Neutrina

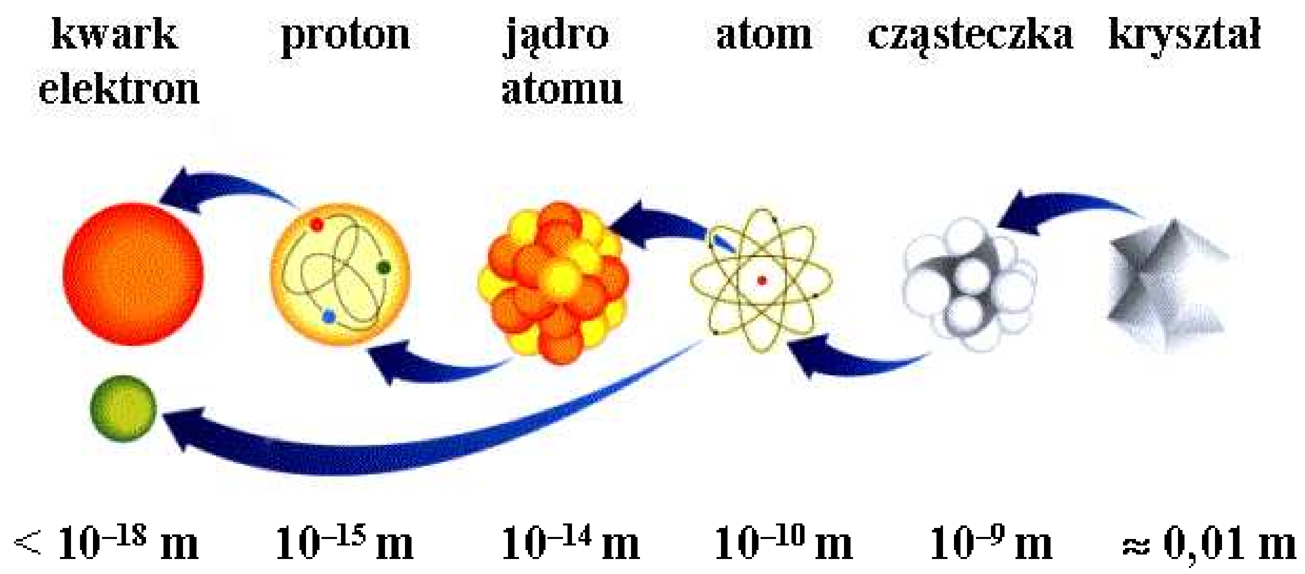
Fizyka I (B+C)

Wykład XXIV:

- Budowa materii - przypomnienie
- Deficyt neutrin słonecznych
- Zagadka neutrin atmosferycznych z SuperKamiokande
- Model “bryłowy” neutrin
- Oscylacje neutrin
- Wyniki SNO i KamLand

Budowa materii

Świat “codzienny” zbudowany jest z 3 “cegiełek”: elektronu, oraz kwarków u i d.



Budowa materii

Wyniki badań fizyki cząstek ⇒ Model Standardowy

⇒ 12 fundamentalnych “cegiełek” materii - fermionów (cząstek o spinie 1/2)

	leptony		kwarki	
pokolenie 1	e	ν_e	d	u
	elektron	*neutrino el.*	*down*	*up*
pokolenie 2	μ	ν_μ	s	c
	mion	*neutrino mionowe*	*strange*	*charm*
pokolenie 3	τ	ν_τ	b	t
	taon	*neutrino taonowe*	*beauty (bottom)*	*top (truth)*
ładunek [e]	-1	0	$-1/3$	$+2/3$

+ anty-fermiony (kolejnych 12)

Neutrina

Neutrino elektronowe

Zaproponowane przez Pauliego do wyjaśnienia rozpadu β:

np.: $$^{60}_{28}Co \rightarrow \, ^{60}_{29}Ni^\star + e^- + \bar{\nu}_e$$

na poziomie cząstek:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

Zakładane właściwości:

- bardzo słabo oddziałuje z materią
- ma zaniedbywalną masę

Do niedawna zakładaliśmy, że neutrino ma zerową masę...

Ostatnie wyniki pomiarów widma elektronów z rozpadu trytu (Mainz, 2001):

$$T \rightarrow \, ^3He + e^- + \bar{\nu}_e$$

⇒ ograniczenie na masę ν_e:

$$m_{\nu_e} < 2.2\, eV \;\; (95\%\, CL)$$
$$< 4.3 \cdot 10^{-6}\, m_e$$

Ograniczenia astrofizyczne - rejestracja neutrin z SN 1987A:

$$m_{\nu_e} < 20\, eV$$

Neutrina

Okazuje się, że każdy lepton ma “swoje” neutrino.
Liczbę “pokoleń” neutrin zmierzono w akceleratorze LEP (“niewidzialne” rozpady Z°)

$$e^+ e^- \rightarrow Z^\circ \rightarrow \nu_X \bar{\nu}_X$$

$$\Rightarrow \quad N_\nu = 2.994 \pm 0.012$$

Przy założeniu, że neutrina są lekkie ($m_\nu \ll m_Z$)...

Doświadczalne ograniczenia na masy pozostałych neutrin

- neutrino mionowe ν_μ

$$m_{\nu_\mu} < 170\ keV \approx 0.0016\ m_\mu$$

- neutrino taonowe ν_τ

$$m_{\nu_\tau} < 15.5\ MeV \approx 0.01\ m_\tau$$

Neutrina słoneczne

Produkcja neutrin

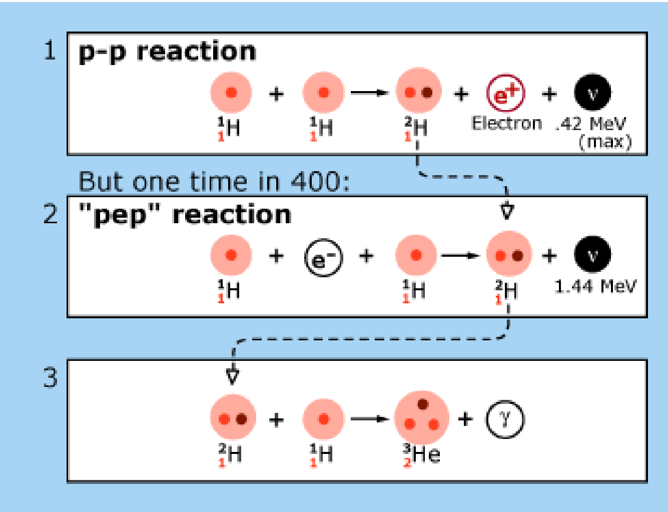
Słońce jest nie tylko źródłem promieniowania elektromagnetycznego, ale też niezwykle intensywnym źródłem neutrin elektronowych.

Ogromna większość neutrin pochodzi z reakcji **p–p**:

$$p + p \rightarrow D + e^+ + \nu_e \; (E_\nu \leq 0.42\ MeV)$$

jednak wyższe energie uzyskują neutrina z reakcji **“pep”**:

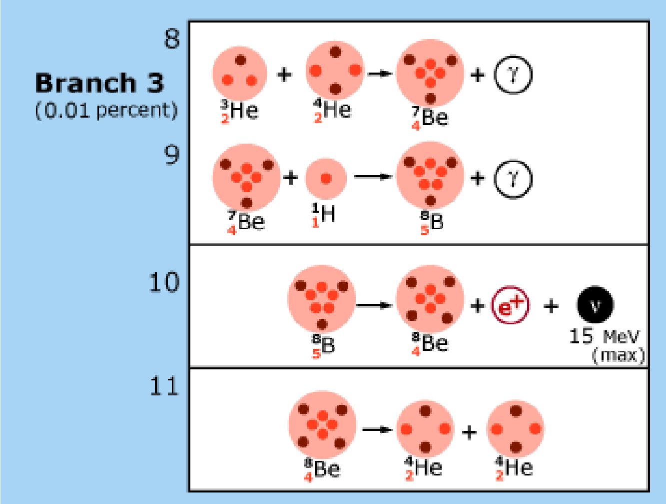
$$p + e^- + p \rightarrow D + \nu_e \; (E_\nu \approx 1.44\ MeV)$$



Neutrina słoneczne

Produkcja neutrin

Dalsze reakcje syntezy ^3He, ^4He, ^7Be i ^7Li prowadzą do emisji dodatkowych neutrin.



Źródłem wysokoenergetycznych neutrin jest przemiana ^8B

$$^8_5B \rightarrow {}^8_4Be + e^+ + \nu_e$$

w której energia emitowanych neutrin dochodzi do 15 MeV

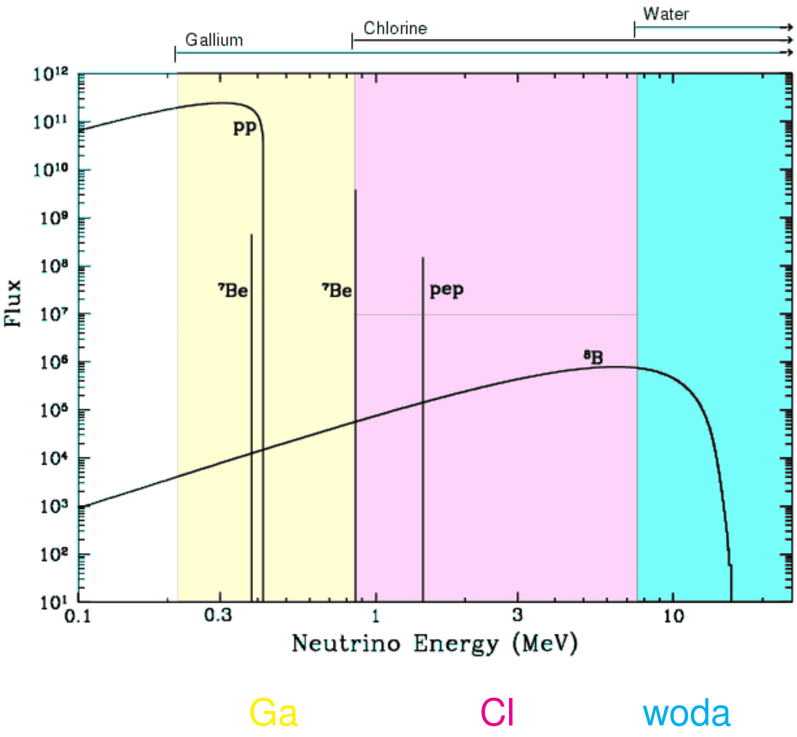
Tylko te neutrina mogą być mierzone w detektorach cząstek elementarnych.

Np. w Super-Kamiokande mierzymy neutrina o $E_\nu > 5$–7 MeV...

Neutrina słoneczne

Widmo energii

Widmo energii neutrin elektronowych produkowanych w reakcjach jądrowych na słońcu $\Rightarrow$



Strumień neutrin o energiach poniżej kilku MeV może być zmierzony metodami radiochemicznymi: mierzymy produkcję powstających izotopów:

$$\nu_e + Cl \rightarrow Ar + e^-$$

(eksperyment Homestake)

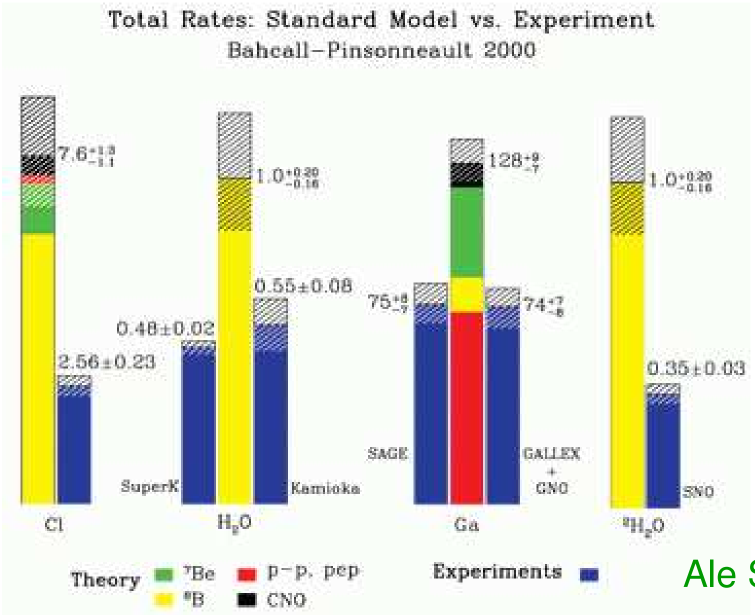
$$\nu_e + Ga \rightarrow Gr + e^-$$

(SAGE, GALLEX, GNO)

Tylko neutrina elektronowe !

Neutrina słoneczne

Deficyt neutrin słonecznych



Wszystkie przeprowadzone eksperymenty wykazały, że dociera do nas zbyt mało neutrin !

Aby wytłumaczyć wyniki pomiarów trzebaby założyć, że:

- reakcja ${}^{8}_{5}B \rightarrow {}^{8}_{4}Be + e^{+} + \nu_e$ zachodzi 2 $\times$ rzadziej
- reakcja ${}^{7}_{4}Be + e^{-} \rightarrow {}^{7}_{3}Li + \nu_e$ wogóle nie zachodzi !...

Ale Słońce świeciłoby wtedy zupełnie inaczej!

Przez ponad 35 lat było to zagadką...

Neutrina atmosferyczne

Promieniowanie kosmiczne

Przestrzeń kosmiczna wypełniona jest cząstkami o energiach dochodzących do 10^{12} GeV (10^{21} eV).

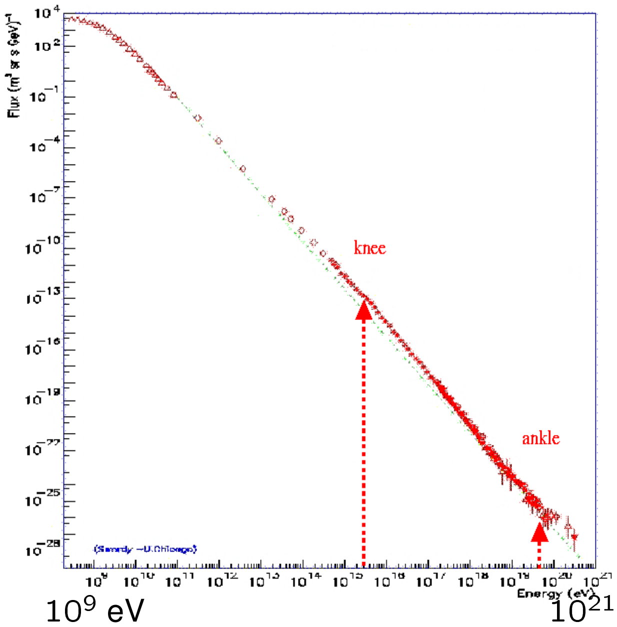
⇒ promieniowanie kosmiczne

poza atmosferą ziemską ⇒ "pierwotne"

Skład "pierwotnego" promieniowania kosmicznego (pomijając neutrina):

- protony (jądra H) $\sim$ 86%
- cząstki α (jądra He) $\sim$ 13%
- jądra cięższych pierwiastków $\sim$ 1%
- neutrony, elektrony, fotony $\ll$ 1%

$10^4 \frac{1}{m^2 sr\ s\ GeV}$



10^9 eV 10^{21} eV

1 GeV 10^{12} GeV

Neutrina atmosferyczne

Produkcja

Promieniowanie kosmiczne "pierwotne" oddziałuje w atmosferze produkując liczne cząstki wtórne, w większości piony $\pi^{\pm}$.

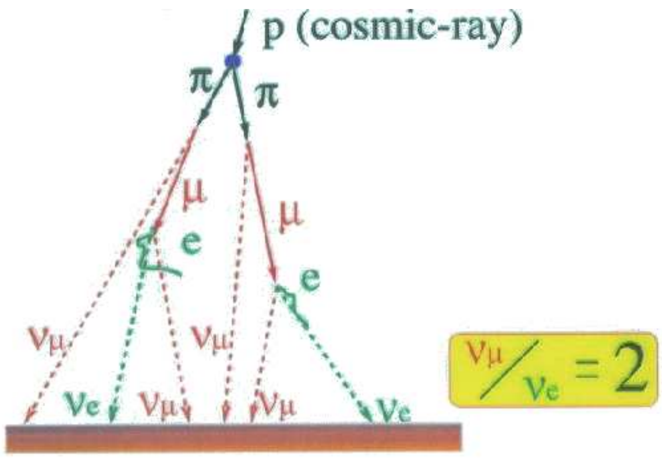
W wyniku rozpadów:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$
$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e$$

(podobnie dla π^-/μ^-)

produkowanych jest dwukrotnie większa liczba neutrin (i antyneutrin) mionowych niż elektronowych:

$$N_{\nu_\mu} = 2 \cdot N_{\nu_e}$$



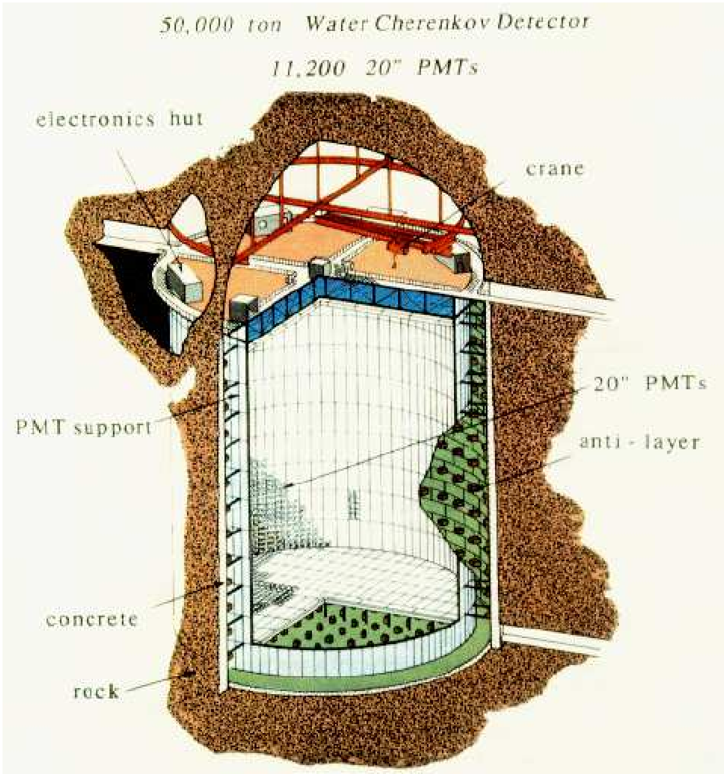
Neutrina atmosferyczne

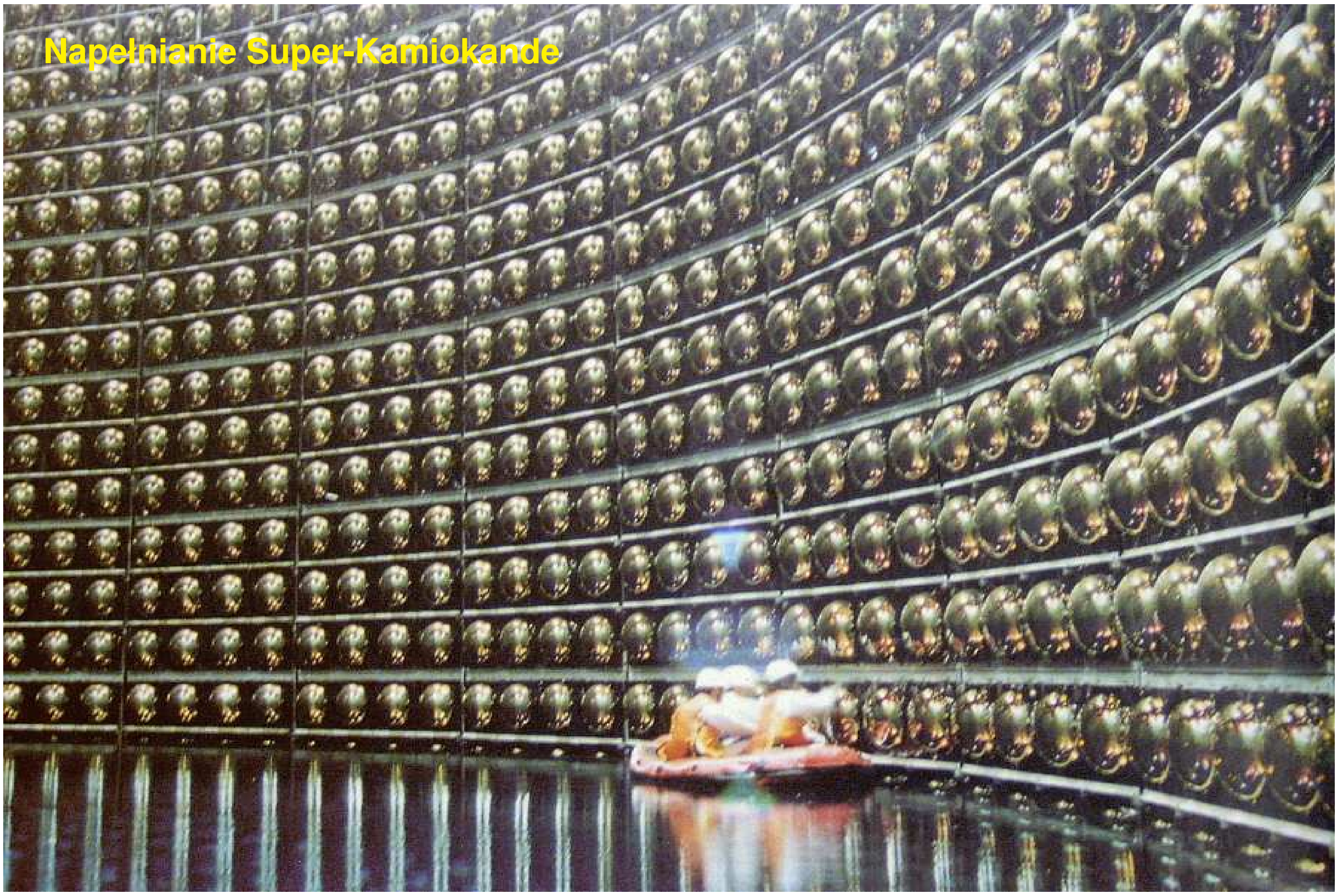
Eksperyment Super-Kamiokande

Japonia, w starej kopalni, 1 km pod górą Kamioka, komora o wysokości 40 m i średnicy 40 m, wypełniona wodą

11'000 fotopowielaczy (50 cm średnicy!) rejestruje przechodzące cząstki

rejestrowane jest **promieniowanie Czerenkowa** cząstek poruszających się z prędkością większą od prędkości światła (w wodzie)



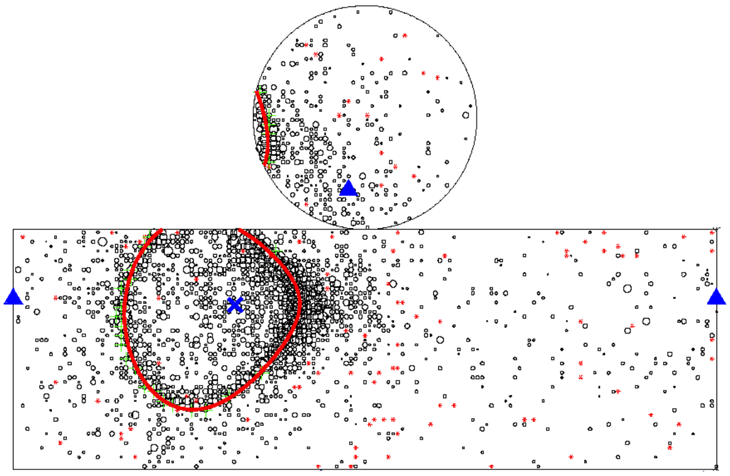


Super-Kamiokande

Neutrino elektronowe

Przypadek $\nu_e\, n \rightarrow e^- p$

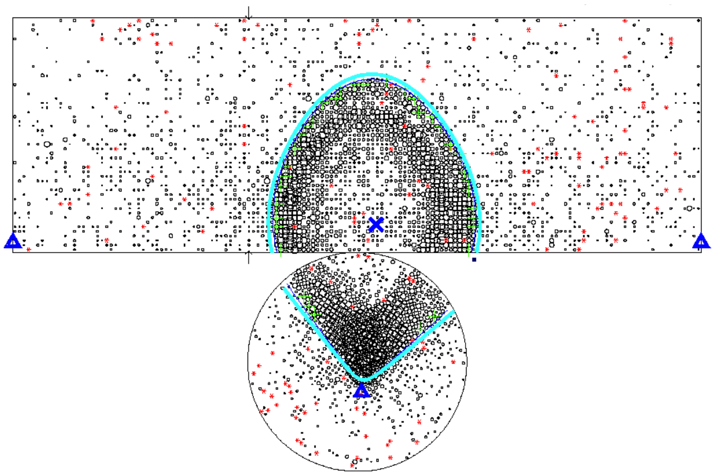
Krótki zasięg elektronu - “cienki” pierścień



Neutrino mionowe

Przypadek $\nu_\mu\, n \rightarrow \mu^- p$

Długa droga w wodzie - “gruby” pierścień.

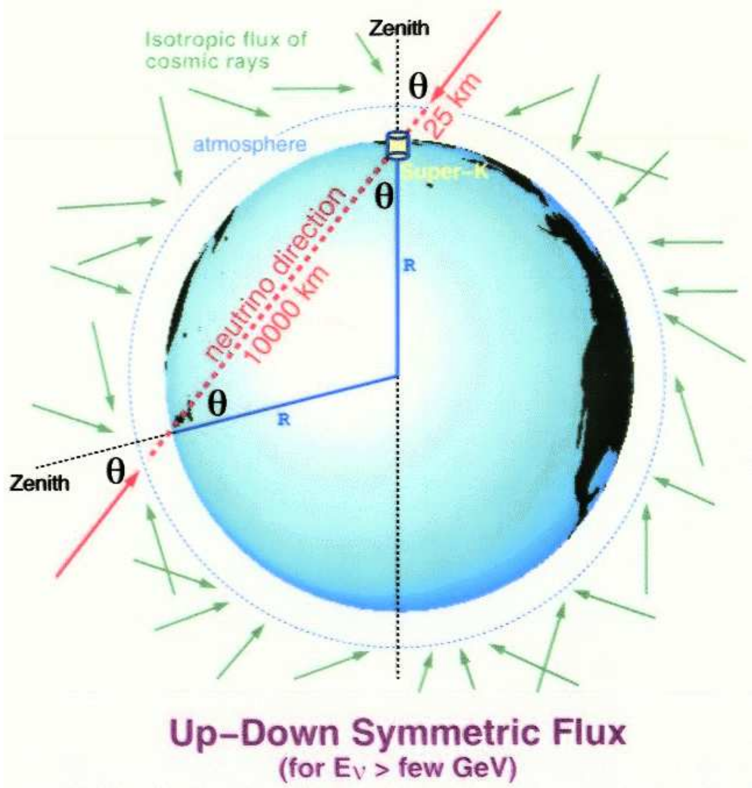


Neutrina atmosferyczne

Rozkład kątowy

Pierwotne promieniowanie kosmiczne jest izotropowe.

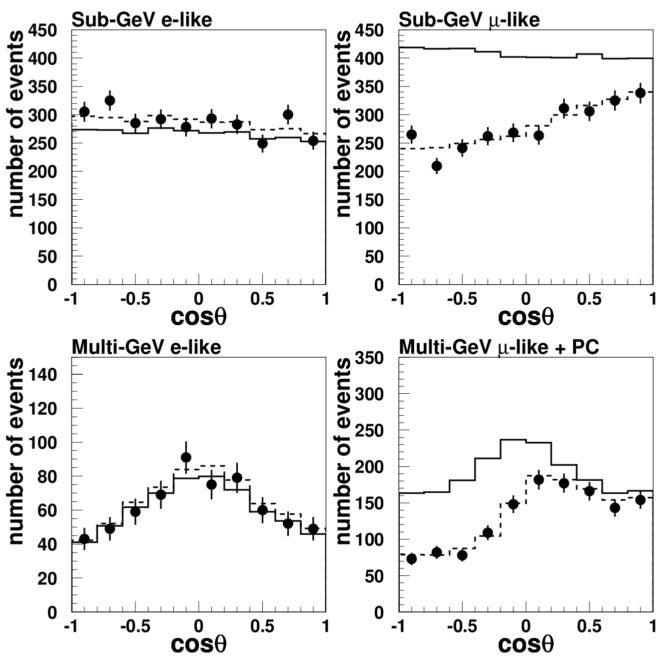
Ponieważ neutrina praktycznie nie oddziałują z Ziemią, strumienie neutrin "do dołu" i "do góry" powinny być sobie równe.



Neutrina atmosferyczne

Wyniki

Zależność liczby obserwowanych przypadków elektronowych i mionowych od kierunku



Tyle samo neutrin elektronowych do dołu ($\cos\theta > 0$) i do góry ($\cos\theta < 0$).

Neutrin mionowych mniej niż oczekujemy!

$$\left(\frac{N_\mu}{N_e}\right)_{obs} = 0.65 \pm 0.05 \cdot \left(\frac{N_\mu}{N_e}\right)_{theory}$$

Wyraźnie za mało ν_μ lecących od dołu !

$$\frac{N_\mu^{up} - N_\mu^{down}}{N_\mu^{up} + N_\mu^{down}} = -0.31 \pm 0.04$$

Czy neutrina mionowe mogą "znikać" przechodząc przez Ziemię ?

Oscylacje

Jeśli założymy, że neutrina są bezmasowe,
to neutrina elektronowe, mionowe i taonowe różnią się tylko liczbą leptonową.

Produkcja i oddziaływanie neutrina związane jest z oddziaływaniem
(w szczególności z rozpadem) lub z produkcją danego typu leptonu.

Do niedawna uważaliśmy, że liczba leptonowa jest ściśle zachowana.

Aby wytłumaczyć "znikanie" neutrin musimy jednak dopuścić,
że neutrina mogą "przemieniać się" jedno w drugie. (łamanie liczby leptonowej)

$$\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$$

Zmiana "leptonowości" neutrina jest bardzo powolna i dla tego zachodzi tylko
na dużych odległościach (średnica Ziemi, odległość od Słońca)

Po pewnym czasie neutrino wraca do "pierwotnego" stanu: **oscylacje neutrin**

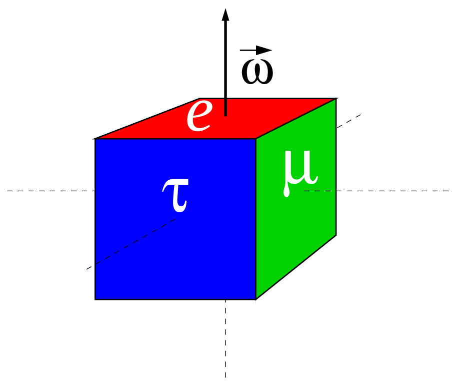
Model

Pełne wyjaśnienie zjawiska oscylacji wymaga stosowania mechaniki kwantowej...
Można jednak zrozumieć to zjawisko posługując się prostym modelem... bryły sztywnej

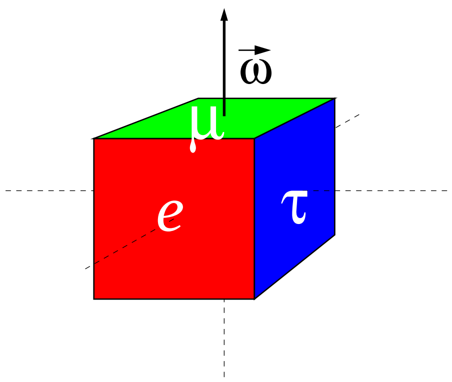
Wyobraźmy sobie, że neutrino to... wirujący kolorowy sześcian

A typ neutrina wynika z koloru ściany przez którą przechodzi oś obrotu (wektor $\vec{\omega}$):

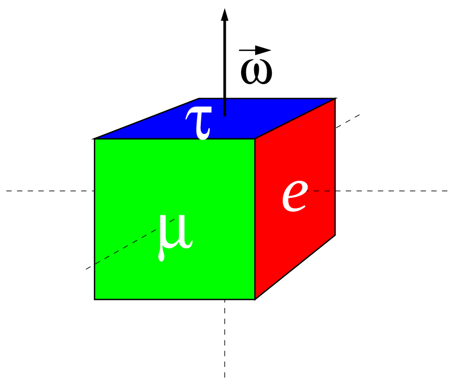
neutrino elektronowe



neutrino mionowe



neutrino taonowe

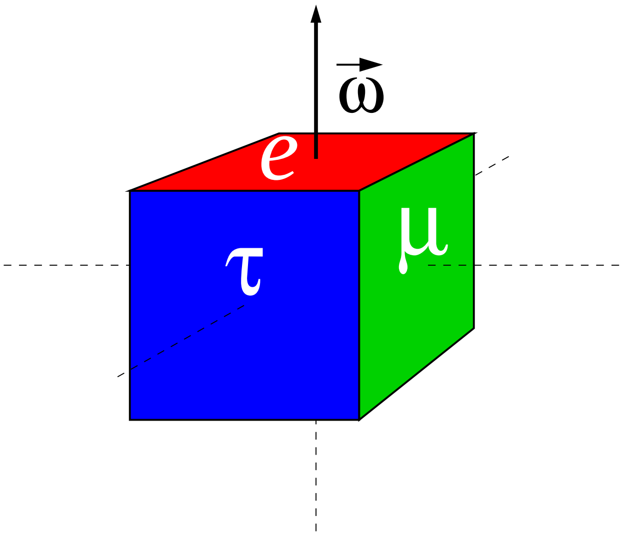


Model

Jeśli wyprodukowane jest neutrino elektronowe

$\Rightarrow$ w naszym modelu sześcian wiruje wokół osi symetrii prostopadłej do czerwonej ściany

to oczekujemy, że po dowolnym czasie dalej będzie neutrinem elektronowym !!!



Wynika to z faktu, że tensor momentu bezwładności sześcianu jest taki sam jak dla kuli (diagonalny, wszystkie wartości własne równe)

$$\vec{L} = I\,\vec{\omega} = const \Rightarrow \vec{\omega} = const$$

$\Rightarrow$ wektor $\vec{\omega}$ nie zmienia swojej orientacji (tak w układzie LAB jak i w układzie bryły)

Model

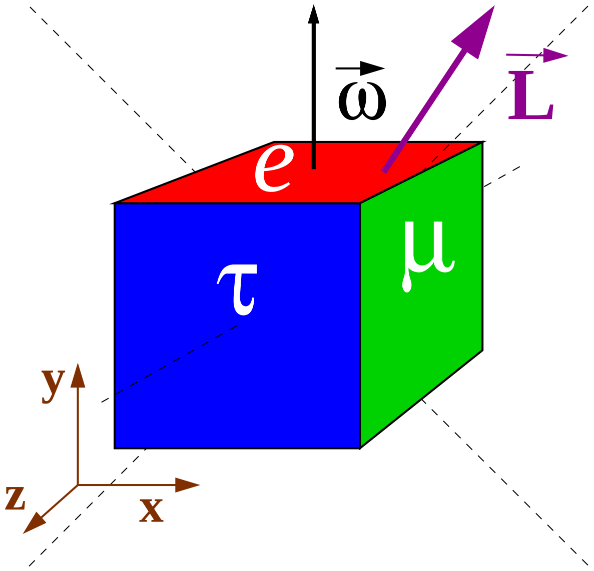
Nasze rozumowanie jest jednak błędne...

Daliśmy się zwieść pozorom...

Rozkład masy wewnątrz sześcian nie musi być równomierny !!!

Mimo pozornej symetrii, sześcian może mieć niediagonalny tensor momentu bezwładności (w układzie równoległym do krawędzi sześcianu)

$\Rightarrow$ osie główne obrócone względem osi symetrii



$\Rightarrow$ różne momenty bezwładności względem osi głównych

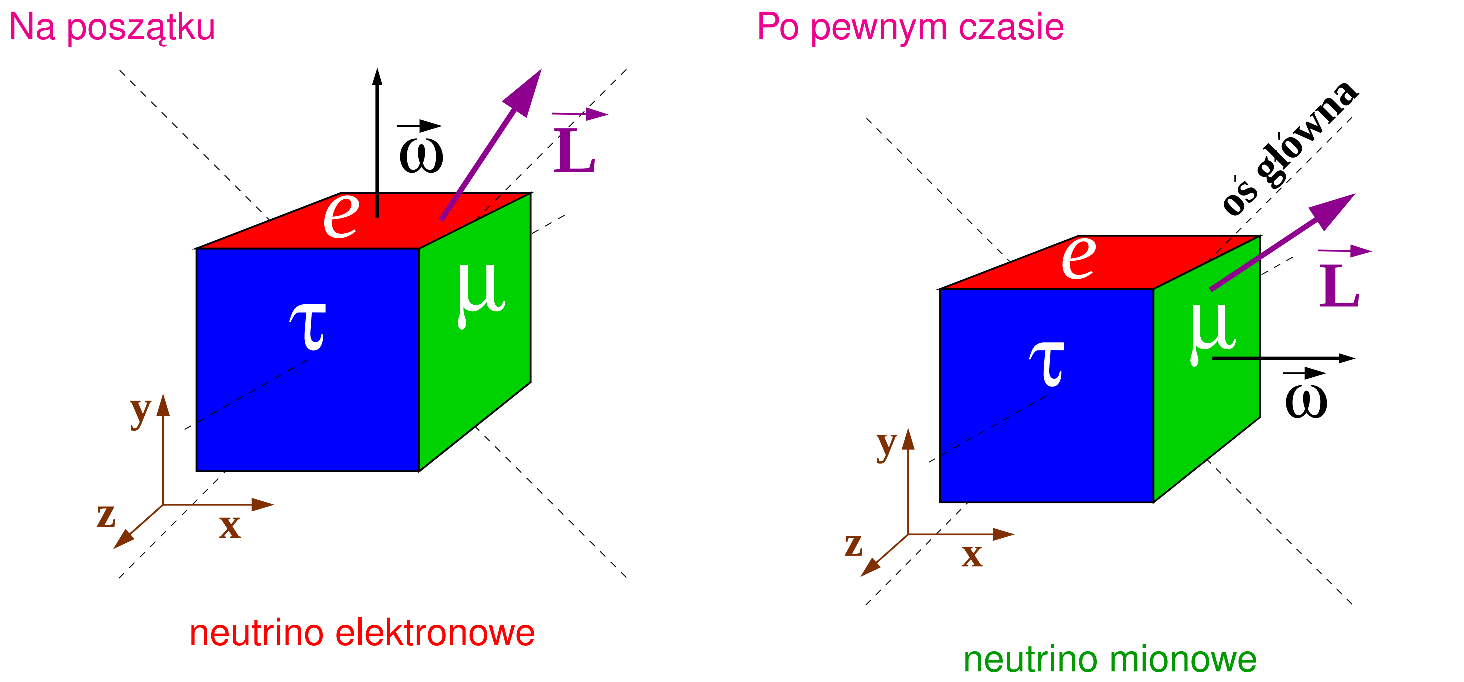
$\Rightarrow$ wektor momentu pędu nie musi być równoległy do wektora prędkości kątowej

$$\vec{\omega} \not\parallel \vec{L} = const$$

Model

Sześcian będzie wirował zgodnie z równaniami Eulera.

W układzie związanym z sześcianem $\Rightarrow$ precesja wektorów $\vec{L}$ i $\vec{\omega}$

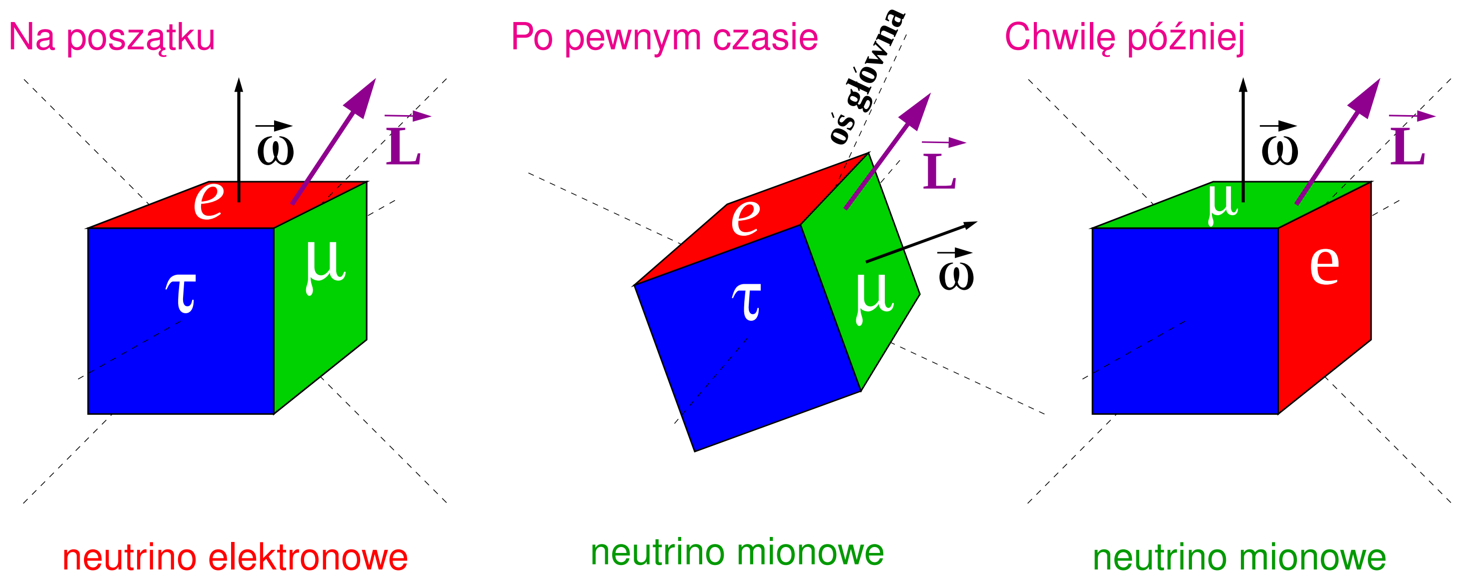


Model

W układzie laboratoryjnym: ruch wirowy sześcianu

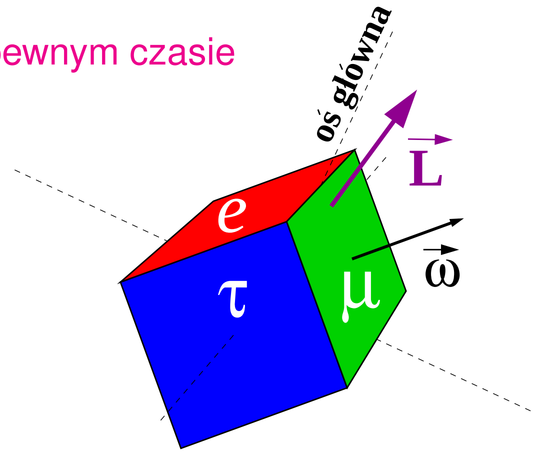
$\Rightarrow$ szybka precesja wektora $\vec{\omega}$ wokól kierunku $\vec{L}$

$\Rightarrow$ powolne przesuwanie $\vec{\omega}$ ze ściany na ścianę



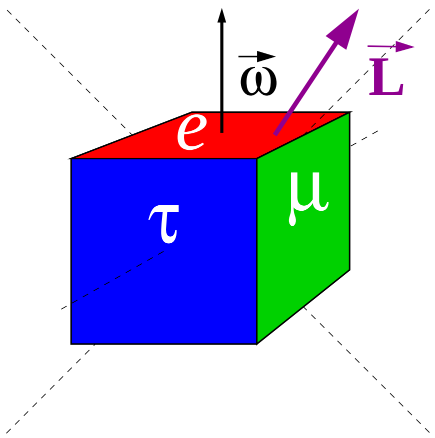
Model

Po pewnym czasie



neutrino mionowe

Ale jeszcze później



znów neutrino elektronowe

Po czasie równym okresowi precesji wektor $\vec{\omega}$ wraca w “położenie początkowe” (prostopadłe do czerwonej ściany)

Oscylacje

Warunek “oscylacji”, w naszym modelu: niesymetryczny rozkład masy

⇒ osie główne nie pokrywają się z osiami prostopadłymi do ścian

⇒ ruch wirowy wokół osi prostopadłych do ścian (o ustalonym zapachu leptonowym) trzeba rozkładać na składowe wzdłuż osi głównych (ustalony moment bezwładności)

⇒ wektory $\vec{\omega}_e$, $\vec{\omega}_\mu$, $\vec{\omega}_\tau$ (prostopadłe do odpowiednich ścian) nie są wektorami własnymi tensora bezwładności

Oczywiście sześcian musi mieć niezerową masę.

Gdyby masa była zerowa, to żadnych oscylacji byśmy mieć nie mogli...

Oscylacje

Z neutrinami jest bardzo podobnie:

⇒ neutrina produkowane w oddziaływaniach leptonów ν_e, ν_μ, ν_τ nie "pokrywają się" z prawdziwymi, fizycznymi cząstkami

⇒ trzeba je "rozkładać" na składowe odpowiadające stanom fizycznym ν_1, ν_2, ν_3 (o ustalonej masie !)

Aby oscylacje były możliwe, **neutrina muszą mieć masę !...**

Dla dwóch neutrin, np. ν_μ i ν_τ, które są mieszankami stanów fizycznych ν_1 i ν_2:

$$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_{12} & \sin\theta_{12} \\ -\sin\theta_{12} & \cos\theta_{12} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$ macierz "obrotu"

θ_{12} - kąt mieszania; w naszym modelu sześcianu odpowiada kątowi między osią główną tensora momentu bezwładności i osią prostopadłą do jednej ze ścian

Dla $\theta_{12} = \frac{\pi}{4}$ (w ogólności: $\sin^2(2\theta_{12}) = 1$) mamy "maksymalne mieszanie"
⇒ ν_μ może całkowicie zamienić się w ν_τ

Oscylacje

Częstość "precesji" w układzie dwóch neutrin: (E - energia neutrina, $m_1,\ m_2 \ll E$)

$$\Omega = \frac{m_2^2 - m_1^2}{2E} \cdot \frac{c^4}{\hbar}$$

Prawdopodobieństwo, że wyprodukowane ν_μ zamieni się w ν_τ:

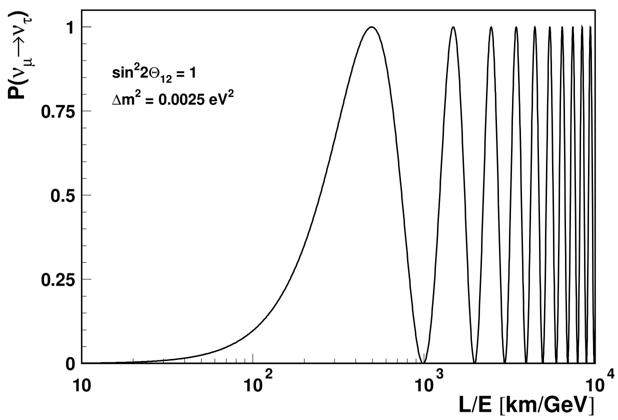
$$P_{\nu_\mu \to \nu_\tau}(t) = \frac{1}{2} \sin^2(2\theta_{12}) \left[1 - \cos(\Omega\, t)\right]$$

Naogół nie mierzymy czasu t tylko L - odległość jaką pokonało neutrino ($v \approx c$)

Prawdopodobieństwo "przejścia" zależy od:

$$\Omega\, t \sim \frac{L}{E}$$

Dla dużych $\frac{L}{E} \Rightarrow \langle P \rangle = \frac{1}{2}\sin^2(2\theta_{12})$



Oscylacje

Neutrina atmosferyczne

Wyniki pomiarów neutrin atmosferycznych w Super-Kamiokande można wytłumaczyć przyjmując, że neutrina mionowe “znikają” na skutek oscylacji w neutrina taonowe

Dopasowanie parametrów mieszania $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$:

$$\sin^2 2\theta_{\mu\tau} = 1.00$$
$$\Delta m^2_{\mu\tau} = 0.0025\, eV^2$$

Neutrina słoneczne

Deficyt neutrin słonecznych można z kolei wytłumaczyć oscylacjami $\nu_e \leftrightarrow \nu_\tau$

$$\Delta m^2_{e\tau} \sim 0.0001\, eV^2$$

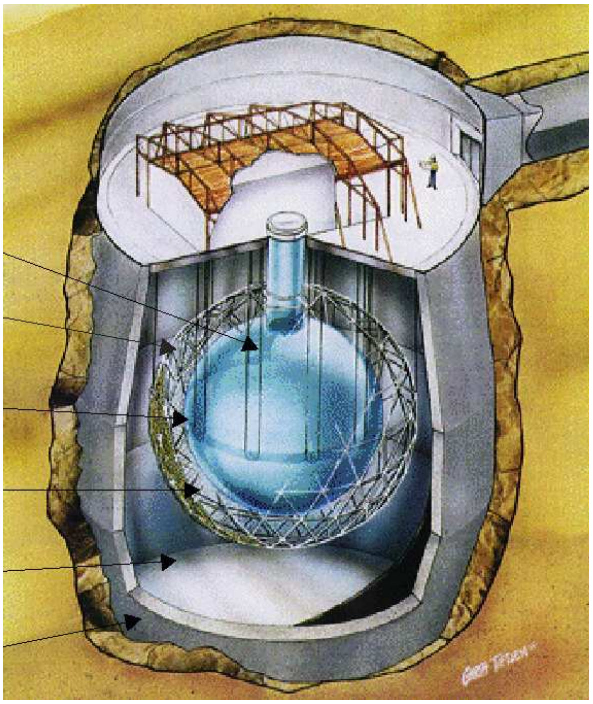
dużo słabsze oscylacje $\Rightarrow$ dopiero na odległościach Ziemia-Słońce

$\Rightarrow$ neutrina muszą miec masy rzędu 0.01 eV

SNO

Oscylacje neutrin słonecznych został niedawno ostatecznie wyjaśnione przez

Eksperyment SNO (Sudbury Neutrino Observatory)



Ogromny zbiornik wypełniony 7000 t wody (H_20)

W środku kula z 1000 t **ciężkiej wody** (D_20)

Promieniowanie Czerenkowa mierzone przez ok. 9500 fotopowielaczy.

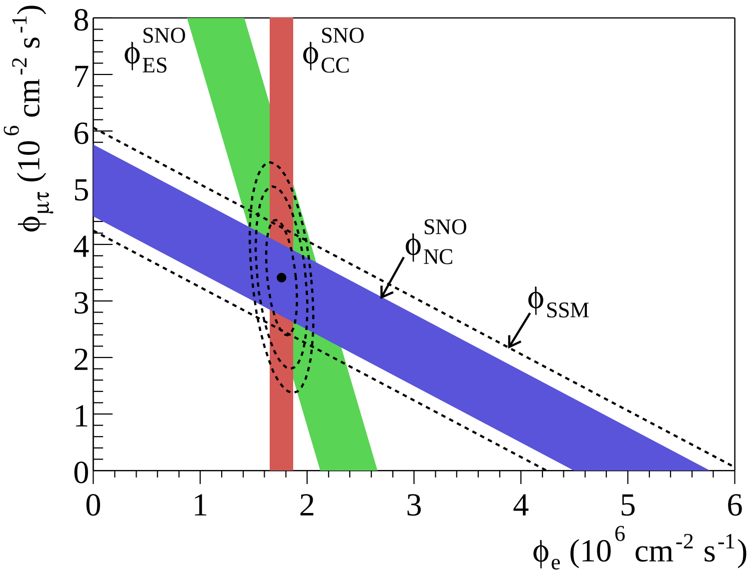
Dzieki wykożystaniu ciężkiej wody detektor czuły jest nie tylko na neutrina elektronowe, ale także na neutrina mionowe i taonowe.

Detektor umieszczony jest na głębokości ponad 2000 m (w kopalni)

Eksperyment SNO

Z dopasowania uzyskujemy strumienie neutrin mierzone w różnych reakcjach
(w jednostkach $10^6\ cm^{-2}s^{-1}$):

$$\Phi_{CC} = 1.76 \pm 0.05 \pm 0.09 = \Phi_{\nu_e}$$
$$\Phi_{ES} = 2.39 \pm 0.24 \pm 0.12$$
$$= \Phi_{\nu_e} + \varepsilon(\Phi_{\nu_\mu} + \Phi_{\nu_\tau})$$
$$(SK:\ 2.32 \pm 0.09)$$
$$\Phi_{NC} = 5.09 \pm 0.44 \pm 0.46$$
$$= \Phi_{\nu_e} + \Phi_{\nu_\mu} + \Phi_{\nu_\tau}$$



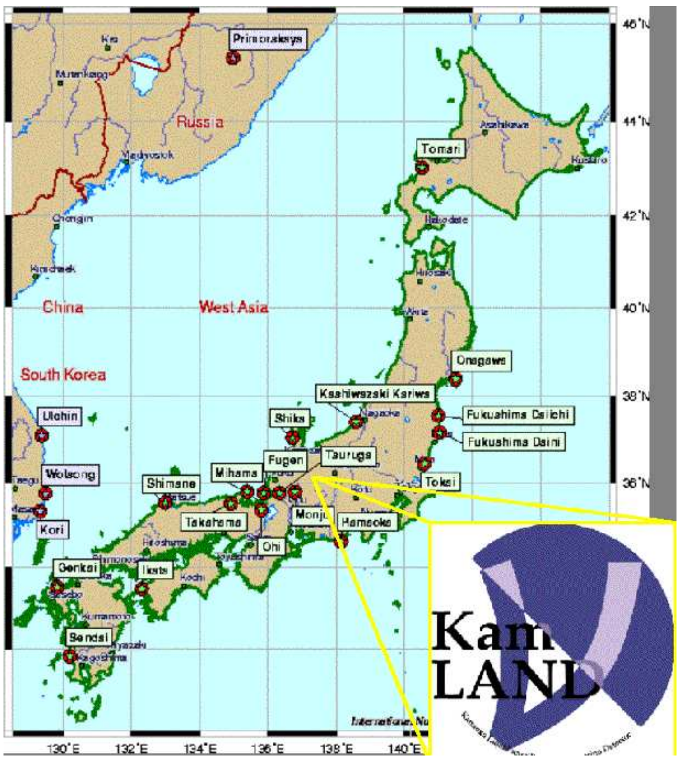
Przewidywania SSM

$$\Phi^{SSM}(\nu_e) = 5.15 \pm 0.95$$

Dobra zgodność dla całkowitego strumienia neutrin.
W miejsce "brakujących" ν_e obserwujemy ν_μ i ν_τ

$$\Phi(\nu_\mu + \nu_\tau) = 3.41 \pm 0.45 \pm 0.48 \approx 2\,\Phi_{\nu_e}$$ (po równo - pełne wymieszanie)

Eksperyment Kamland



Japonia - "mocarstwo" energetyki atomowej.

Eksperyment Kamland został zbudowany w miejscu starego eksperymentu Kamiokande, poprzednika Super-Kamiokande.

Duży strumień neutrin od licznych reaktorów znajdujących się w odległości 140–210 km.

Budowa podobna do SNO:

- zewnętrzny zbiornik wypełniony 3200 t **wody**
- wewnętrzny kulisty zbiornik wypełniony 2000 t **oleju**
- w środku balon wypełniony 1000 t **ciekłego scyntylatora**
- pomiar przy użyciu ok. 2100 fotopowielaczy.

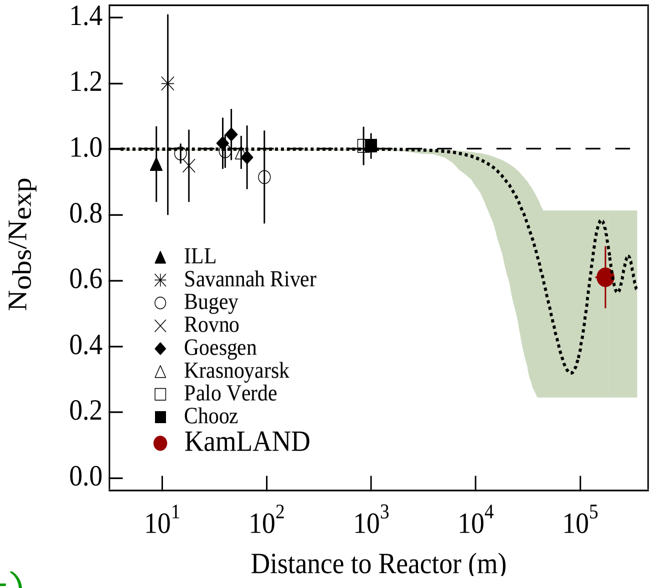
Kamland

Wyniki

Liczba zarejestrowanych przypadków oddziaływania anty-neutrin elektronowych:

- oczekiwana: 86.8 $\pm$5.6 (tło: 0.95 $\pm$0.99)
- zmierzona: 54

$$\frac{N_{obs} - N_{BG}}{N_{exp}} = 0.611 \pm 0.094$$



Wyraźny efekt "znikania" $\bar{\nu}_e$ $(> 3\sigma)$

Dopasowanie parametrów oscylacji:

$$\sin^2 2\theta_{eX} \sim 1.00$$

$$\Delta m^2_{eX} \sim 0.000069\ eV^2 \quad (X = \mu\ lub\ \tau)$$

Wyniki zgodne z wynikami dla neutrin słonecznych (krzywa kropkowana)

Oscylacje neutrin

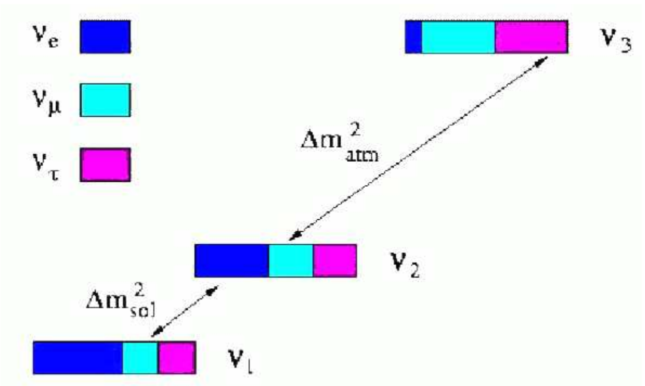
Podsumowanie

Stany fizyczne neutrin są mieszankami stanów o ustalonym zapachu.

Prowadzi to do oscylacji neutrin, które zostały dokładnie zmierzone w dwóch "sektorach":

- neutrina atmosferyczne + K2K
  $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$: $\Delta m^2_{\mu\tau} \sim 0.0025\ eV^2$
- neutrina słoneczne + KamLAND
  $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$ (?): $\Delta m^2_{e\mu} \sim 0.00006\ eV^2$

Widmo mas (jedna z możliwości):



Mieszanie 3 zapachów wyjaśnia wszystkie dane doświadczalne z wyjątkiem LSND, które wymaga $\Delta m^2_{e\mu} > 0.025\ eV^2 \Rightarrow$ czwarte neutrino ?!...

Oscylacje neutrin

Podsumowanie

W ciągu ostatnich kilka lat dokonała się “rewolucja” w naszym spojżeniu na neutrina.

Okazało się, że neutrina maja masę (niezbędny warunek oscylacji)
i mieszają się łamiąc zachowanie liczby leptonowej.

Choć wszystkie wyniki można wciąż opisać w ramach Modelu Standardowego
(wprowadzając odpowiednią liczbę nowych parametrów),
może to być także sygnał jakiejś “nowej fizyki”...

Dlatego planowane i przygotowywane są kolejne, liczne i różnorodne doświadczenia związane z fizyką neutrin
(słonecznych, atmosferycznych, reaktorowych, akceleratorowych).

Przyszłość fizyki cząstek ?