

Neutrino

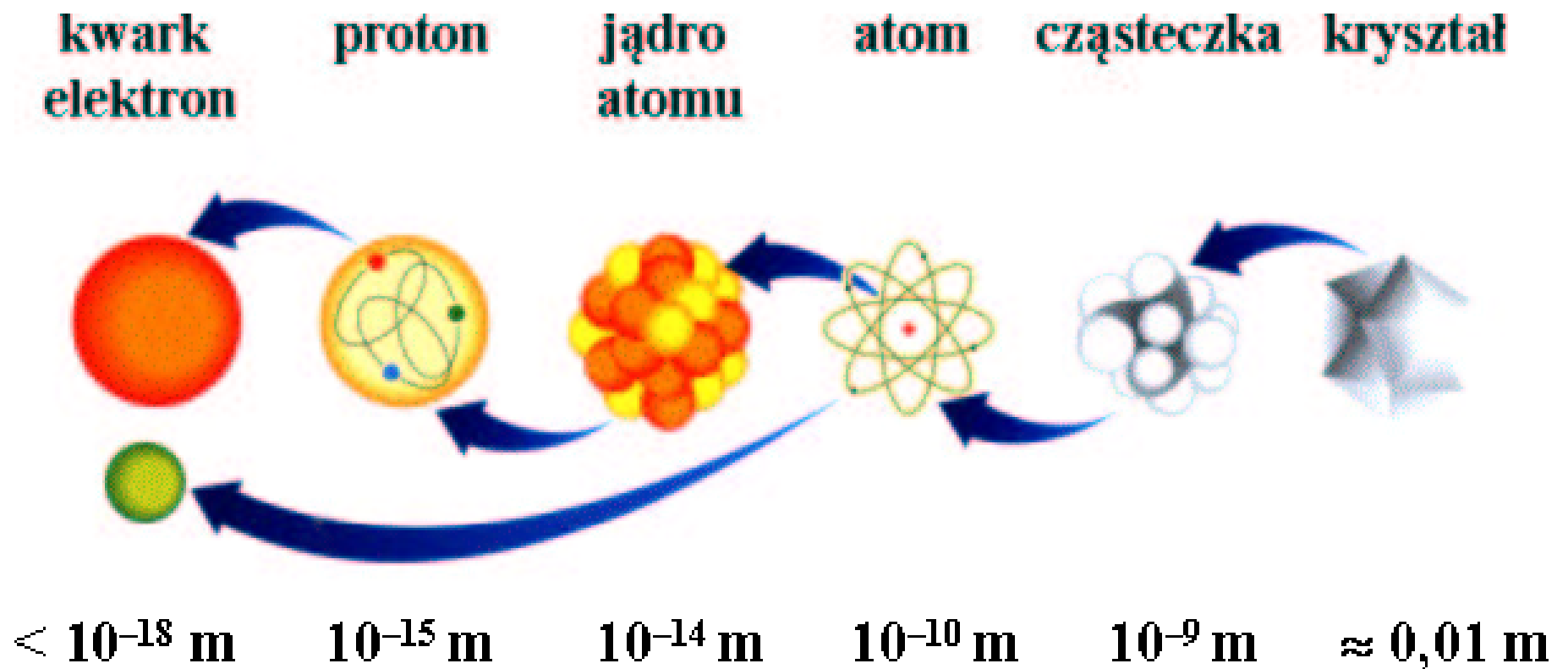
Wstęp do Fizyki I (B+C)

Wykład XXII:

- Budowa materii - przypomnienie
- Neutrino atmosferyczne
- Neutrino słoneczne
- Model “bryłowy” neutrin
- Oscylacje neutrin

Budowa materii

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



Budowa materii

Wyniki badań fizyki cząstek \Rightarrow Model Standardowy

\Rightarrow 12 fundamentalnych “cegielek” materii - fermionów (cząstek o spinie 1/2)

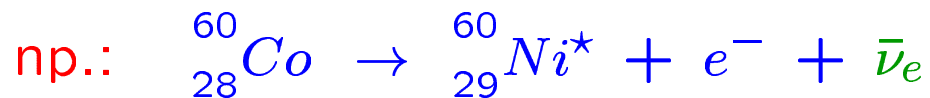
	leptony		kwarki	
pokolenie 1	e <i>elektron</i>	ν_e <i>neutrino el.</i>	d <i>down</i>	u <i>up</i>
pokolenie 2	μ <i>mion</i>	ν_μ <i>neutrino mionowe</i>	s <i>strange</i>	c <i>charm</i>
pokolenie 3	τ <i>taon</i>	ν_τ <i>neutrino taonowe</i>	b <i>beauty</i> <i>(bottom)</i>	t <i>top</i> <i>(truth)</i>
ładunek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

+ anty-fermiony (kolejnych 12)

Neutrino

Neutrino elektronowe

Zaproponowane przez Pauliego do wyjaśnienia rozpadu β :



na poziomie cząstek:

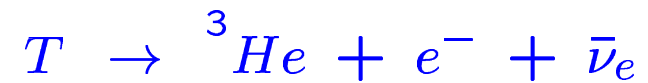


Zakładane właściwości:

- 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):



⇒ ograniczenie na masę ν_e :

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

Ograniczenia astrofizyczne -
rejestracja neutrin z SN 1987A:

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

Neutrina

Okazuje się, że każdy lepton ma “swoje” neutrino.

Liczbę “pokoleń” neutrin **zmierzono** w akceleratorze LEP (“niewidzialne” rozpady Z^0)

$$e^+ e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow \nu_X \bar{\nu}_X$$

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

Przy założeniu, że neutrina są lekkie...

Doświadczalne ograniczenia na masy “ciężkich” neutrin

- neutrino mionowe ν_μ

$$m_{\nu_\mu} < 190 \text{ keV} \approx 0.0018 m_\mu$$

- neutrino taonowe ν_τ

$$m_{\nu_\tau} < 18 \text{ MeV} \approx 0.01 m_\tau$$

Neutrina atmosferyczne

Promieniowanie kosmiczne

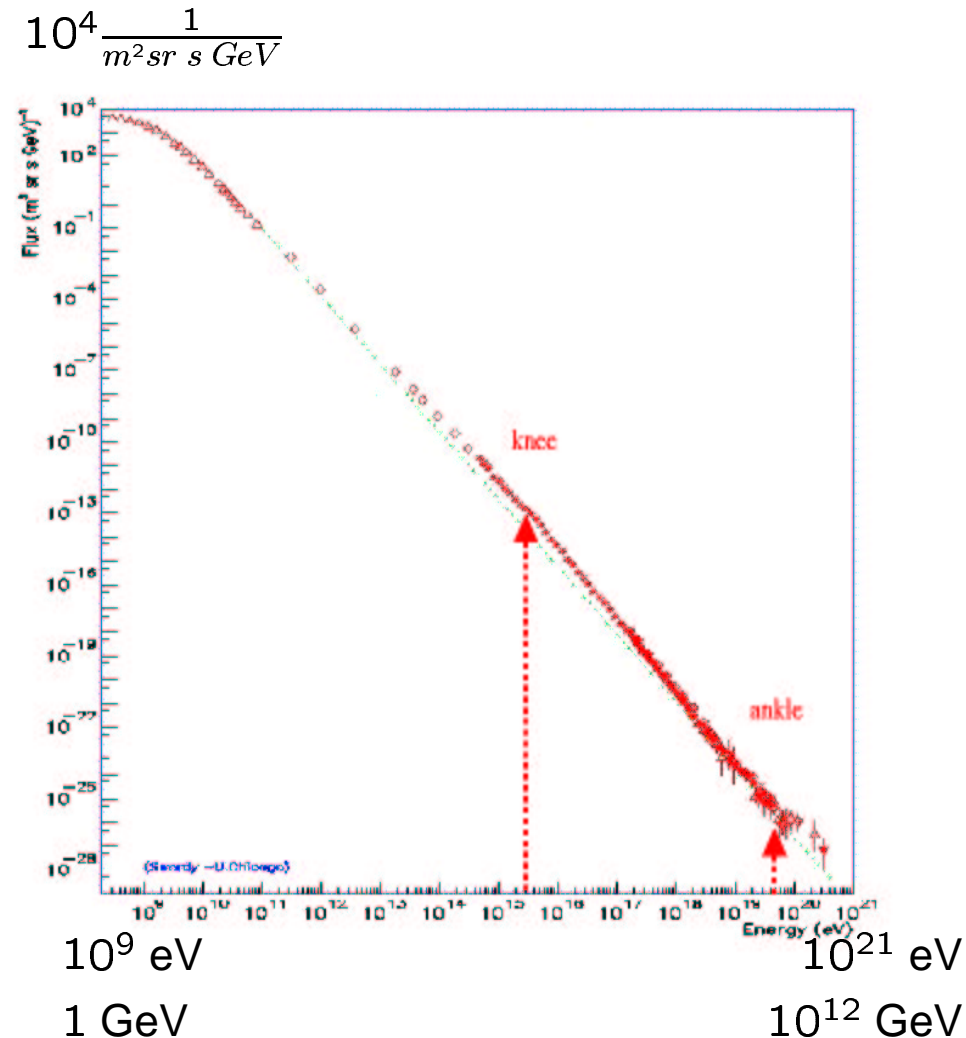
Przestrzeń kosmiczna wypełniona jest cząstkami o energiach dochodzących do 10^{12} GeV (10^{21} eV).

⇒ 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 $\ll 1\%$

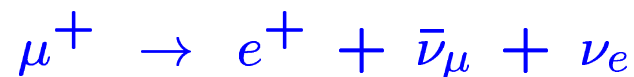
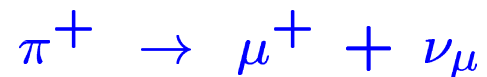


Neutrina atmosferyczne

Produkcja

Promieniowanie kosmiczne “pierwotne” oddziałuje w atmosferze produkując liczne cząstki wtórne, w większości piony π^\pm .

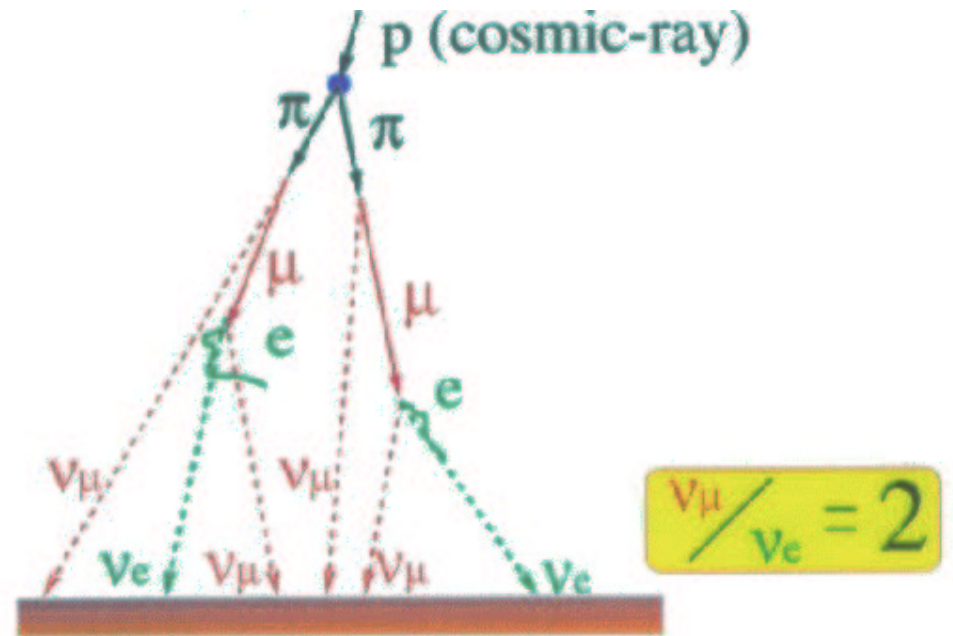
W wyniku rozpadów:



(podobnie dla π^-/μ^-)

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

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



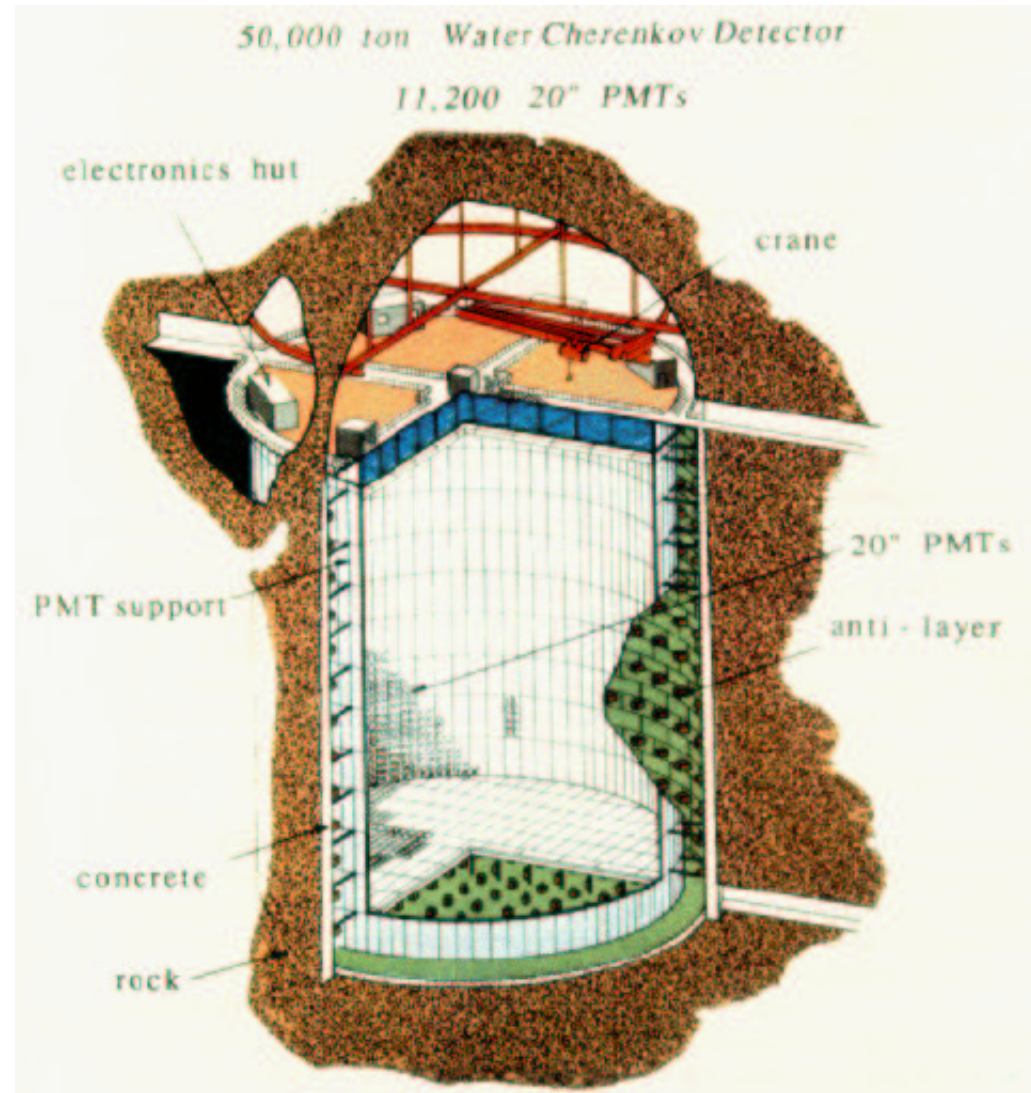
Neutrino atmosferyczne

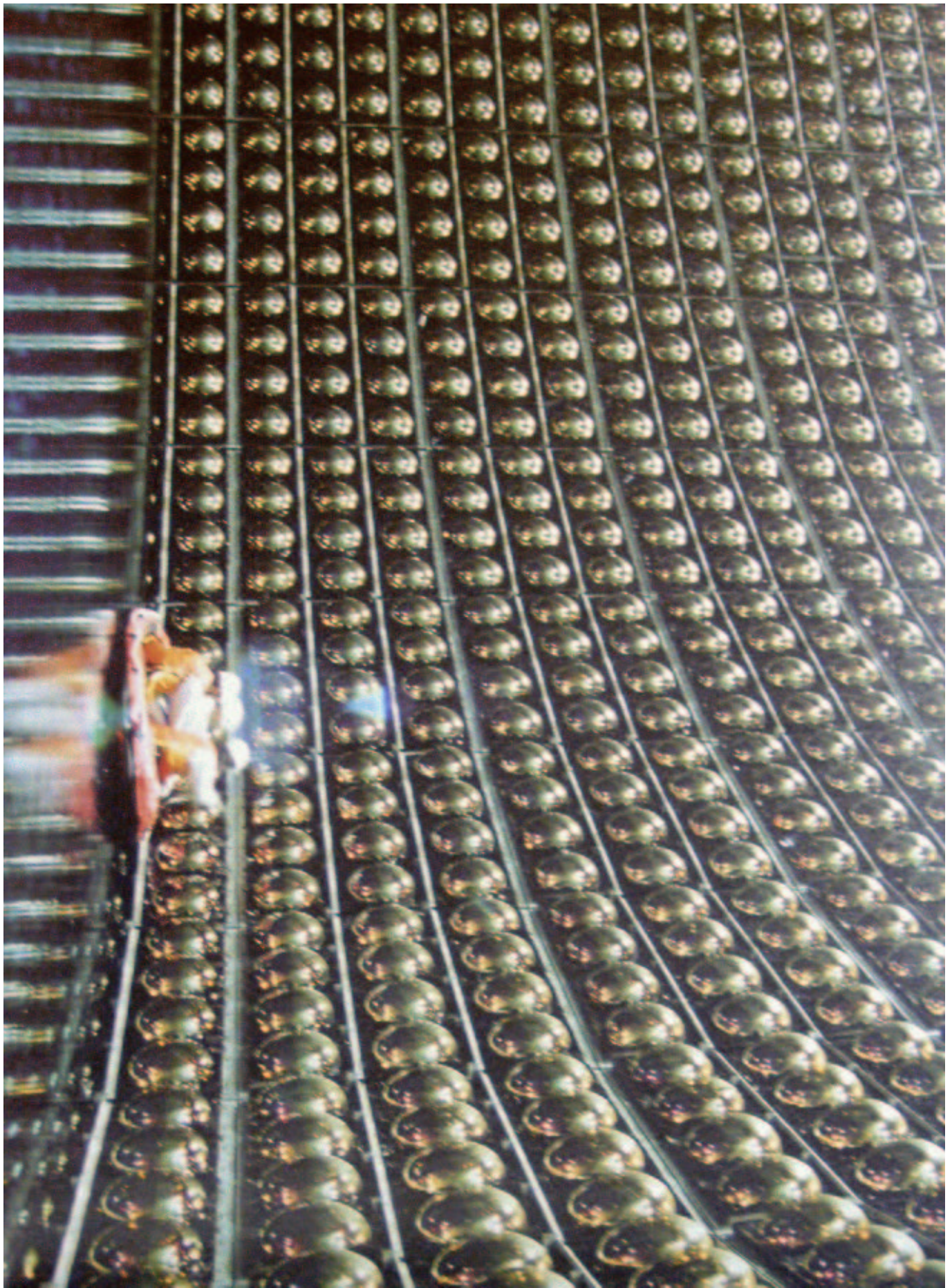
Eksperyment Super-Kamiokande

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)



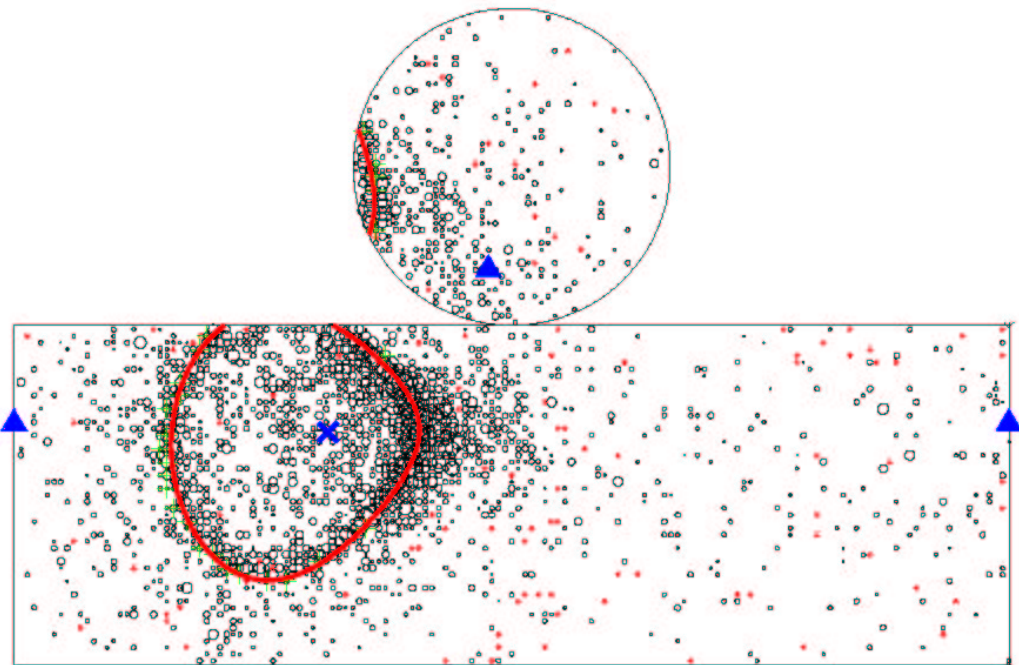


Super-Kamiokande

Neutrino elektronowe

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

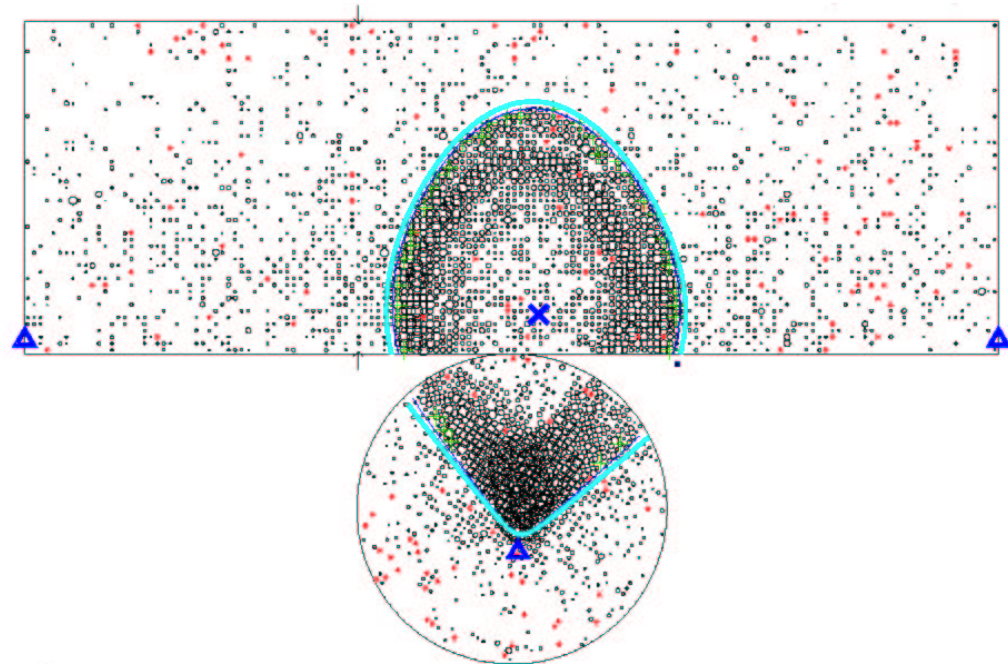
Krótki zasięg elektronu - “cienki” pierścień



Neutrino mionowe

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

Długa droga w wodzie - “gruby” pierścień.

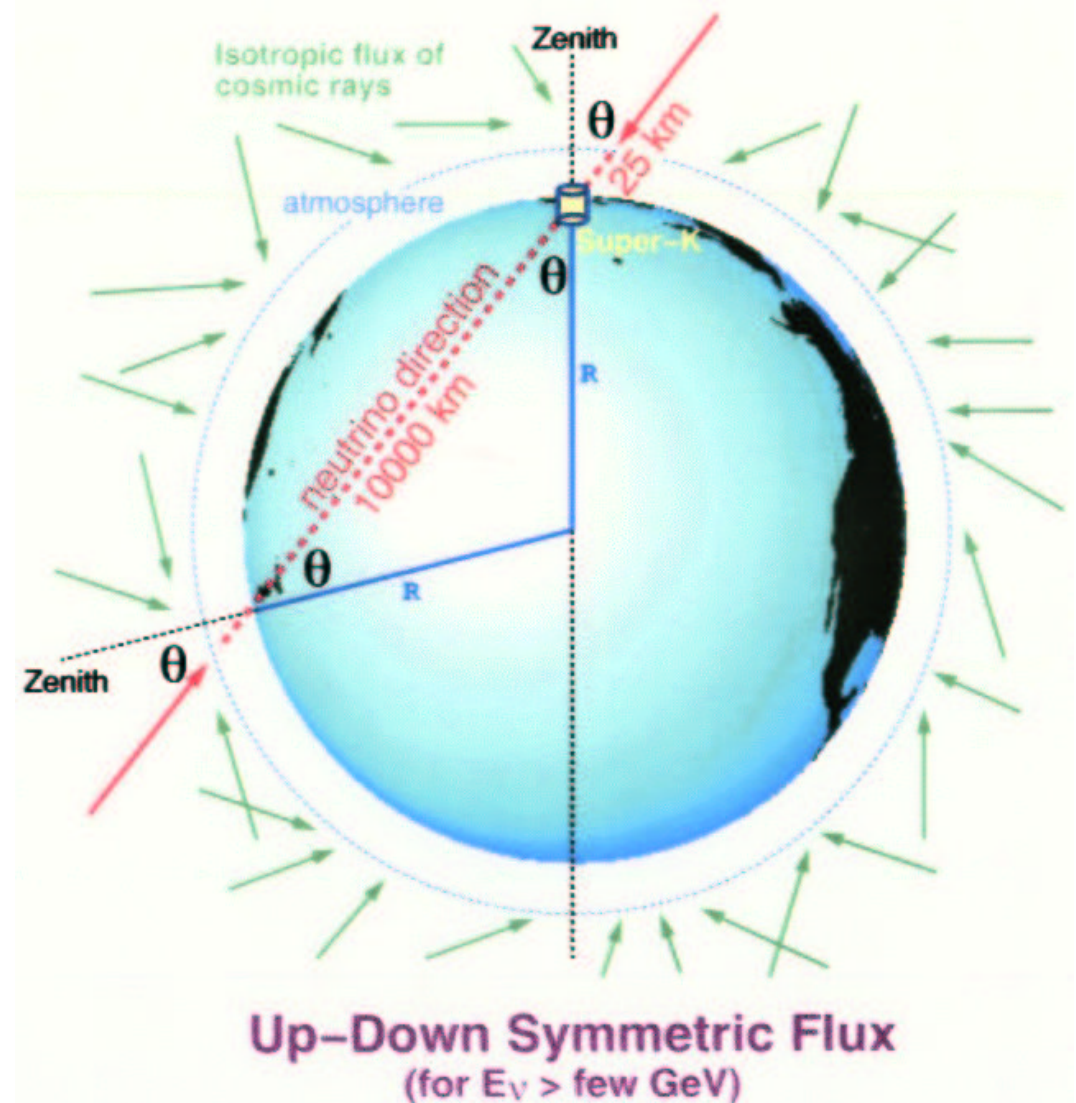


Neutrina atmosferyczne

Rozkład kątowy

Pierwotne promieniowanie kosmiczne jest izotropowe.

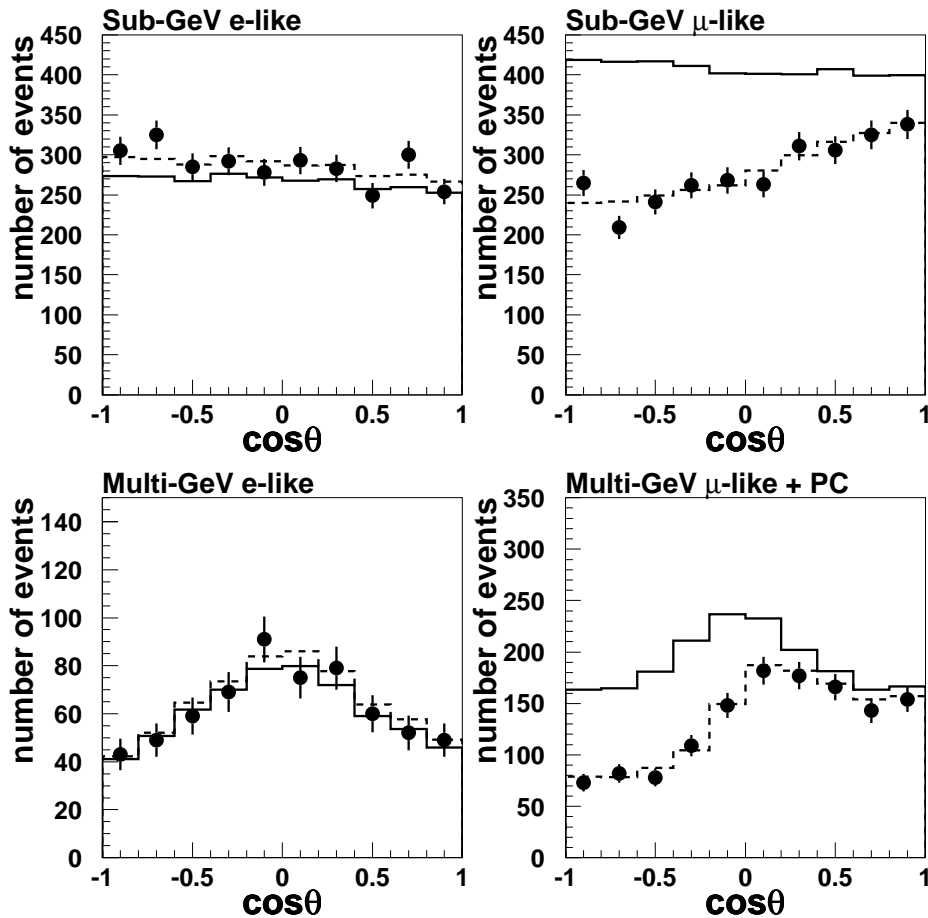
Ponieważ neutrino praktycznie nie oddziałują z Ziemią, strumienie neutrin “do dołu” i “do góry” powinny być sobie **równe**.



Neutrina atmosferyczne

Wyniki

Zależność liczby obserwowanych przypadków elektronowych i mionowych od kierunku



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

Neutrino 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!

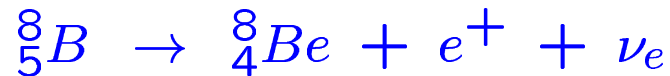
Czy neutrino mionowe mogą “znikać” przechodząc przez Ziemię?

Neutrina słoneczne

Silnym źródłem neutrin jest też Słońce.

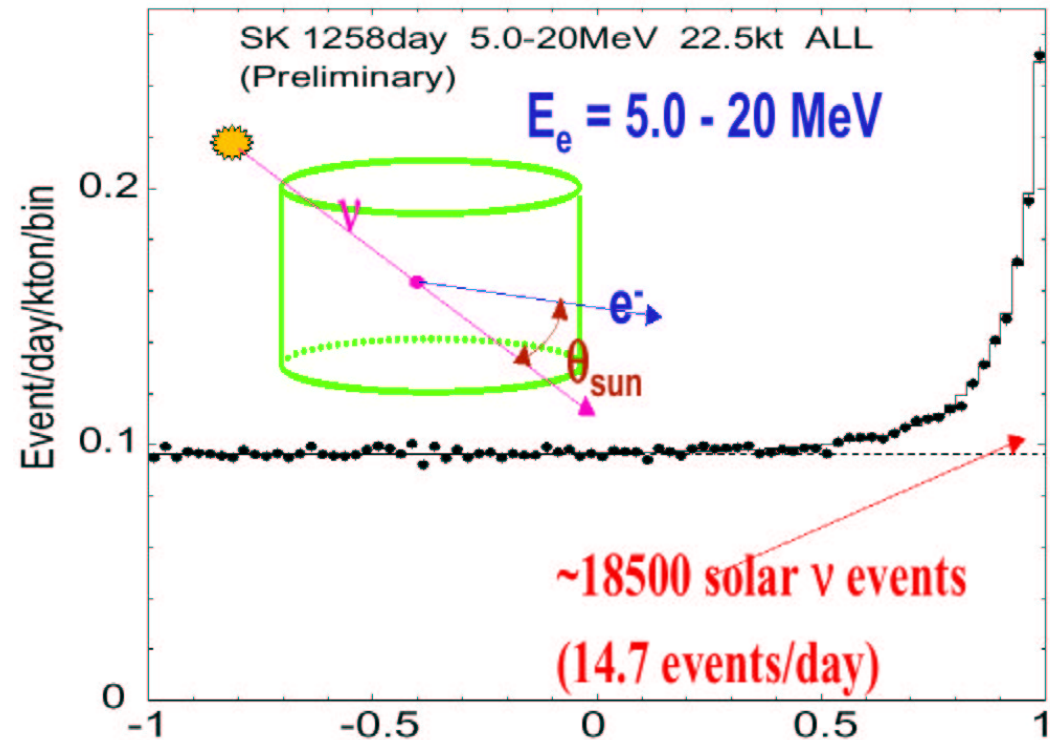
Super-Kamiokande

Neutrina słoneczne produkowane są w bardzo wielu procesach; te o najwyższej energii pochodzą z przemiany 8B



Energia emitowanych neutrin dochodzi do 15 MeV - możemy je rejestrować w detektorach cząstek...

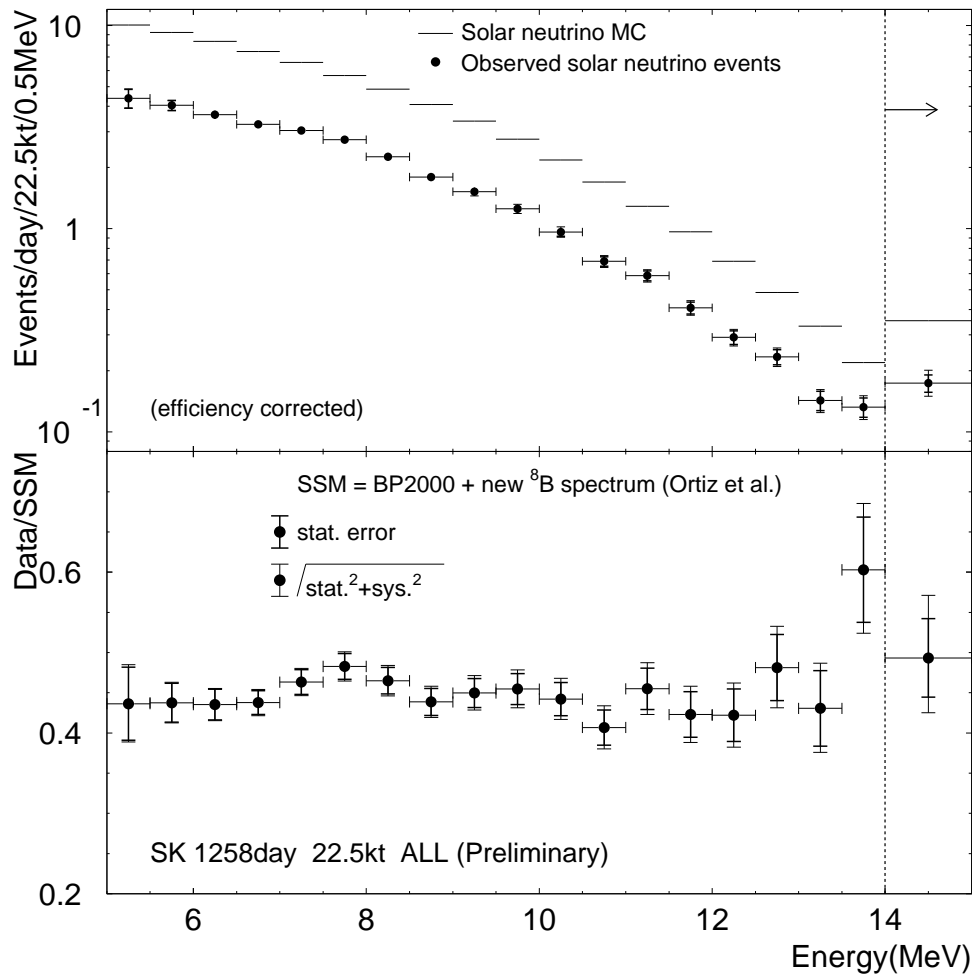
Oddziaływania neutrin słonecznych możemy odróżnić od oddziaływań neutrin atmosferycznych mierząc kąt rozproszonych cząstek względem kierunku od słońca.



Neutrina słoneczne

Deficyt

Obserwowany rozkład energii neutrin słonecznych w Super-Kamiokande:



Kształt rozkładu zgadza się bardzo dobrze z przewidywaniami modelu Słońca (SSM: Standard Solar Model)

Obserwujemy jednak jedynie $47 \pm 2\%$ oczekiwanych przypadków (neutrino elektronowych tym razem !)

Gdzie znikają neutrino !!!

Neutrino słonecznych brakuje także w dzień, gdy nie przechodzą przez Ziemię...

Oscylacje

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

Produkcja i oddziaływanie neutrino 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 neutrino mogą “przemieniać się” jedno w drugie. (łamanie liczby leptonowej)**

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

Zmiana “leptonowości” neutrino 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

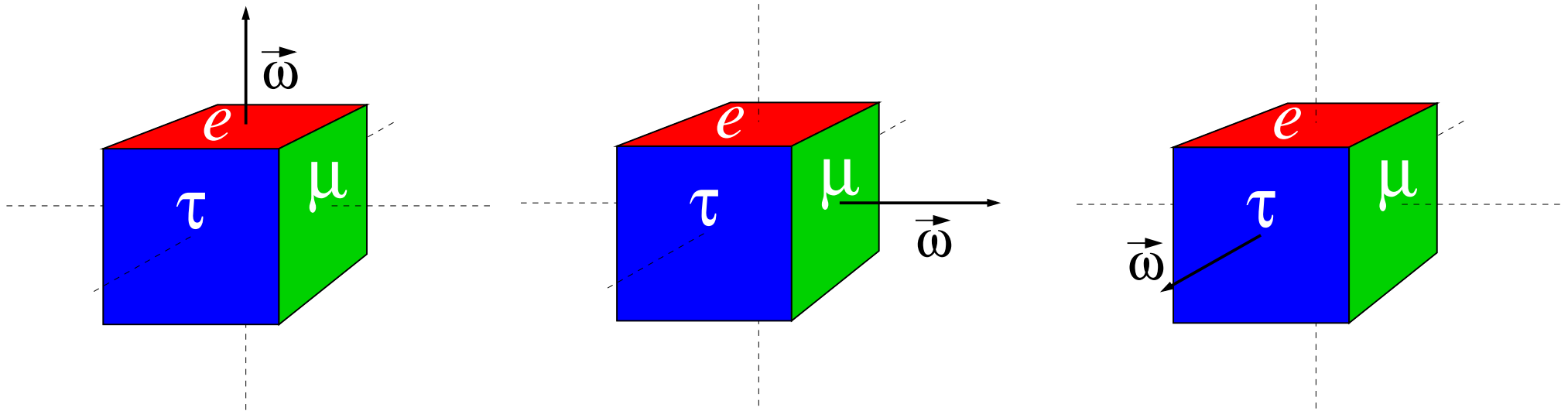
Wyobraźmy sobie, że neutrino to... wirujący kolorowy sześcián

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

neutrino elektronowe

neutrino mionowe

neutrino taonowe



Model

Jeśli wyprodukowane jest **neutrino elektronowe**

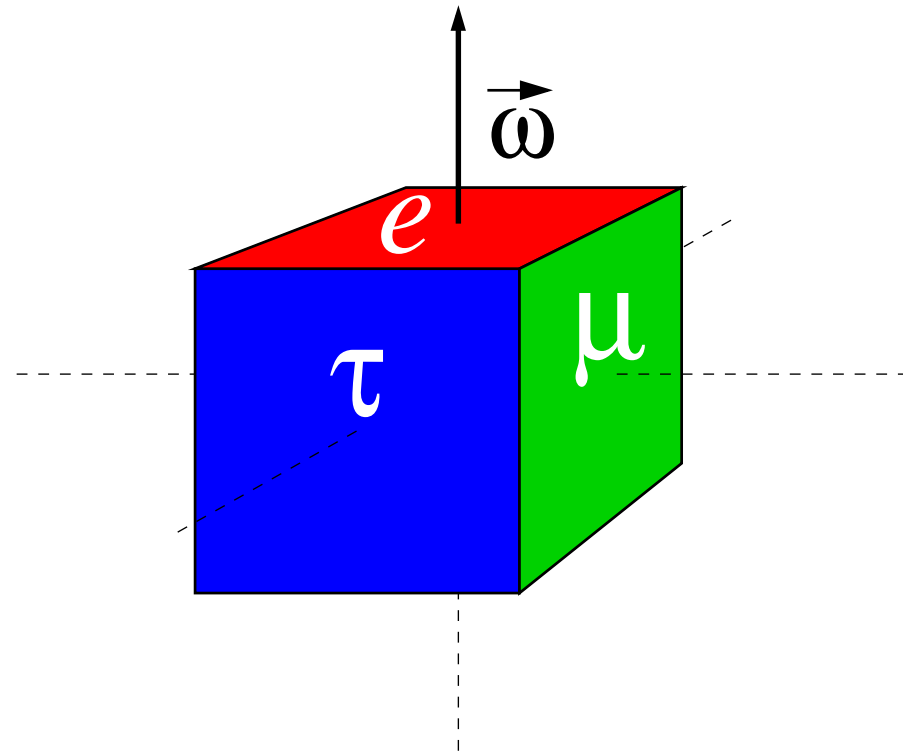
⇒ w naszym modelu sześcian wiruje wokół osi symetrii prostopadłej do czerwonej ściany

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)

$$\vec{\omega} \parallel \vec{L} = \text{const}$$

⇒ wektor $\vec{\omega}$ nie zmienia swojej orientacji



Model

Nasze rozumowanie jest jednak błędne...

Daliśmy się zwieść pozorom...

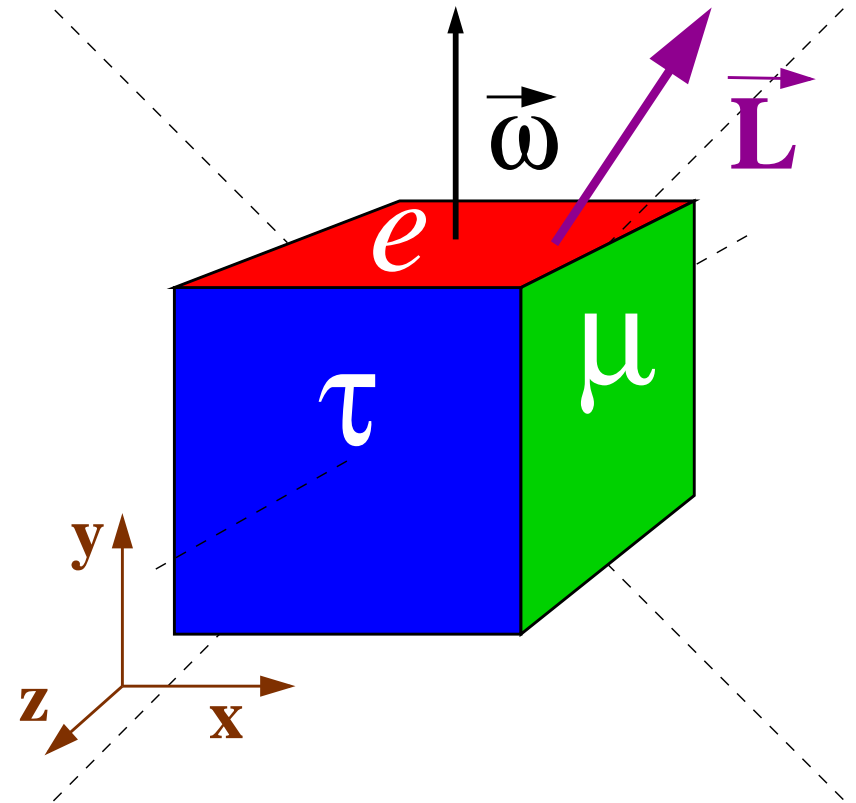
Rozkład masy wewnątrz sześcian
nie musi być równomierny !!!

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

⇒ osie główne obrócone względem osi symetrii

⇒ różne momenty bezwładności względem osi głównych

⇒ wektor momentu pędu nie musi być równoległy do wektora prędkości kątowej



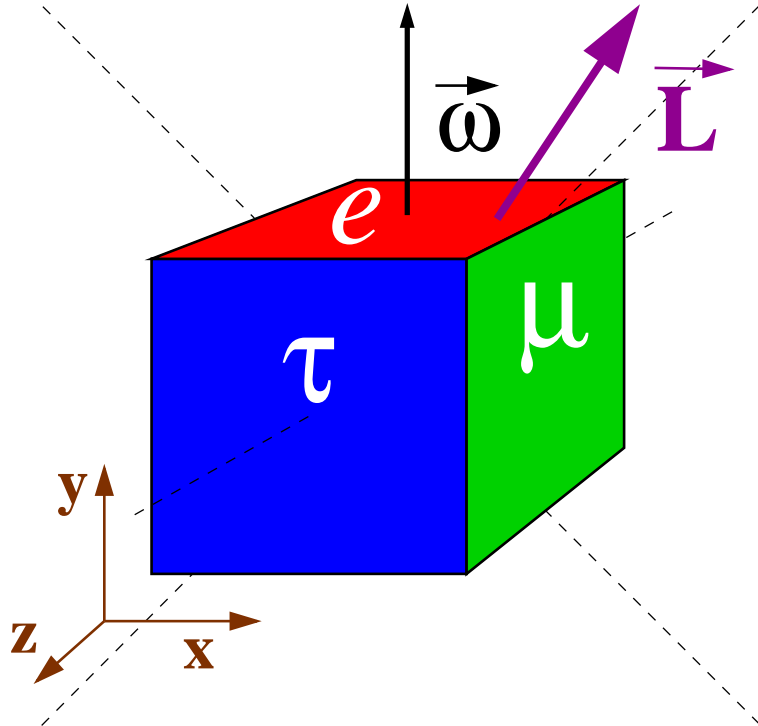
$$\vec{\omega} \nparallel \vec{L} = \text{const}$$

Model

Sześcián będzie wirował zgodnie z równaniami Eulera.

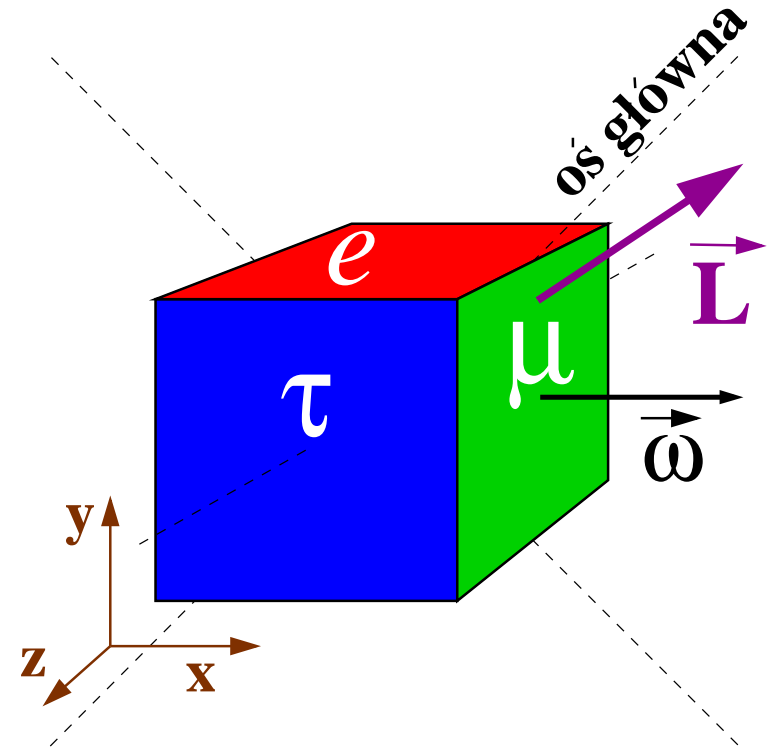
W układzie związanym z sześciánem \Rightarrow precesja wektorów \vec{L} i $\vec{\omega}$

Na poszátku



neutrino elektronowe

Po pewnym czasie



neutrino mionowe

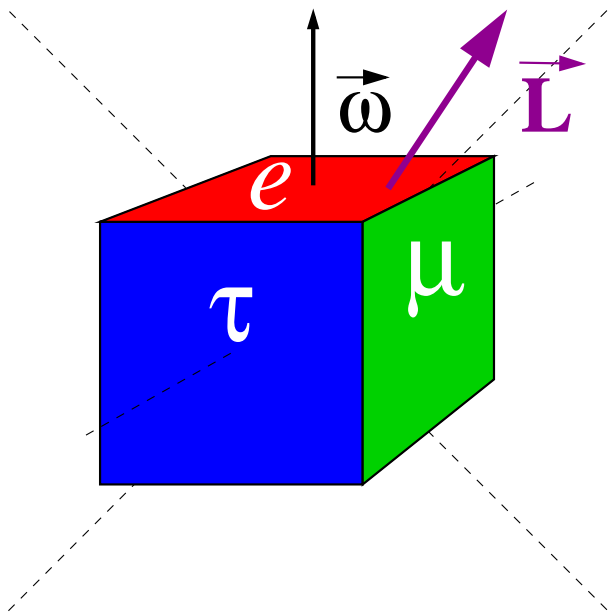
Model

W układzie laboratoryjnym: ruch wirowy sześciangu

⇒ szybka precesja wektora $\vec{\omega}$ wokół kierunku \vec{L}

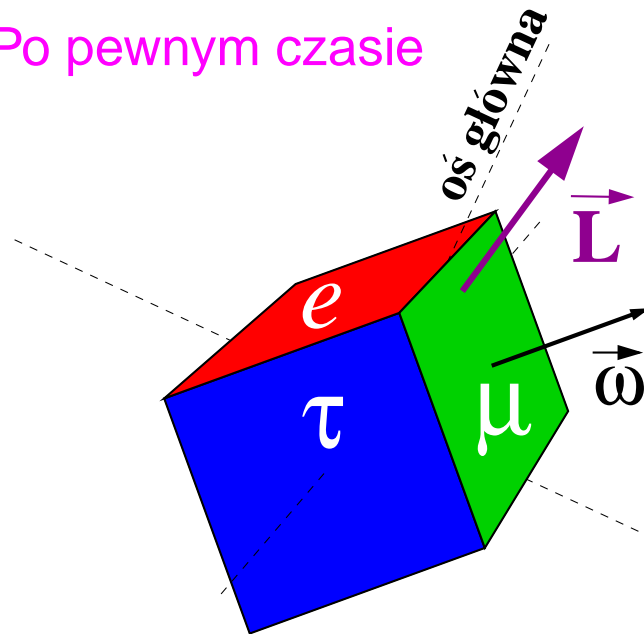
⇒ powolne przesuwanie $\vec{\omega}$ ze ściany na ścianę

Na początku



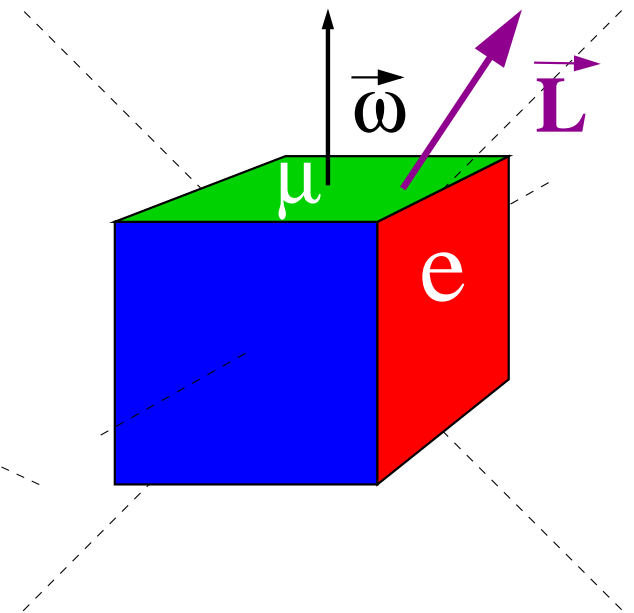
neutrino elektronowe

Po pewnym czasie



neutrino mionowe

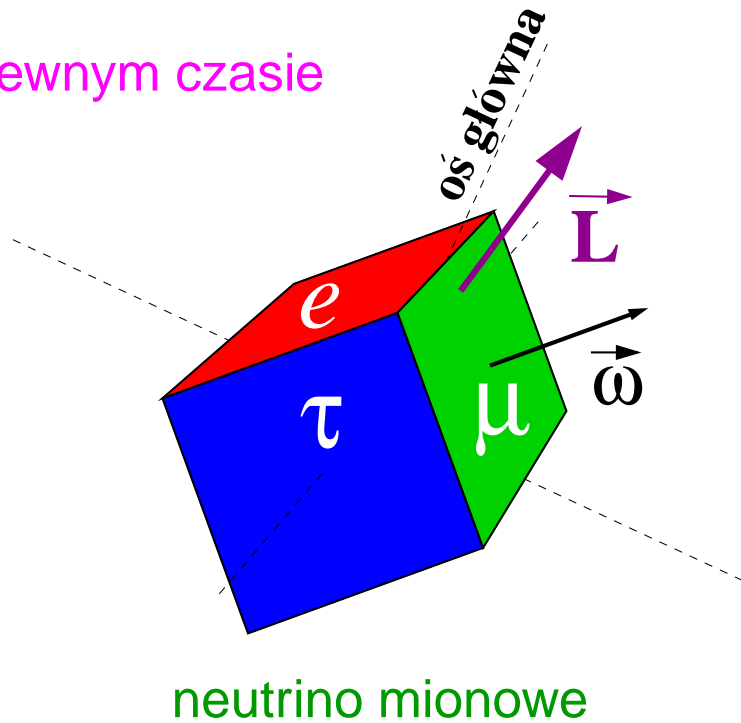
Chwilę później



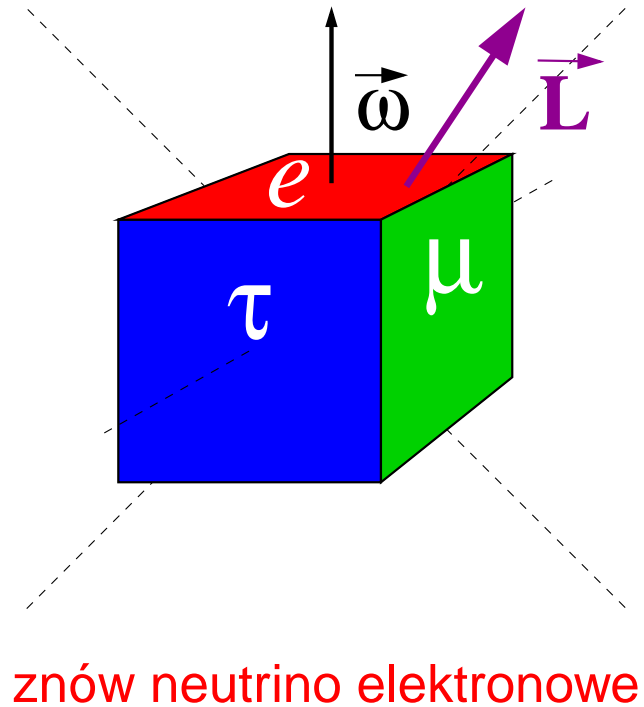
neutrino mionowe

Model

Po pewnym czasie



Ale jeszcze później



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
- ⇒ 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 są “pokrywają się” z prawdziwymi, fizycznymi cząstkami
- ⇒ trzeba je “rozłożyć” 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 :

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

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 :

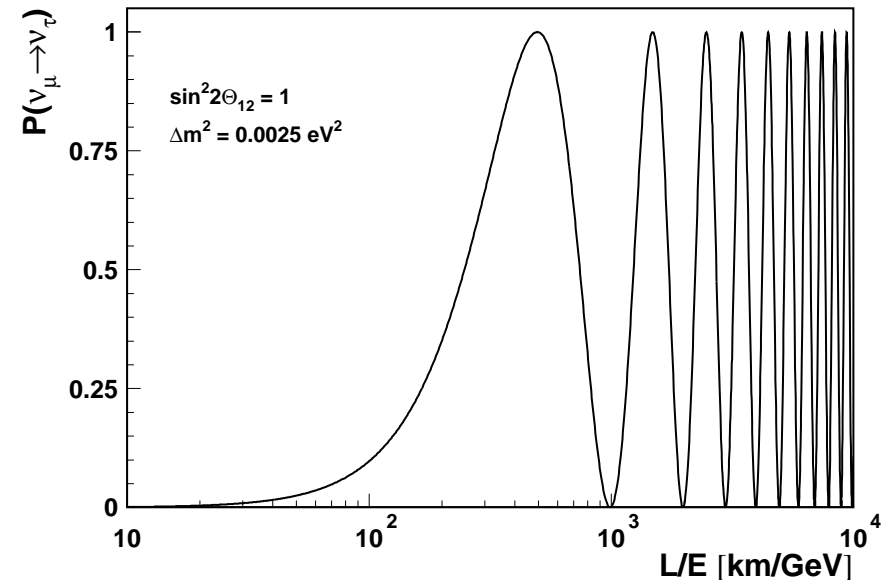
$$P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau}(t) = \frac{1}{2} \sin^2(2\theta_{12}) [1 - \cos(\Omega t)]$$

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 **neutrino mionowe** “znikają” na skutek oscylacji w **neutrino taonowe**

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

$$\sin^2 2\theta_{\mu\tau} = 1.00$$

$$\Delta m_{\mu\tau}^2 = 0.0025 \text{ eV}^2$$

Neutrino słoneczne

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

$$\Delta m_{e\tau}^2 \sim 0.0001 \text{ eV}^2$$

dużo słabsze oscylacje \Rightarrow dopiero na odległościach Ziemia-Słońce

\Rightarrow neutrino muszą mieć masy rzędu 0.01 eV

Oscylacje

Eksperyment SNO

Deficyt neutrin słonecznych został potwierdzony m.in. przez eksperyment SNO.

Porównując wyniki SNO i Super-Kamiokande możemy wykazać, że jest to rezultatem “przemiany” ν_e w inne rodzaje neutrin (ν_μ i ν_τ).

Wyniki na strumień neutrin [$10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]:

$$\text{SNO: } \Phi_{\nu_e} = 1.75 \pm 0.13$$

$$\text{SK: } \Phi_{\nu_e} + 0.154\Phi_{\nu_\mu, \nu_\tau} = 2.35 \pm 0.08$$

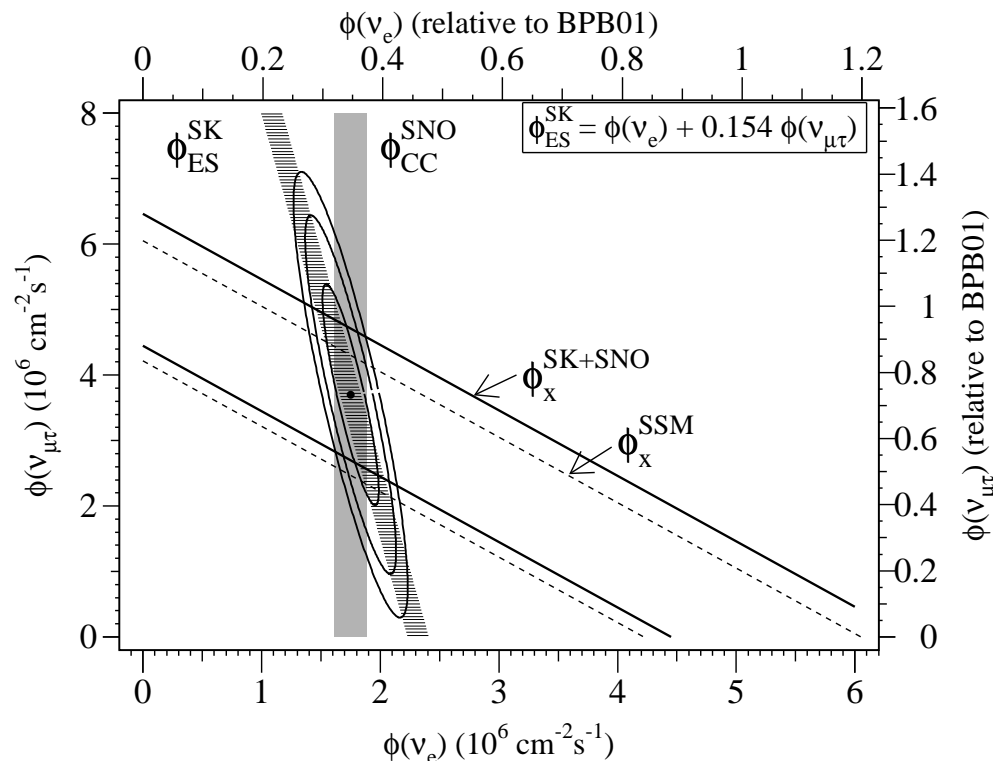
Ostatecznie otrzymujemy:

$$\Phi(\nu_e + \nu_\mu + \nu_\tau) = 5.44 \pm 0.99$$

w porównaniu z przewidywaniami SSM

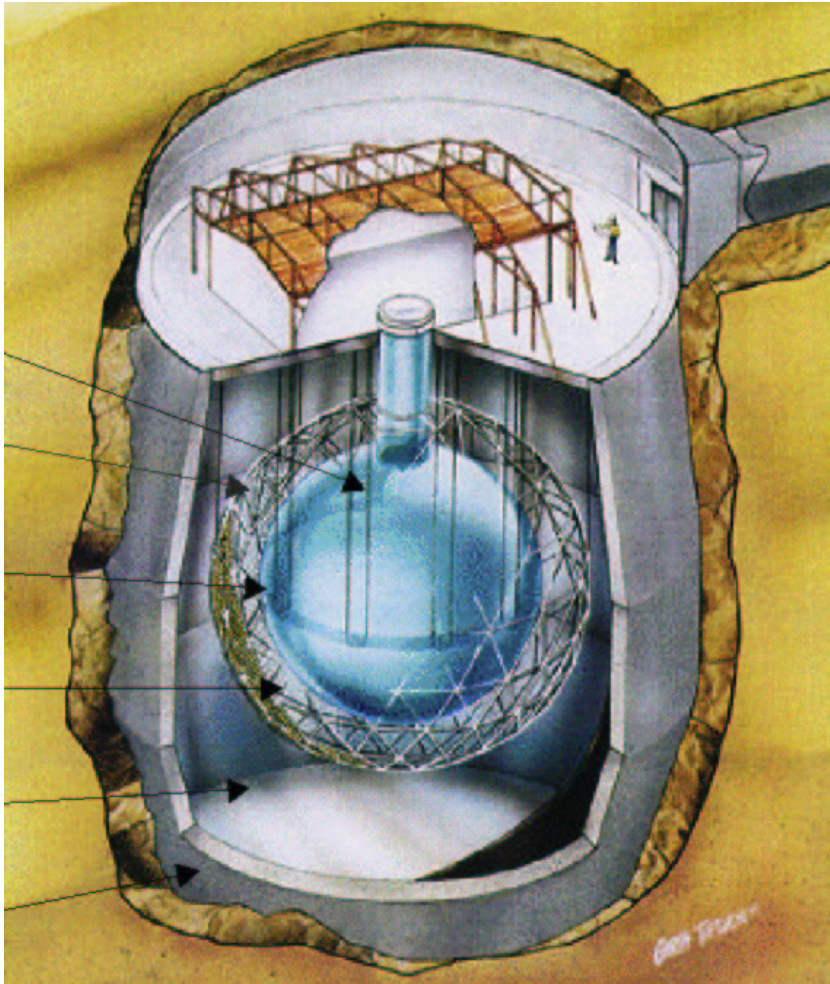
$$\Phi^{SSM}(\nu_e) = 5.15 \pm 0.95$$

⇒ nic nie brakuje !...



SNO

Eksperyment SNO (Sudbury Neutrino Observatory)



Ogromny zbiornik wypełniony 7000 t wody (H_2O)

W środku kula z 1000 t **ciężkiej wody** (D_2O)

Promieniowanie Czerenkowa mierzone przez ok. 9500 fotopowielaczy.

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