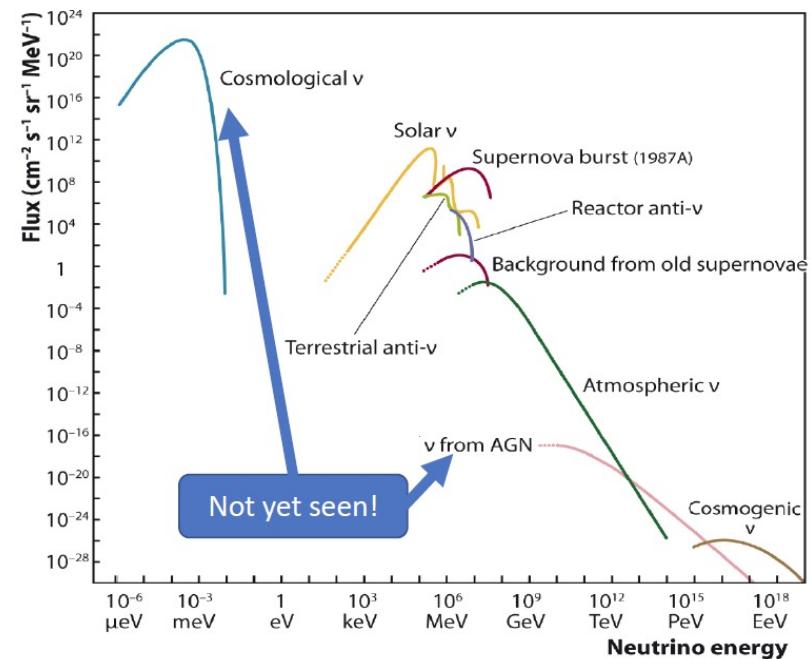
- Big Bang
- Słońce
- oddziaływanie w atmosferze



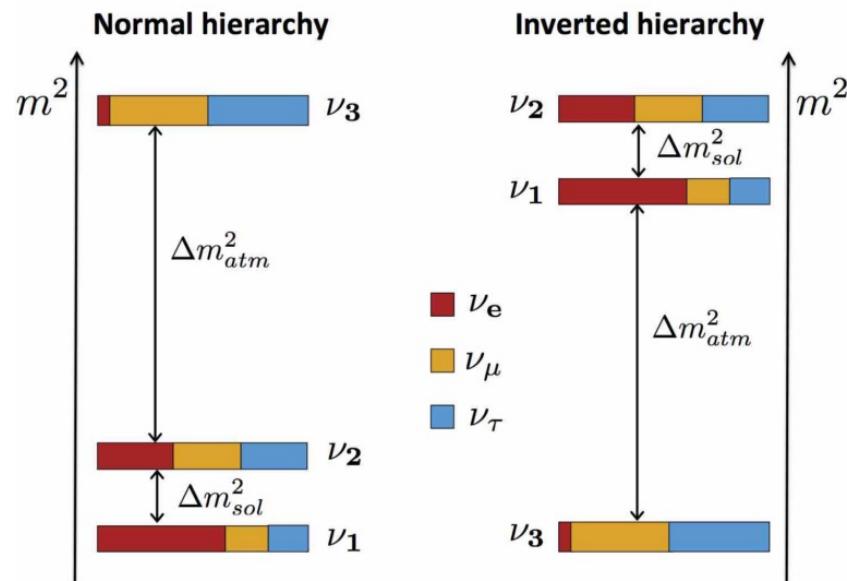
- eksplozje gwiazd (Supernowe)
- Blazary
- odległe galaktyki ($E > \text{PeV}$)
- promieniowanie kosmiczne

Sztuczne – stworzone przez człowieka:

- reaktory jądrowe
- akceleratory cząstek



Hierachia mas



Obecnie jedno z kluczowych pytań w sektorze neutrin

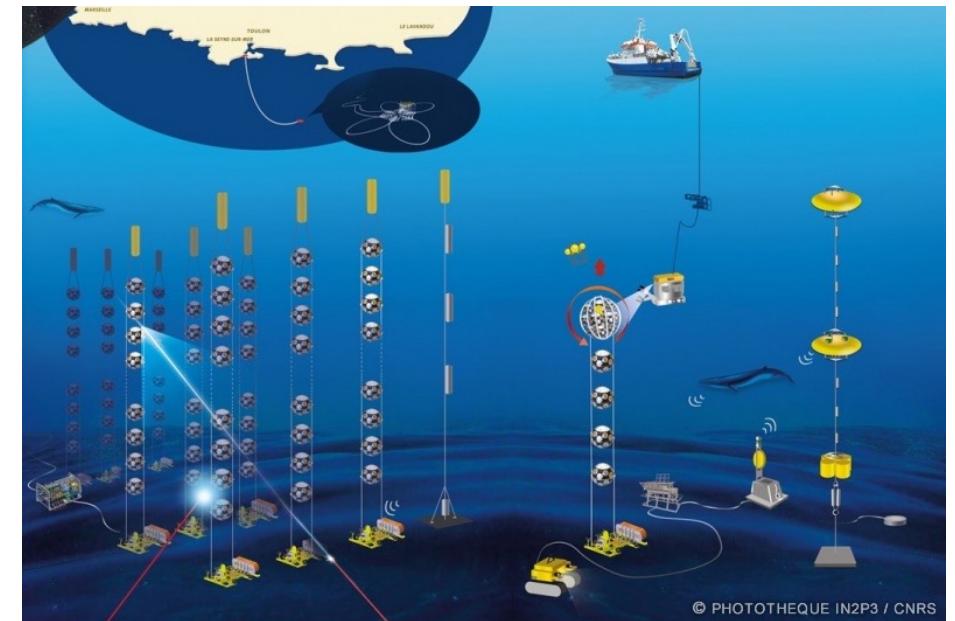
KM3NeT – Cubic Kilometre Neutrino Telescope



<https://www.km3net.org/>

W głębinach wód Morza Śródziemnego

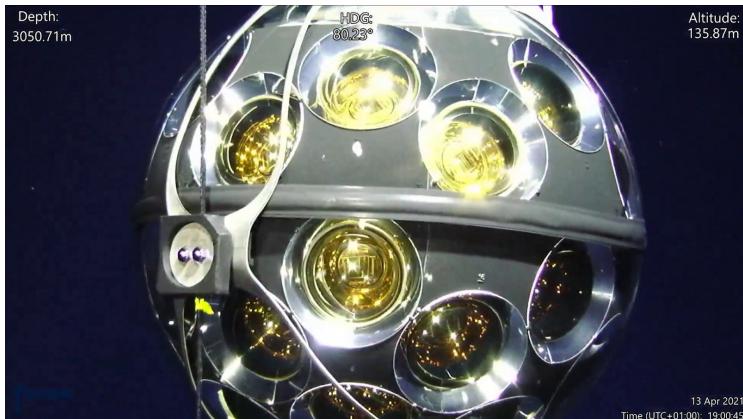
- ORCA (Oscillation Research with Cosmics in the Abyss)
na głębokości około 2500 metrów
niedaleko wybrzeży Toulonu Francji
- ARKA (Advanced Research in Cosmology and Astrophysics)
na głębokości około 3000 metrów
w pobliżu Portopalo di Capo Passero na Sycylii we Włoszech





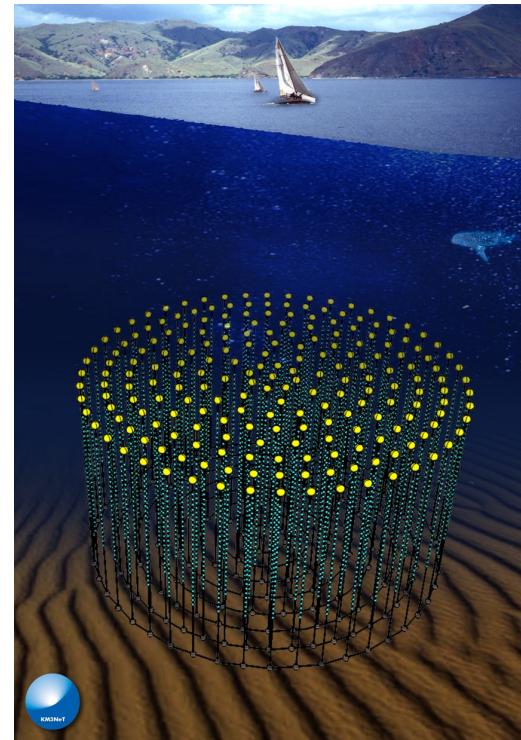
Moduły optyczne

DOM (Digital Optical Module)
31 fotopowielaczy



DU (Detection Unit)

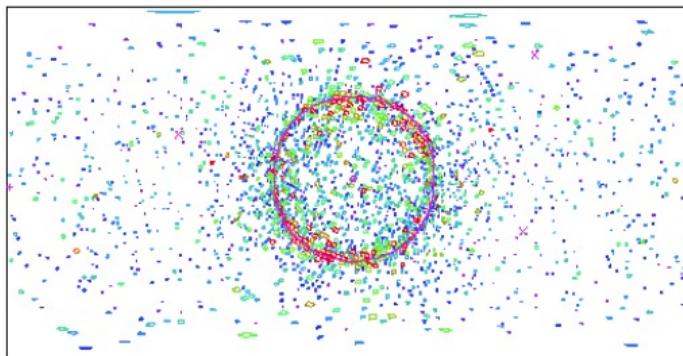
18 DOMów rozmieszczonych wzdłuż pionowego kabla



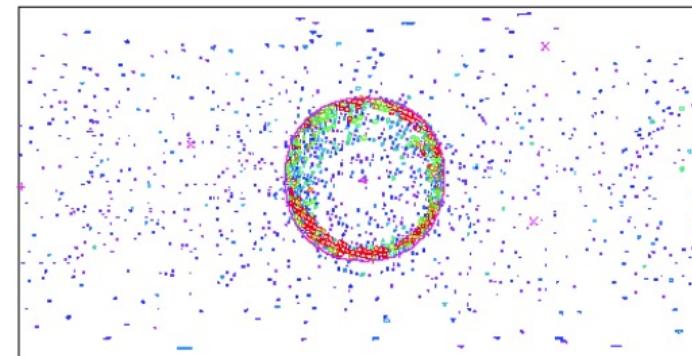
Promieniowanie Cherektova

Okrąg elektronowy wygląda inaczej niż okrąg mionowy (wyraźniejsze granice)

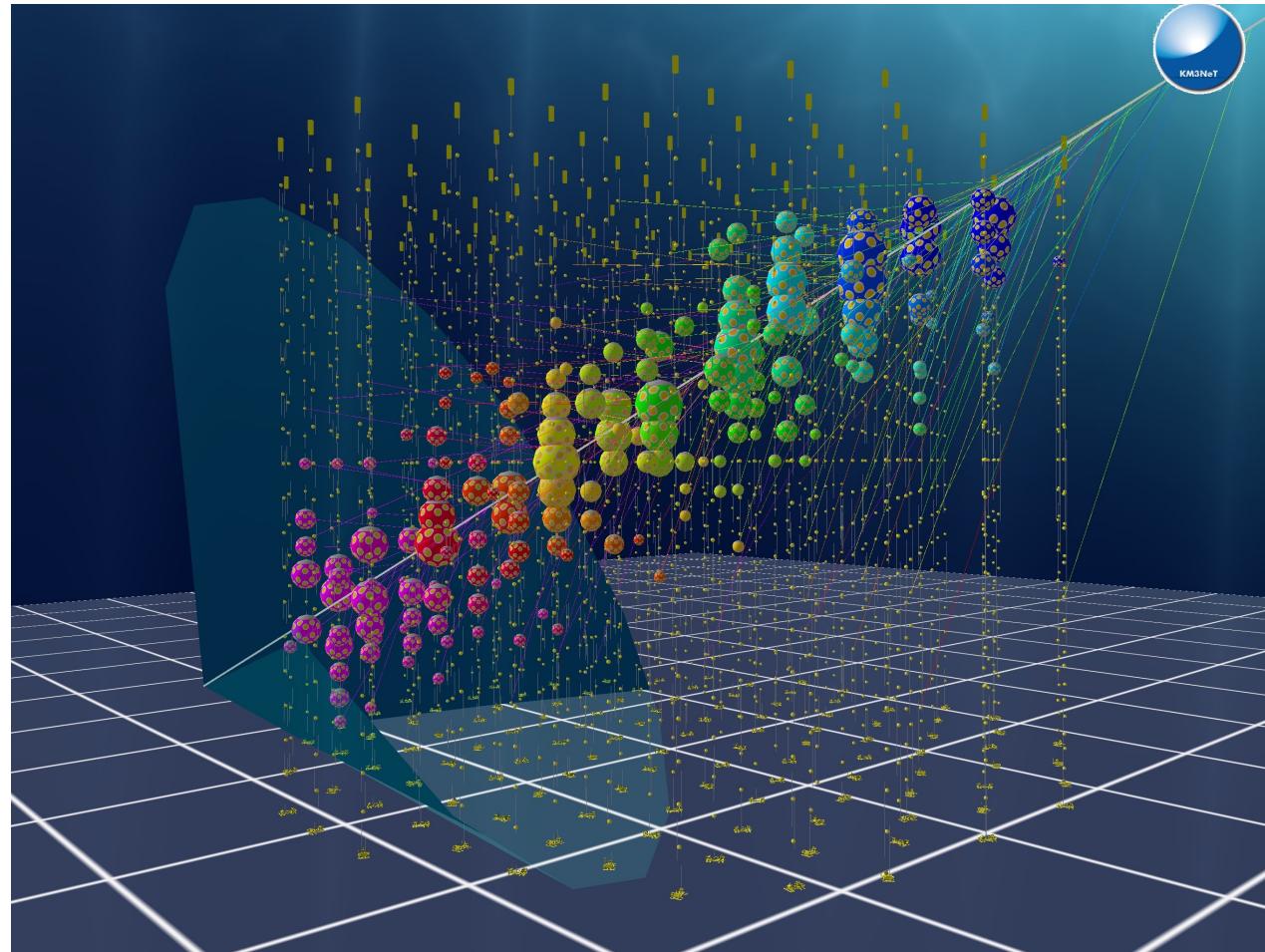
Electron-like



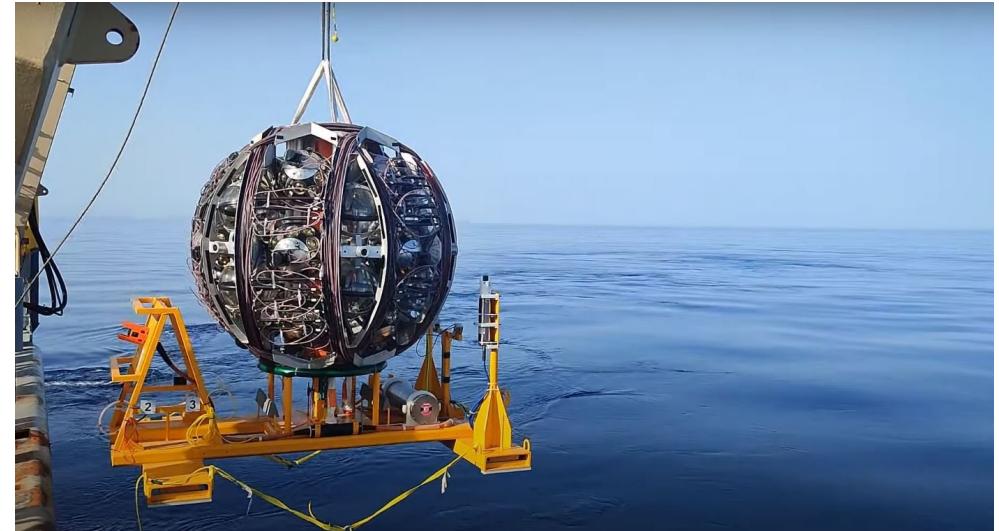
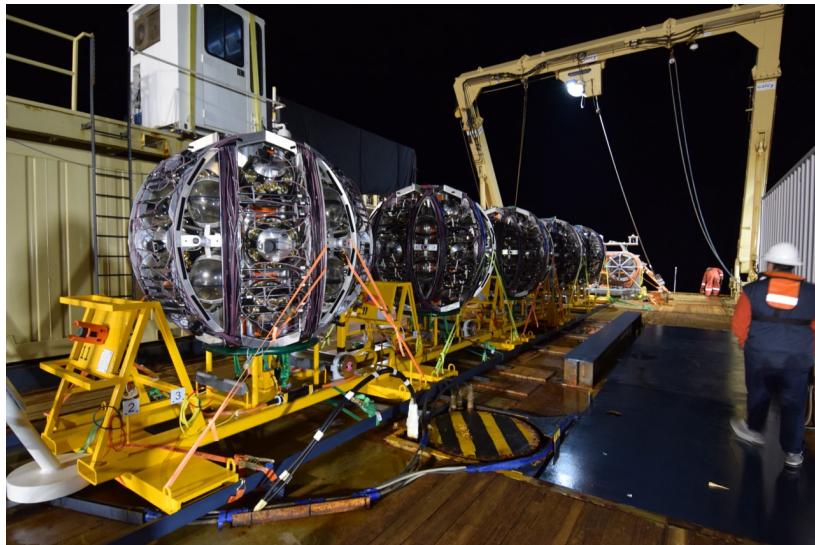
Muon-like



Rejestracja oddziaływania



KM3NeT jest w trakcie konstrukcji



Czy neutrina 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 obserwownalne i mogą one dostarczyć tomografii tego regionu](#)

[neutrina jako sondy nadchodzącego trzęsienia ziemi](#)

Podsumowanie: własności neutrin

- Brak ładunku elektrycznego
- Tylko przez oddziaływanie 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 wystającymi fermionami we wszechświecie?
- Jakie są indywidualne masy neutrin?
- Czy symetria CP jest łamana w sektorze neutrin?
- Czy neutrino ma moment magnetyczny?
- Czy są stabilne?