

# Neutrino

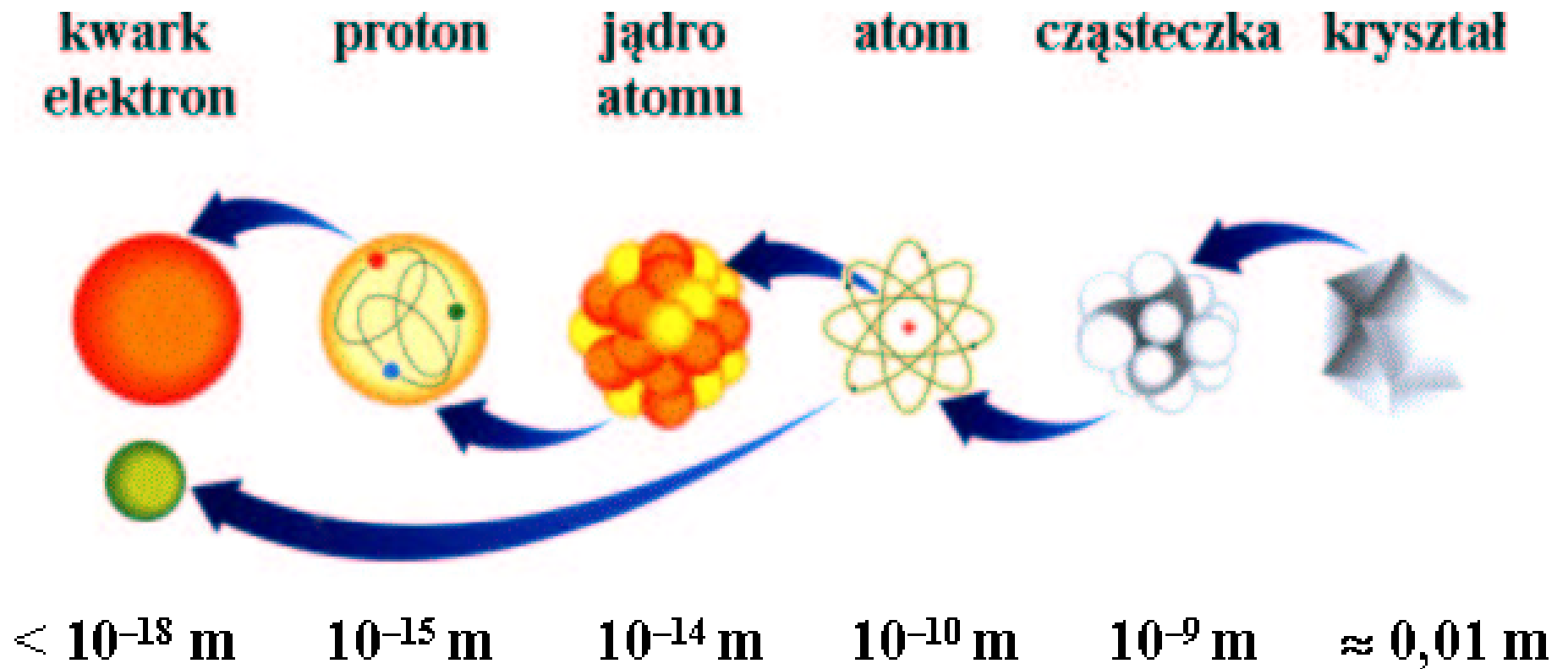
Fizyka I (B+C)

## 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  $\Rightarrow$  Model Standardowy

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

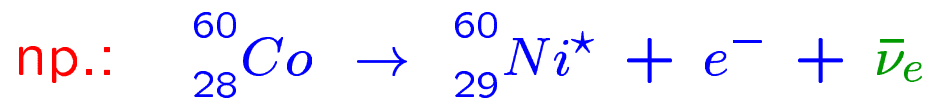
	leptony		kwarki	
pokolenie 1	$e$ <i>elektron</i>	$\nu_e$ <i>neutrino el.</i>	$d$ <i>down</i>	$u$ <i>up</i>
pokolenie 2	$\mu$ <i>mion</i>	$\nu_\mu$ <i>neutrino mionowe</i>	$s$ <i>strange</i>	$c$ <i>charm</i>
pokolenie 3	$\tau$ <i>taon</i>	$\nu_\tau$ <i>neutrino taonowe</i>	$b$ <i>beauty</i> <i>(bottom)</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  $\beta$ :



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  $\nu_e$ :

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

Ograniczenia astrofizyczne - rejestracja neutronów 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 ( $m_\nu \ll m_Z$ )...

Doświadczalne ograniczenia na masy pozostałych neutrin

- neutrino mionowe  $\nu_\mu$

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

- neutrino taonowe  $\nu_\tau$

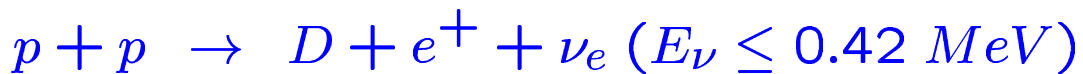
$$m_{\nu_\tau} < 15.5 \text{ MeV} \approx 0.01 m_\tau$$

# Neutrina słoneczne

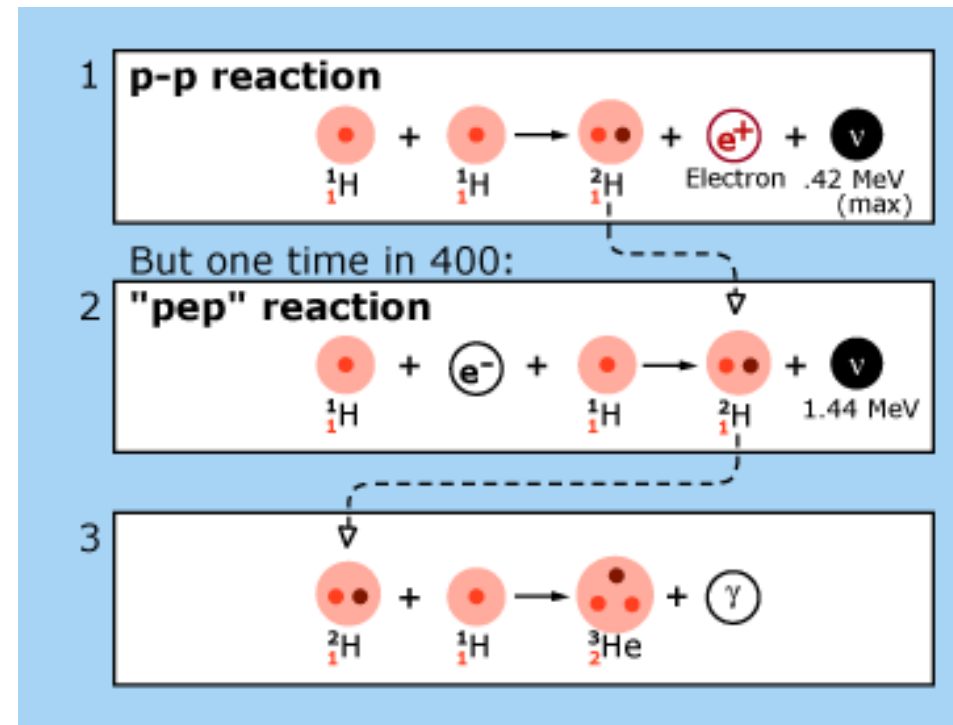
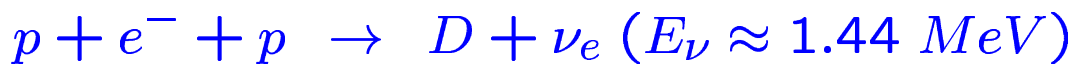
## Produkcja neutrin

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

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



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

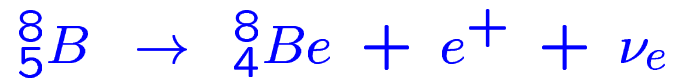


# Neutrina słoneczne

## Produkcja neutrin

Dalsze reakcje syntezy  ${}^3\text{He}$ ,  ${}^4\text{He}$ ,  ${}^7\text{Be}$  i  ${}^7\text{Li}$  prowadzą do emisji dodatkowych neutrin.

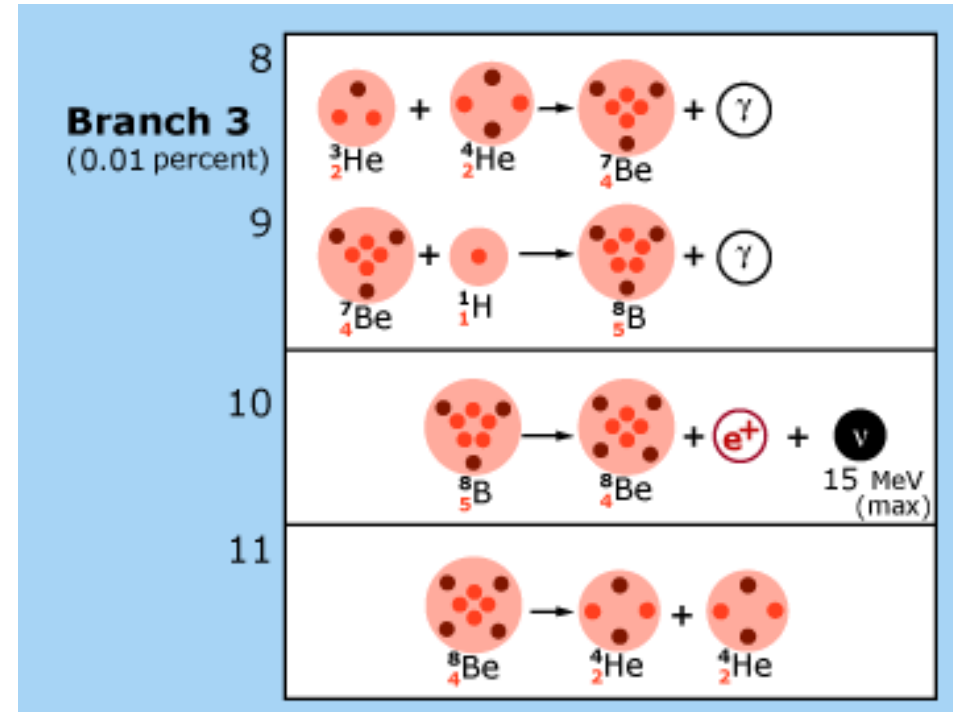
Źródłem wysokoenergetycznych neutrin jest przemiana  ${}^8\text{B}$



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  $E_\nu > 5\text{--}7\text{ MeV}$ ...



# Neutrina słoneczne

## Widmo energii

Widmo energii **neutrino elektronowych** produkowanych w reakcjach jądrowych na słońcu ⇒

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

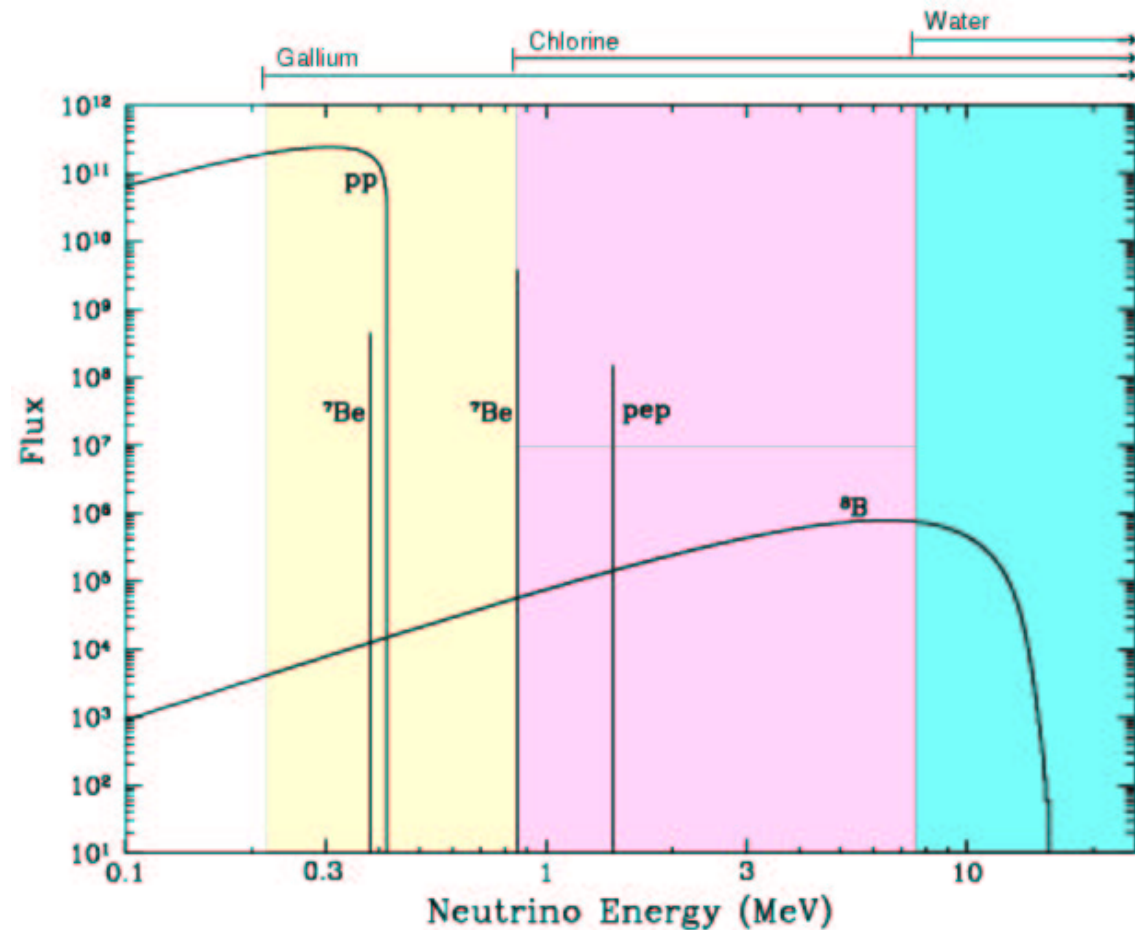


(eksperyment Homestake)



(SAGE, GALLEX, GNO)

**Tylko neutrino elektronowe !**



Ga

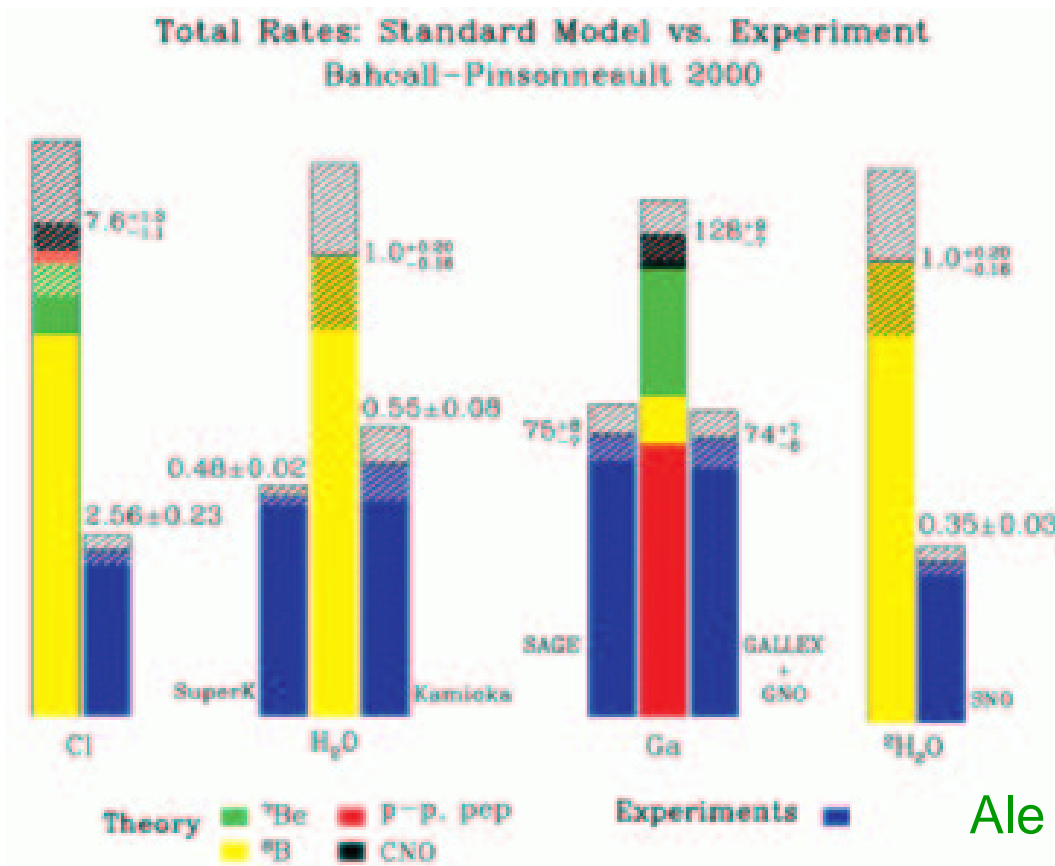
Cl

woda



# Neutrina słoneczne

## Deficyt neutrin słonecznych



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

Aby wytłumaczyć wyniki pomiarów trzeba by założyć, że:

- reakcja  ${}^8_5B \rightarrow {}^8_4Be + e^+ + \nu_e$  zachodzi  $2 \times$  rzadziej
- reakcja  ${}^7_4Be + e^- \rightarrow {}^7_3Li + \nu_e$  wogóle nie zachodzi !...

Ale Słońce świeciłoby wtedy zupełnie inaczej!

Przez ponad 35 lat było to zagadką...

# Neutrina atmosferyczne

## Promieniowanie kosmiczne

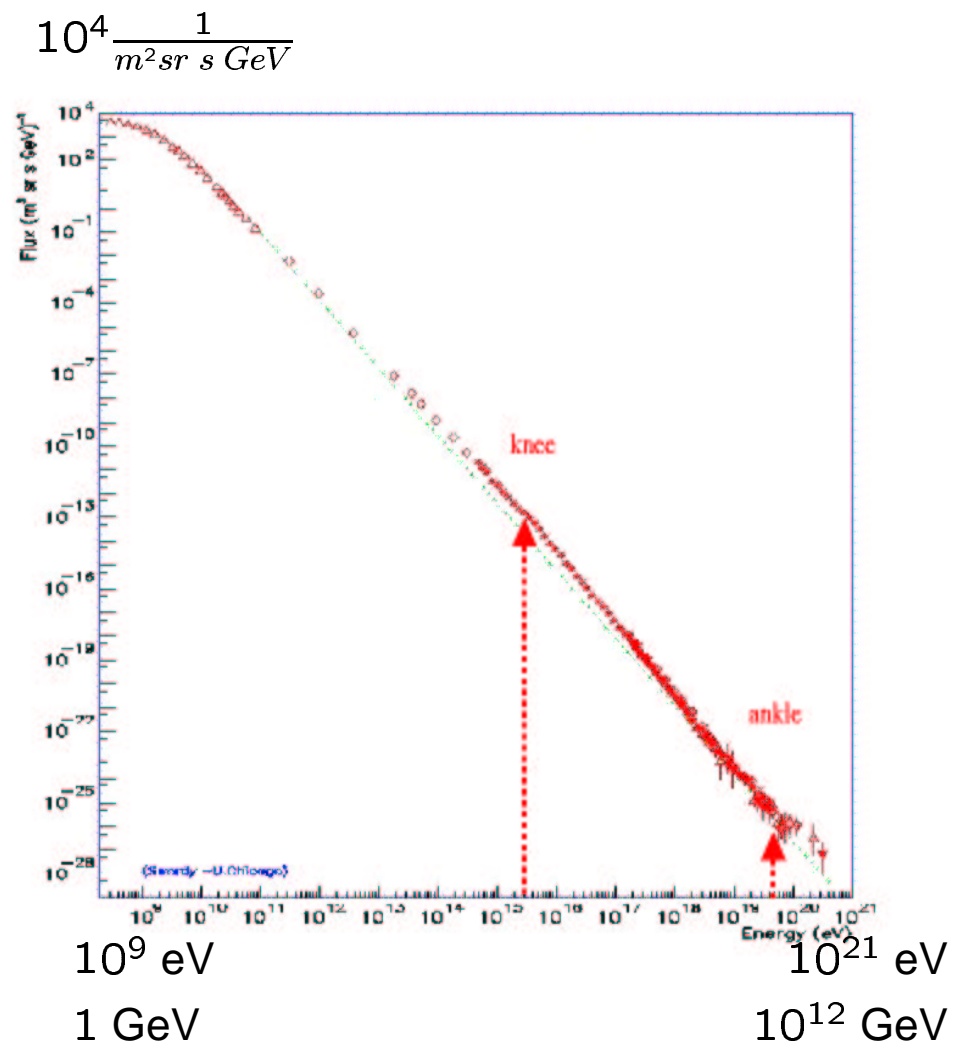
Przestrzeń kosmiczna wypełniona jest cząstkami o energiach dochodzących do  $10^{12}$  GeV ( $10^{21}$  eV).

⇒ promieniowanie kosmiczne

poza atmosferą ziemską ⇒ “pierwotne”

Skład “pierwotnego” promieniowania kosmicznego (pomijając neutrina):

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

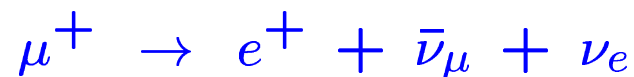
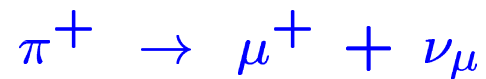


# Neutrina atmosferyczne

## Produkcja

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

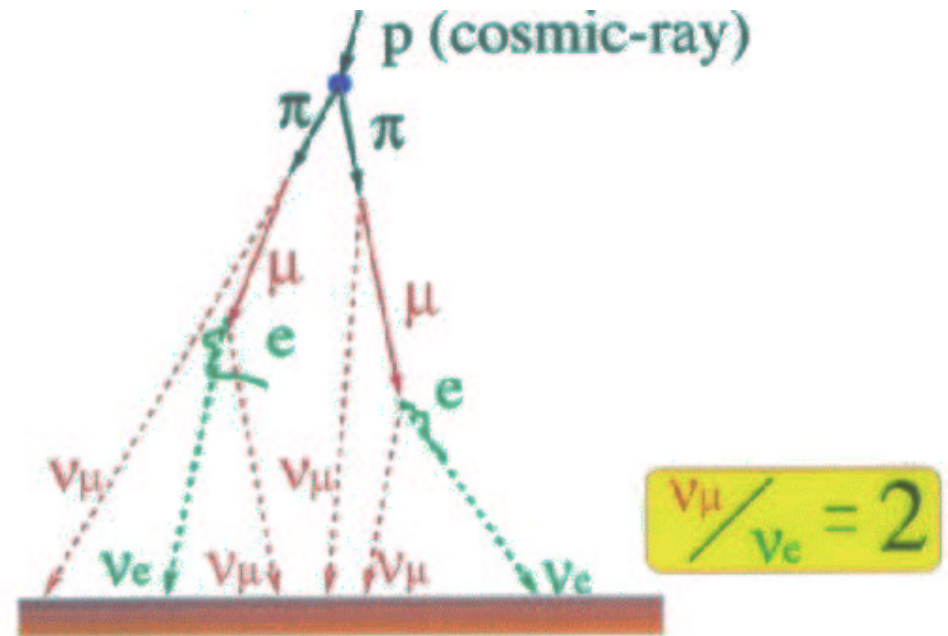
W wyniku rozpadów:



(podobnie dla  $\pi^-/\mu^-$ )

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

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



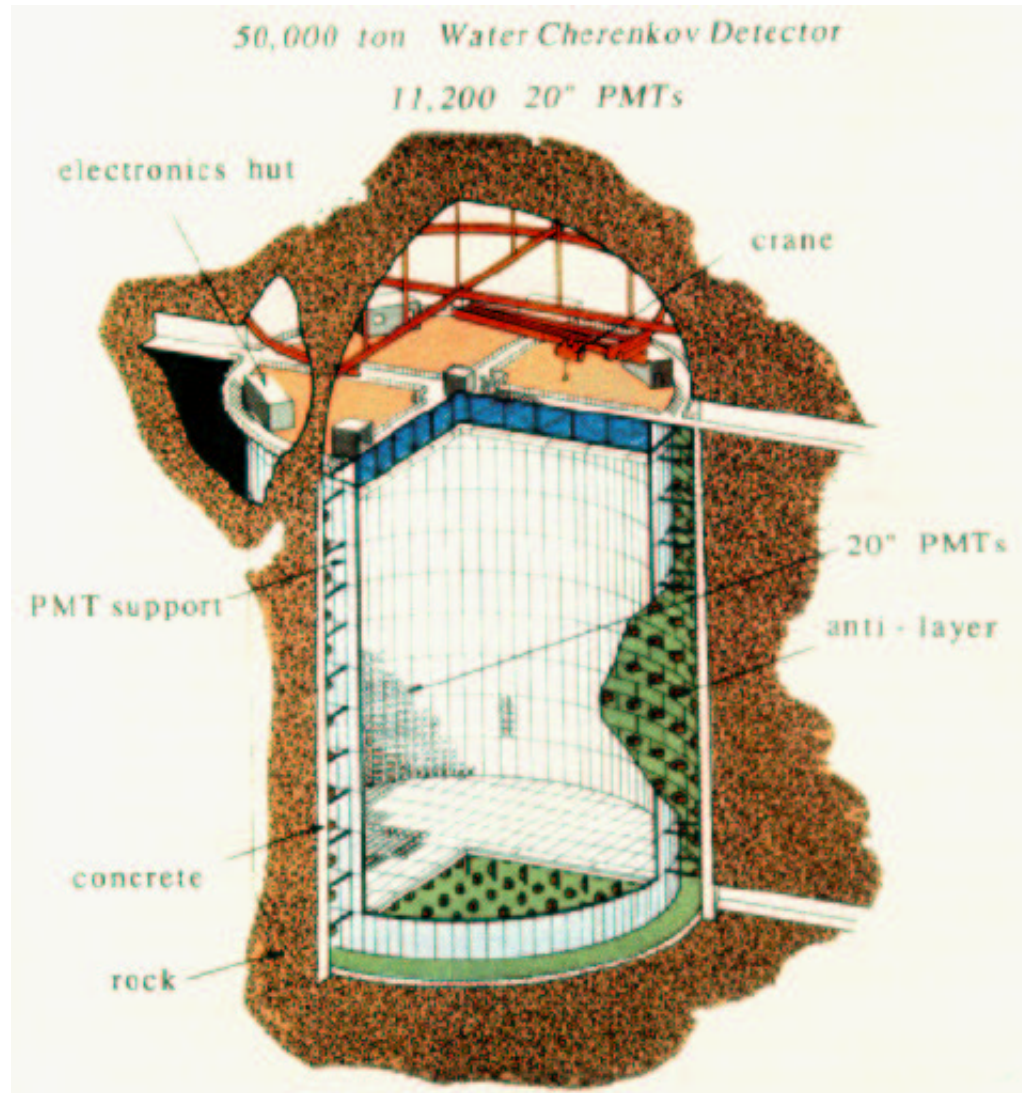
# Neutrino atmosferyczne

## Eksperyment Super-Kamiokande

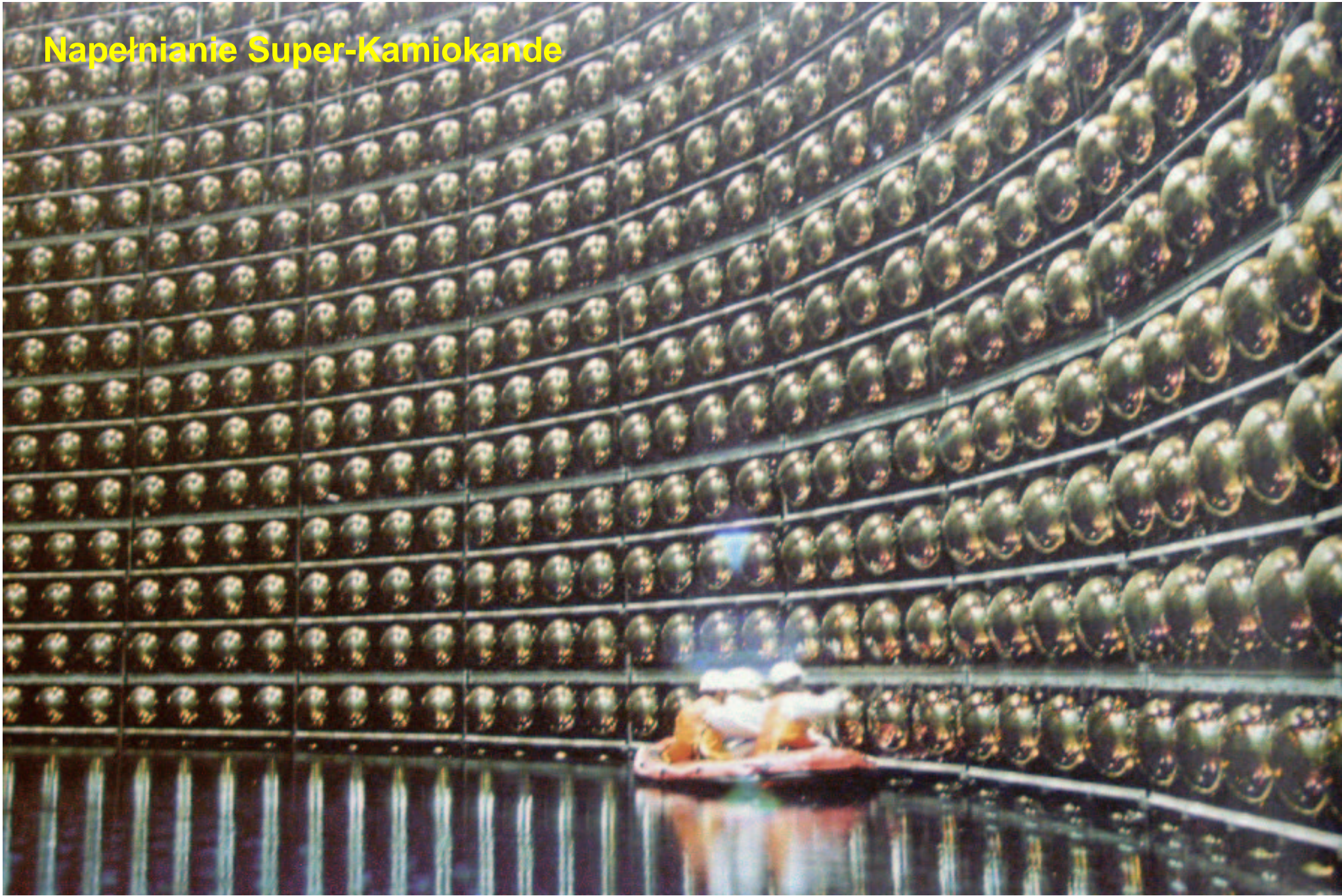
Japonia, w starej kopalni, 1 km pod górą Kamioka, komora o wysokości 40 m i średnicy 40 m, wypełniona wodą

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

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



## Napełnianie Super-Kamiokande

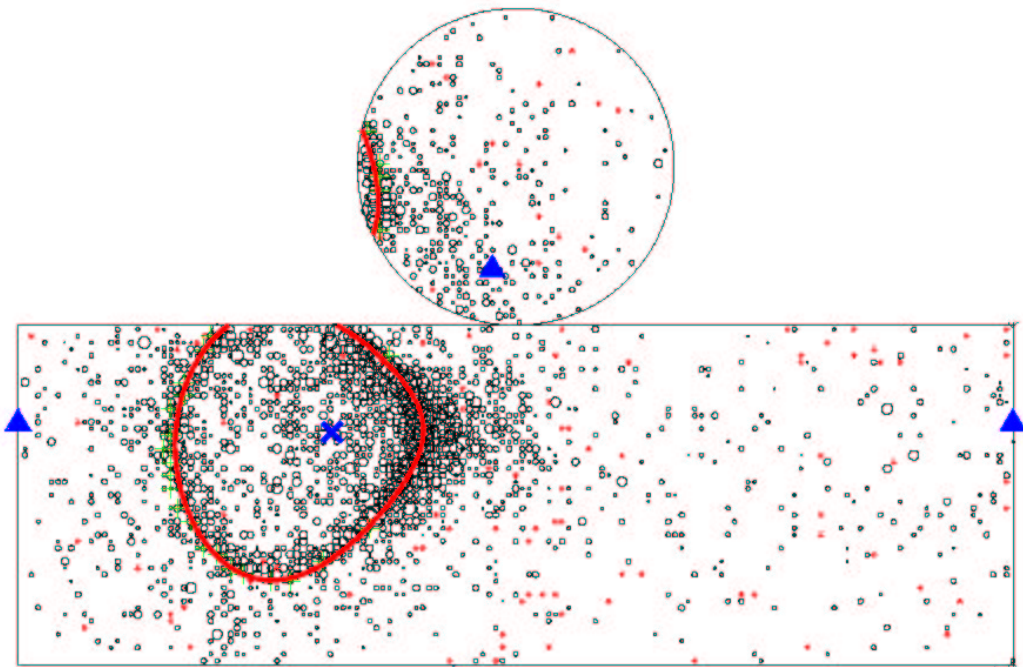


# Super-Kamiokande

## Neutrino elektronowe

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

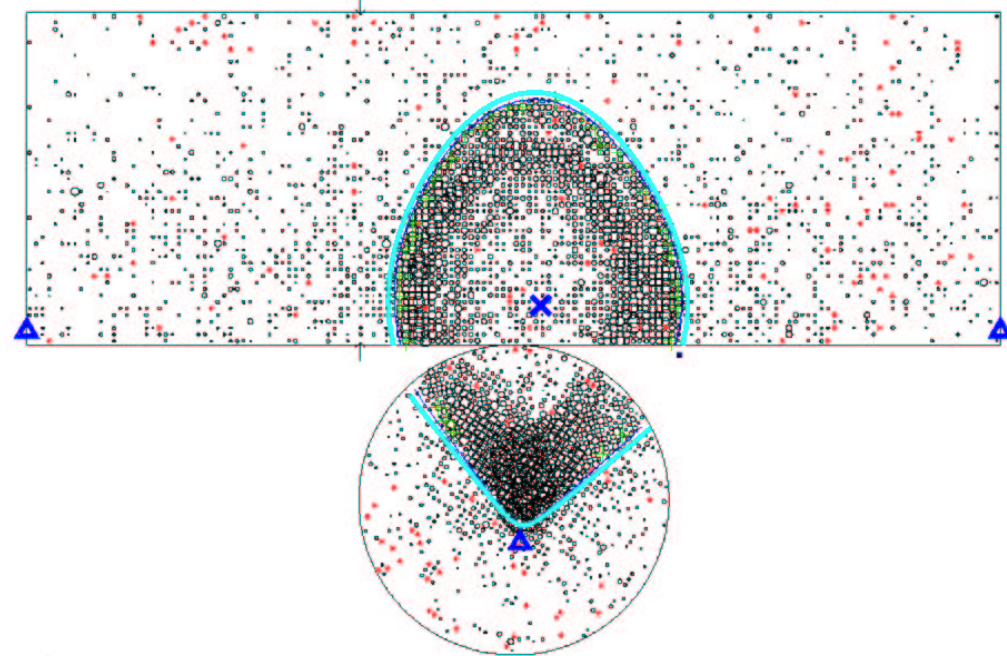
Krótki zasięg elektronu - “cienki” pierścień



## Neutrino mionowe

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

Długa droga w wodzie - “gruby” pierścień.

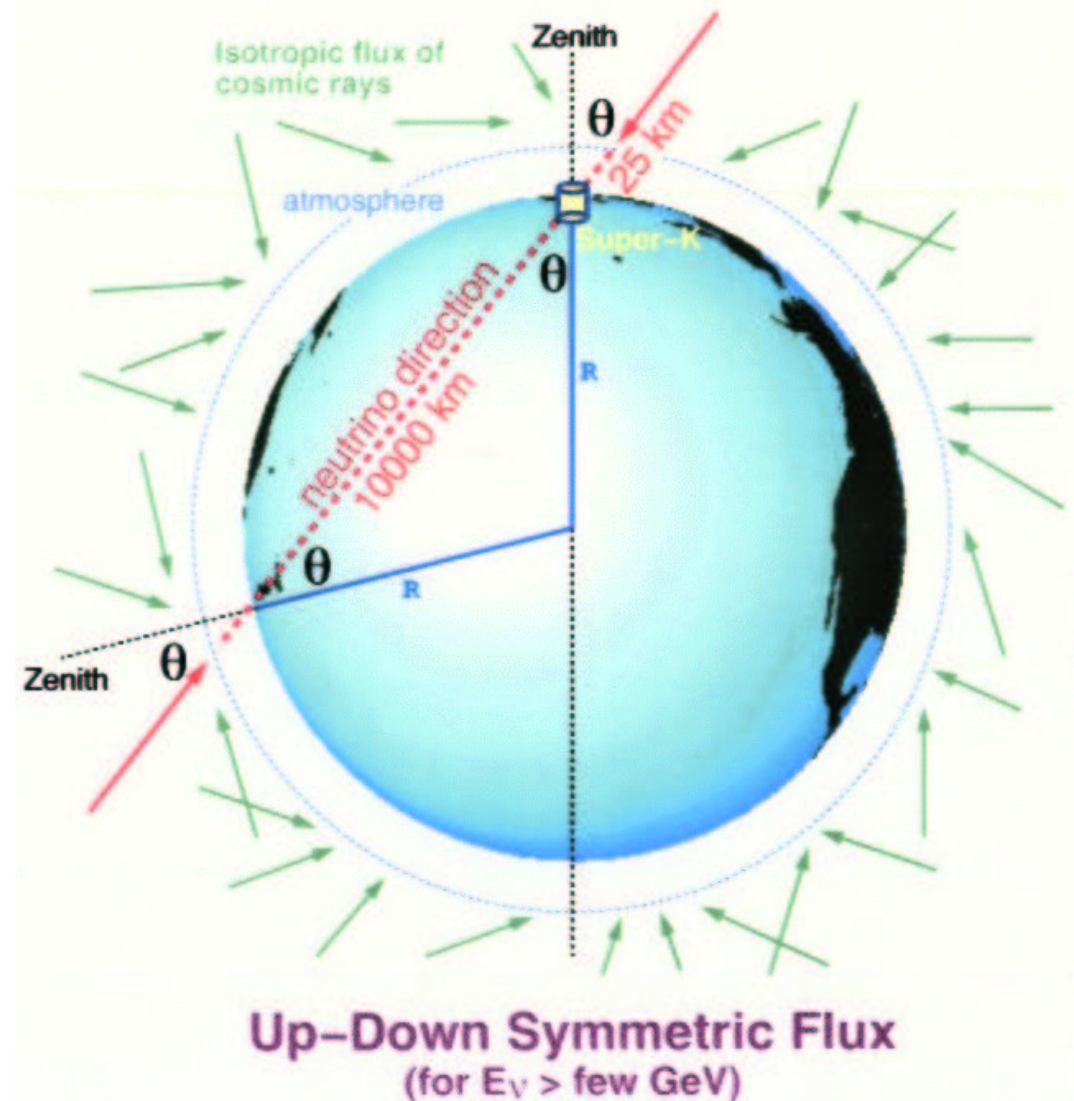


# Neutrino atmosferyczne

## Rozkład kątowy

Pierwotne promieniowanie kosmiczne jest izotropowe.

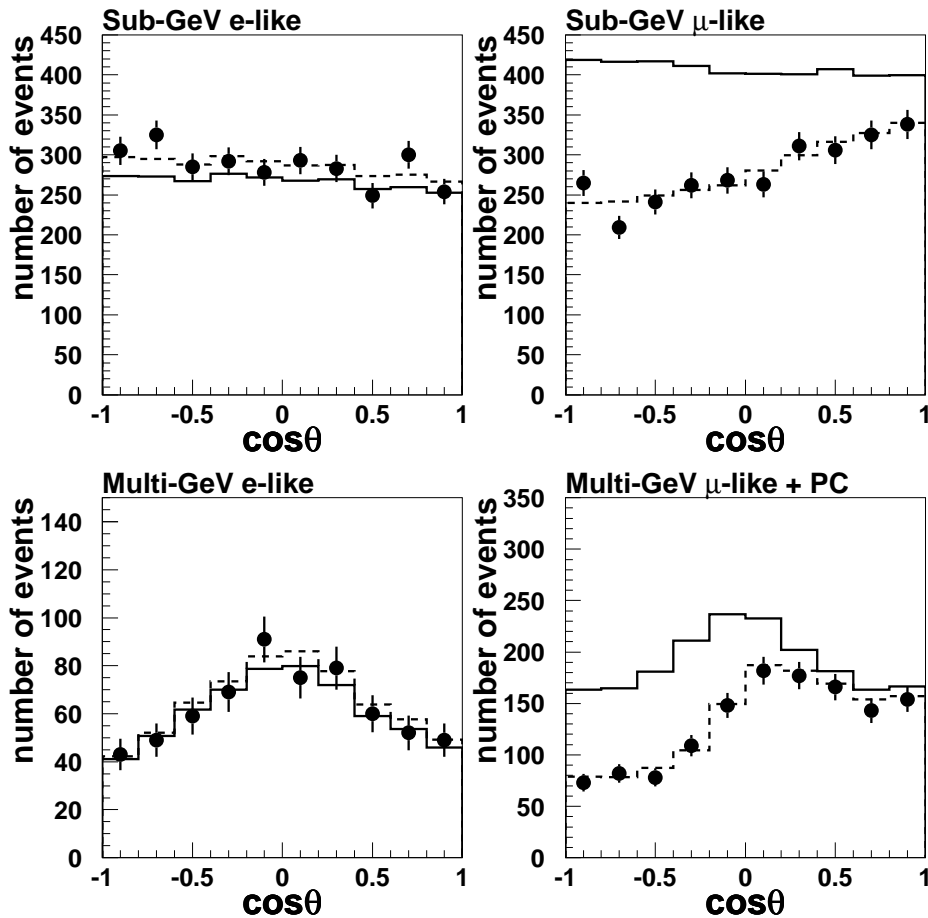
Ponieważ neutrino praktycznie nie oddziałują z Ziemią, strumienie neutrin “do dołu” i “do góry” powinny być sobie **równe**.



# 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  $\nu_{\mu}$  lecących od dołu!

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

Czy neutrino 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 neutrin 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

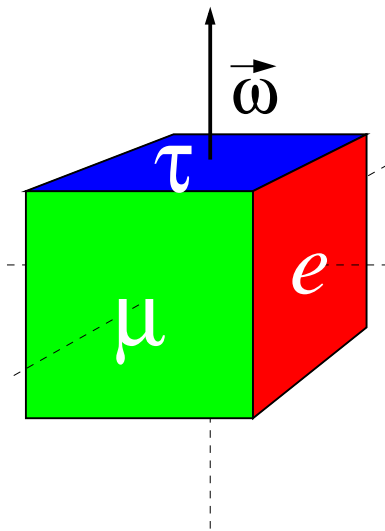
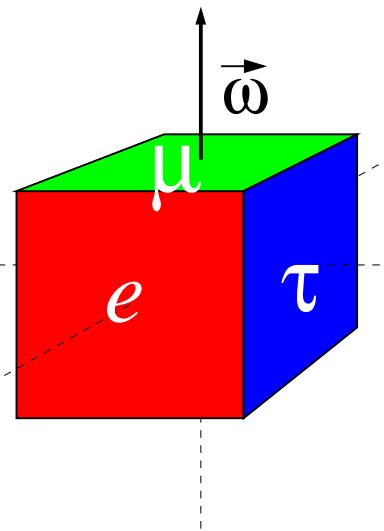
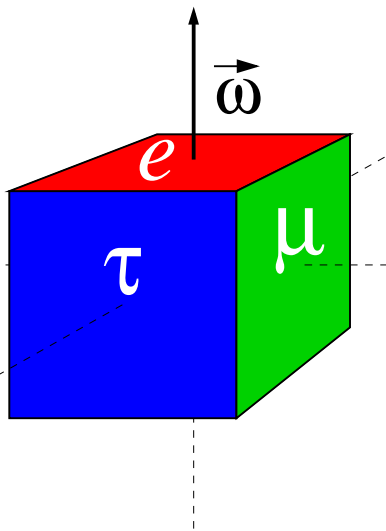
Wyobraźmy sobie, że neutrino to... wirujący kolorowy sześcián

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**

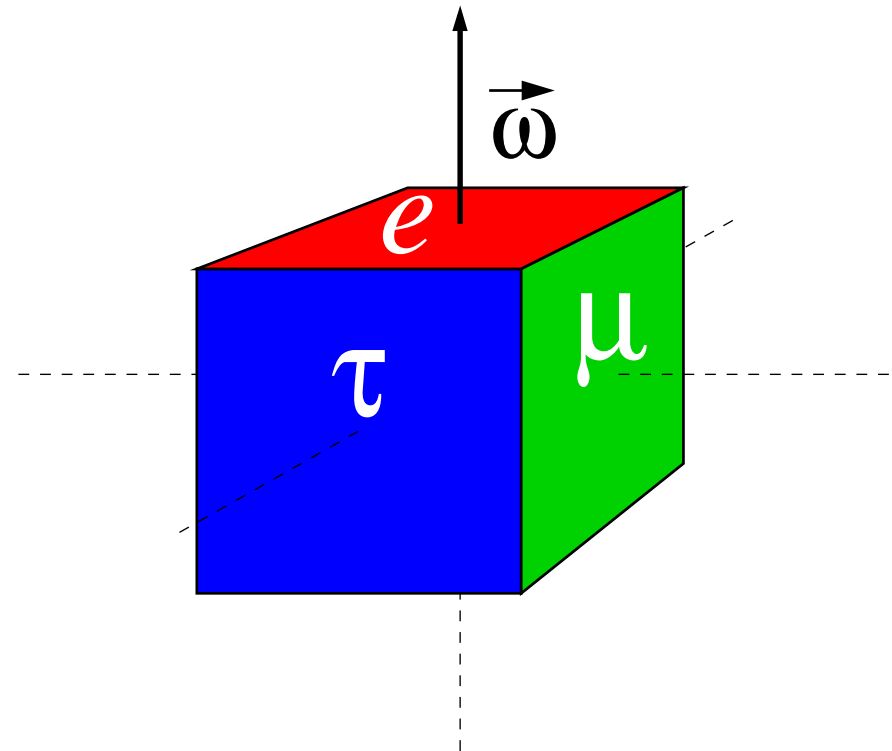
⇒ w naszym modelu sześcian wiruje wokół osi symetrii prostopadłej do czerwonej ściany

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)

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

⇒ 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...

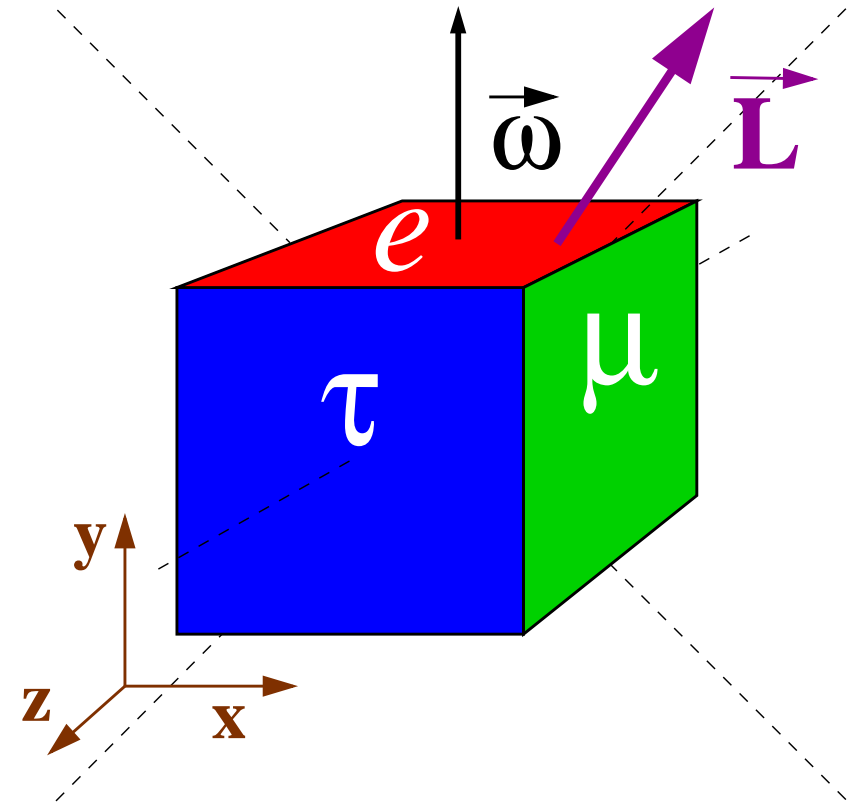
Rozkład masy wewnątrz sześcian  
nie musi być równomierny !!!

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

⇒ osie główne obrócone względem osi symetrii

⇒ różne momenty bezwładności względem osi głównych

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



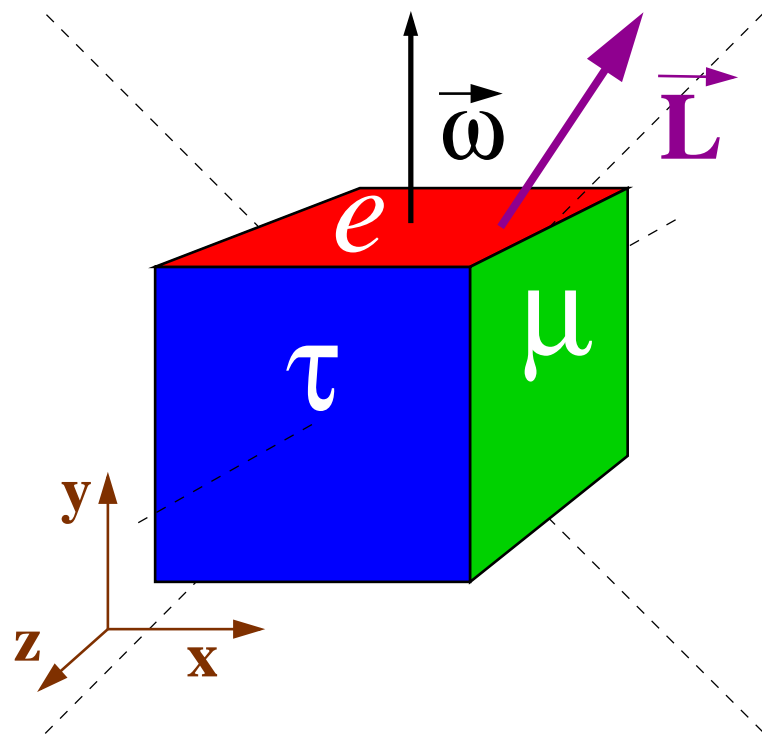
$$\vec{\omega} \nparallel \vec{L} = \text{const}$$

# Model

Sześcián będzie wirował zgodnie z równaniami Eulera.

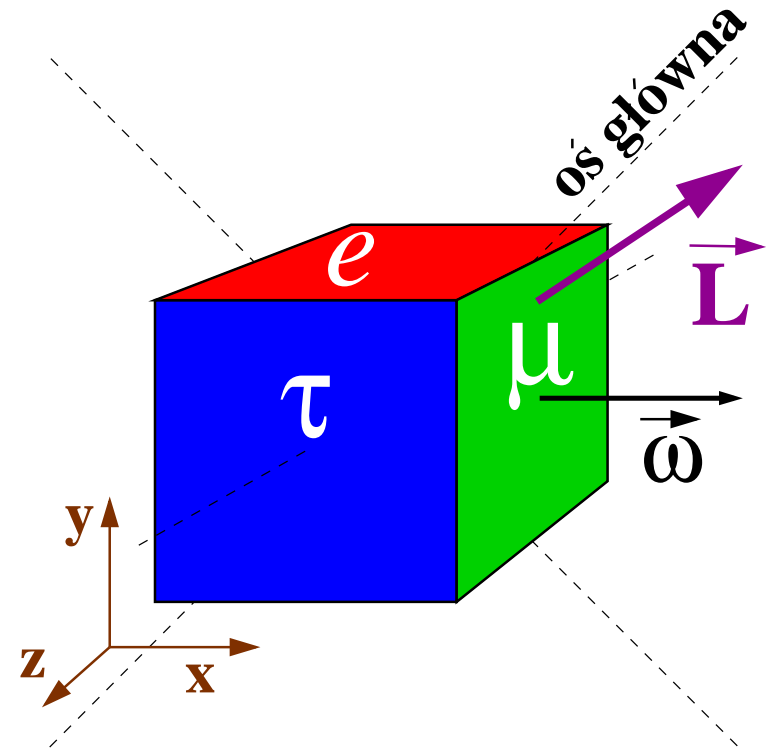
W układzie związanym z sześciánem  $\Rightarrow$  precesja wektorów  $\vec{L}$  i  $\vec{\omega}$

Na poszátku



neutrino elektronowe

Po pewnym czasie



neutrino mionowe

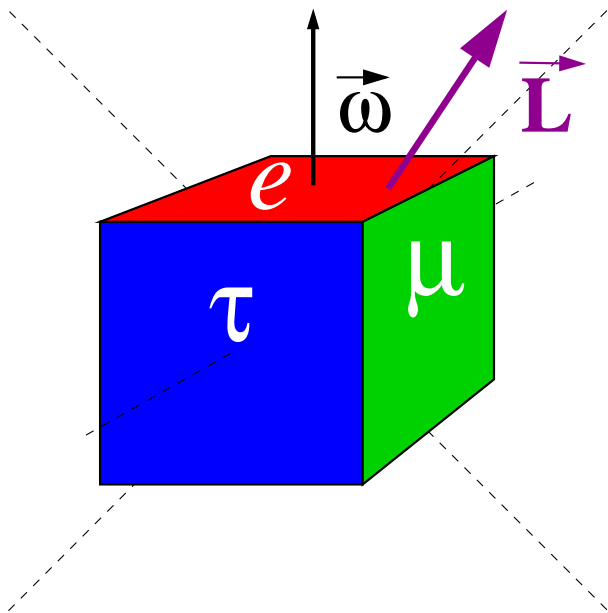
# Model

W układzie laboratoryjnym: ruch wirowy sześciangu

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

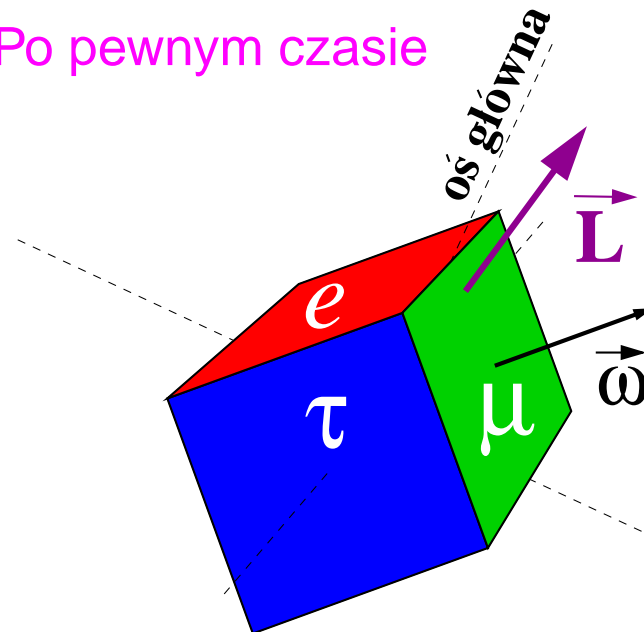
⇒ powolne przesuwanie  $\vec{\omega}$  ze ściany na ścianę

Na początku



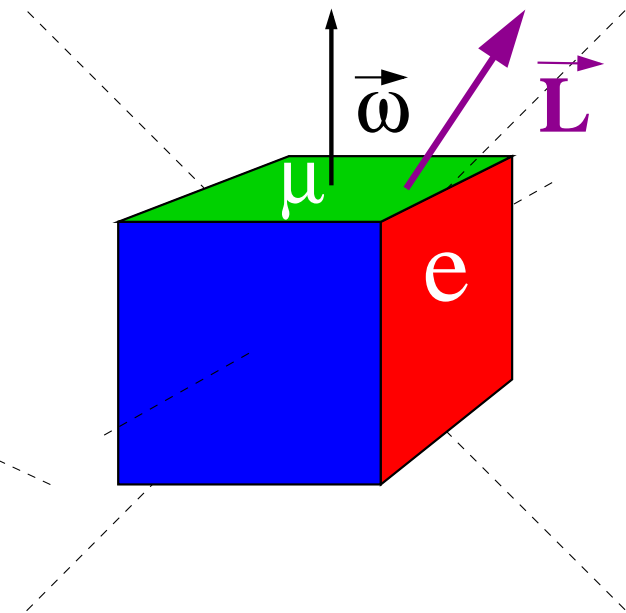
neutrino elektronowe

Po pewnym czasie



neutrino mionowe

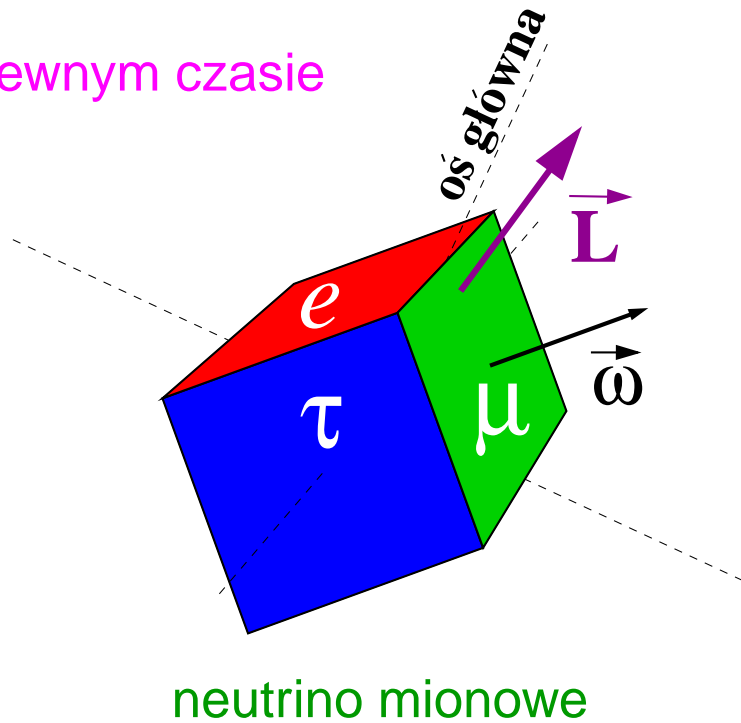
Chwilę później



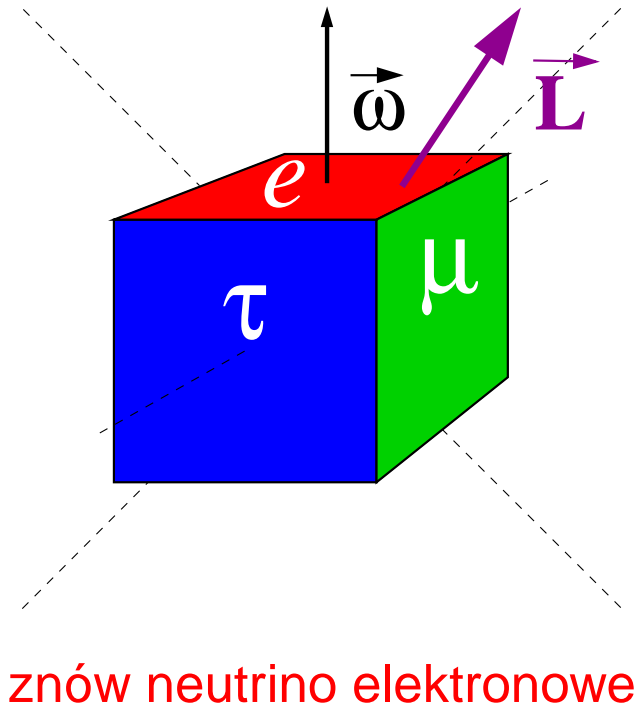
neutrino mionowe

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

Oczywiście sześćcian 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  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$  nie “pokrywają się” z prawdziwymi, fizycznymi cząstkami
- ⇒ trzeba je “rozłożyć” na składowe odpowiadające stanom fizycznym  $\nu_1, \nu_2, \nu_3$  (o ustalonej masie !)

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

Dla dwóch neutrino, np.  $\nu_\mu$  i  $\nu_\tau$ , które są mieszankami stanów fizycznych  $\nu_1$  i  $\nu_2$ :

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

$\theta_{12}$  - kąt mieszania; w naszym modelu sześciianu 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”

⇒  $\nu_\mu$  może całkowicie zamienić się w  $\nu_\tau$

# Oscylacje

Częstość “precesji” w układzie dwóch neutrin: ( $E$  - energia neutrino,  $m_1, m_2 \ll E$ )

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

Prawdopodobieństwo, że wyprodukowane  $\nu_\mu$  zamieni się w  $\nu_\tau$ :

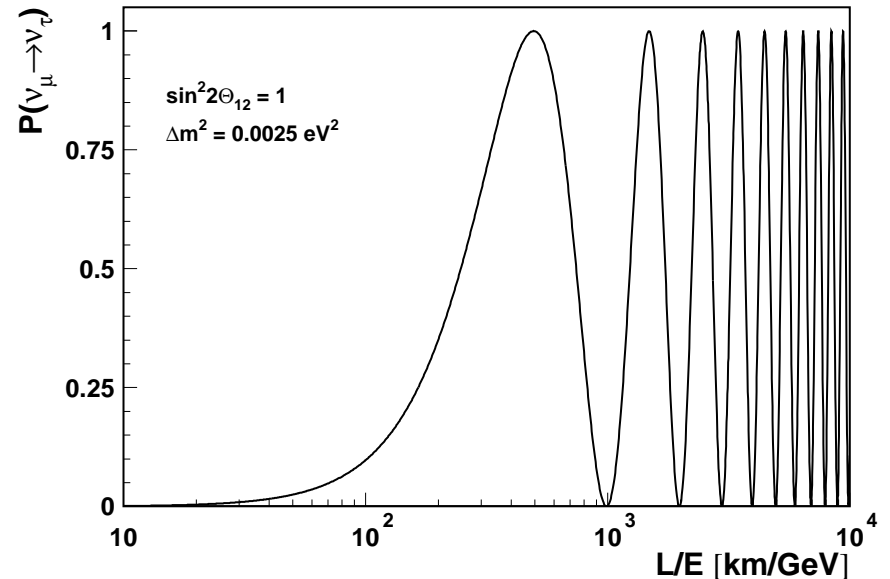
$$P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau}(t) = \frac{1}{2} \sin^2(2\theta_{12}) [1 - \cos(\Omega t)]$$

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  $\nu_e \leftrightarrow \nu_\tau$

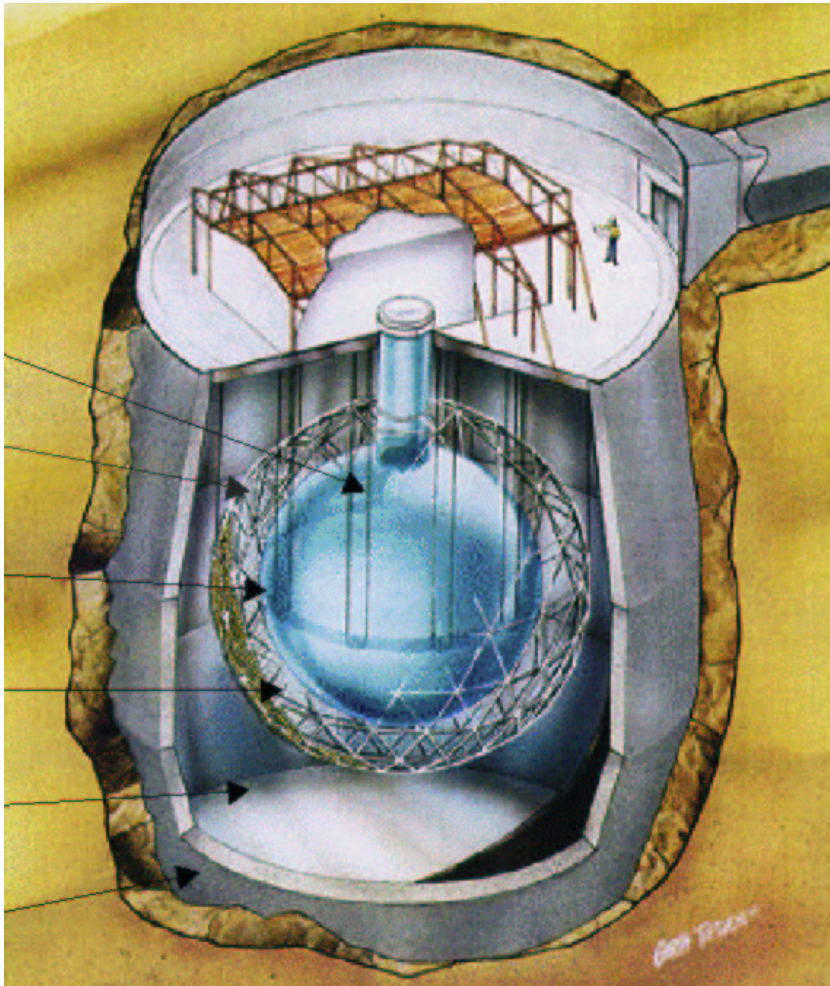
$$\Delta m_{e\tau}^2 \sim 0.0001 \text{ eV}^2$$

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

$\Rightarrow$  **neutrino muszą mieć masy rzędu 0.01 eV**

# SNO

Oscylacje neutrin słonecznych zostały niedawno ostatecznie wyjaśnione przez 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.

Dzięki wykorzystaniu 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  $10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ):

$$\Phi_{CC} = 1.76 \pm 0.05 \pm 0.09 = \Phi_{\nu_e}$$

$$\begin{aligned} \Phi_{ES} &= 2.39 \pm 0.24 \pm 0.12 \\ &= \Phi_{\nu_e} + \varepsilon(\Phi_{\nu_\mu} + \Phi_{\nu_\tau}) \\ &\quad (\text{SK} : 2.32 \pm 0.09) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi_{NC} &= 5.09 \pm 0.44 \pm 0.46 \\ &= \Phi_{\nu_e} + \Phi_{\nu_\mu} + \Phi_{\nu_\tau} \end{aligned}$$

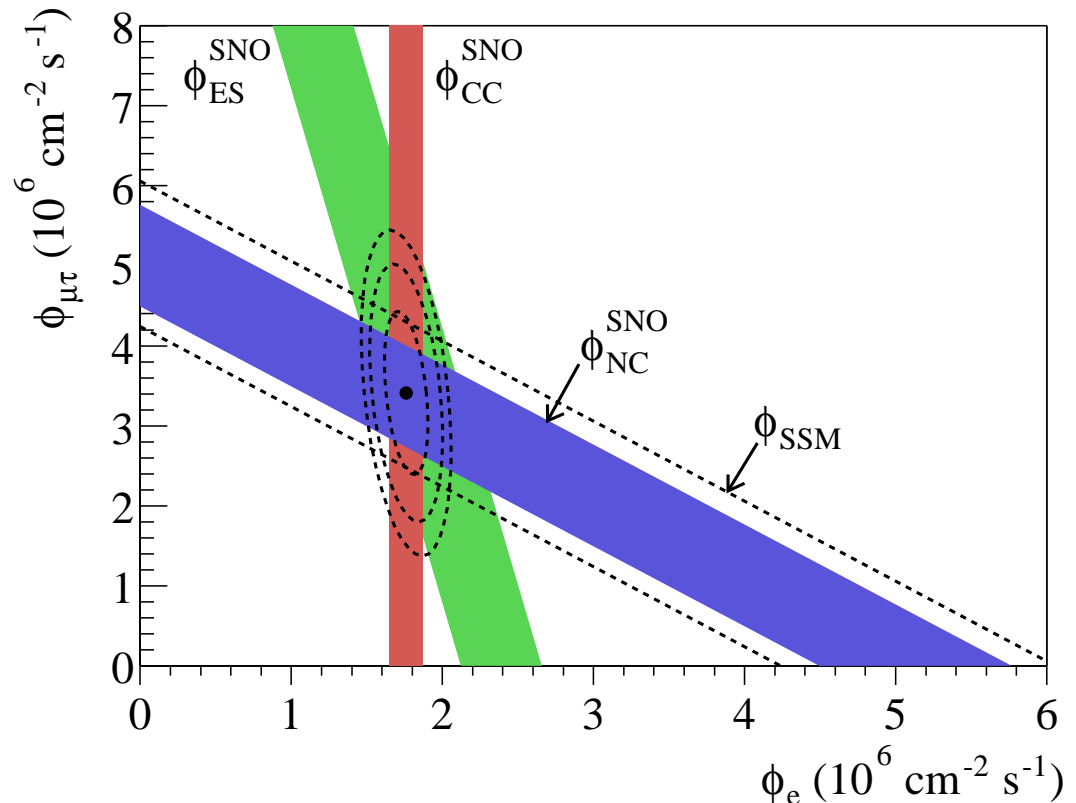
Przewidywania SSM

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

Dobra zgodność dla całkowitego strumienia neutrin.

W miejsce “brakujących”  $\nu_e$  obserwujemy  $\nu_\mu$  i  $\nu_\tau$

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



# 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 fotonowielaczy**.

# Kamland

## Wyniki

Liczba zarejestrowanych przypadków oddziaływania **anty-neutrino elektronowych**:

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

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

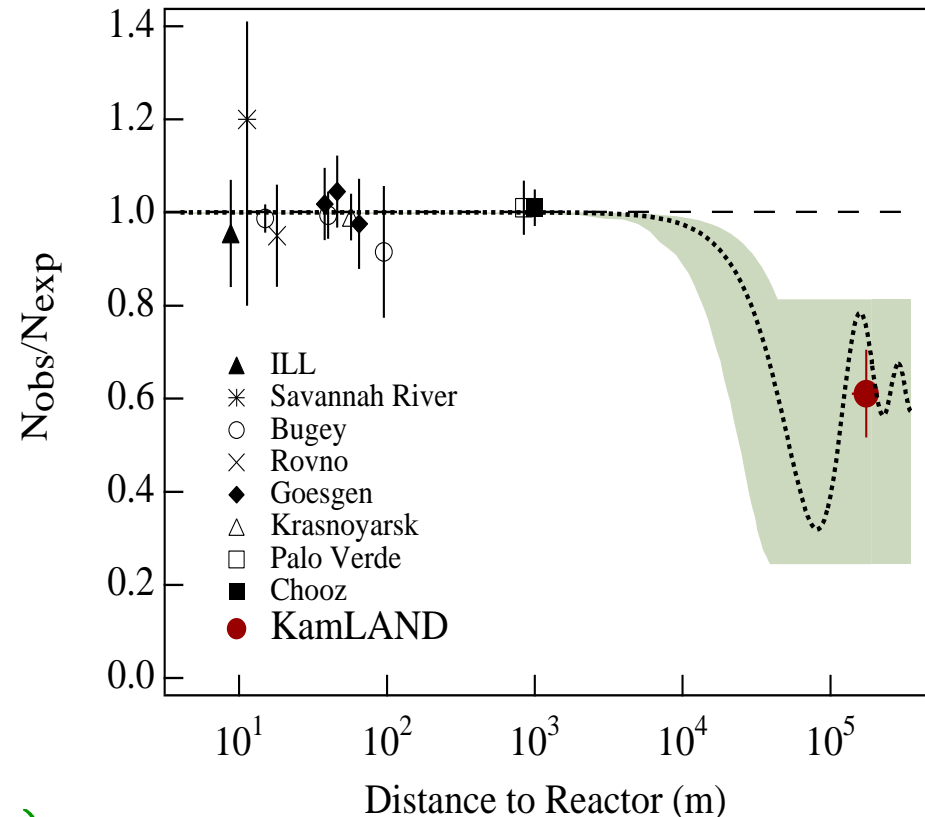
Wyraźny efekt **“znikania”**  $\bar{\nu}_e$  ( $> 3\sigma$ )

Dopasowanie parametrów oscylacji:

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

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

Wyniki zgodne z wynikami dla neutrino słonecznych (krzywa kropkowana)



# Oscylacje neutrin

## Podsumowanie

Stany fizyczne neutrin są **mieszkankami** stanów o ustalonym **zapachu**.

Prowadzi to do **oscylacji neutrin**, które zostały dokładnie zmierzone w dwóch “sektorach”:

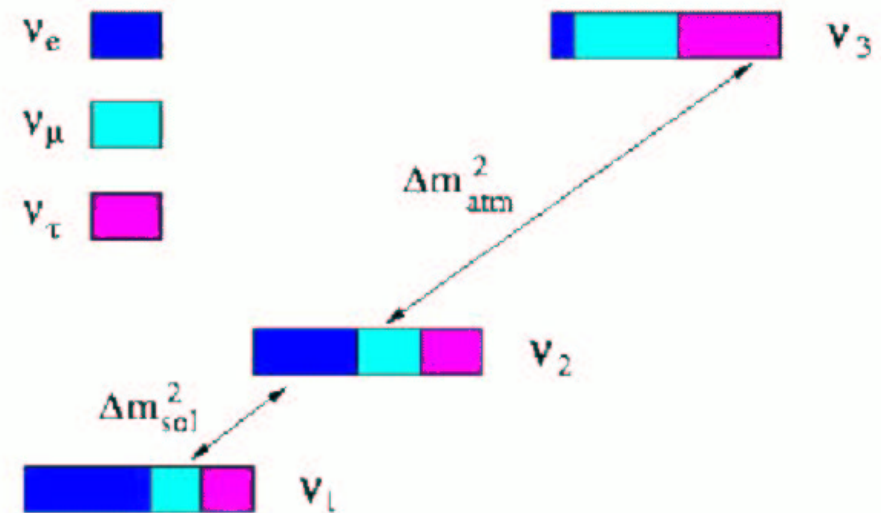
- neutrina **atmosferyczne** + K2K

$$\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau: \quad \Delta m_{\mu\tau}^2 \sim 0.0025 \text{ eV}^2$$

- neutrina **słoneczne** + KamLAND

$$\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu (?): \quad \Delta m_{e\mu}^2 \sim 0.00006 \text{ eV}^2$$

Widmo mas (jedna z możliwości):



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



# Oscylacje neutrin

## Podsumowanie

W ciągu ostatnich kilka lat dokonana się “rewolucja” w naszym spożeniu na neutrina.

Okazało się, że neutrina mają 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 ?