

Neutrino

Elementy fizyki cząstek elementarnych

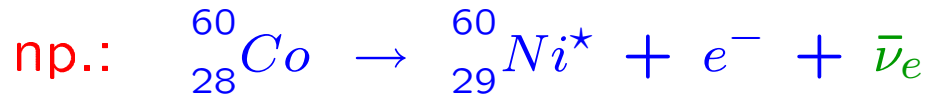
Wykład VIII

- Oddziaływania neutrin
- Neutrino atmosferyczne
- ⇒ Eksperyment Super-Kamiokande
- Oscylacje neutrin
- Neutrino słoneczne
- ⇒ Eksperyment SNO

Neutrino

Neutrino elektronowe

Zaproponowane przez Pauliego do wyjaśnienia pozornego **naruszenie** zasady zachowania energii w **rozpadzie β** :



na poziomie cząstek:



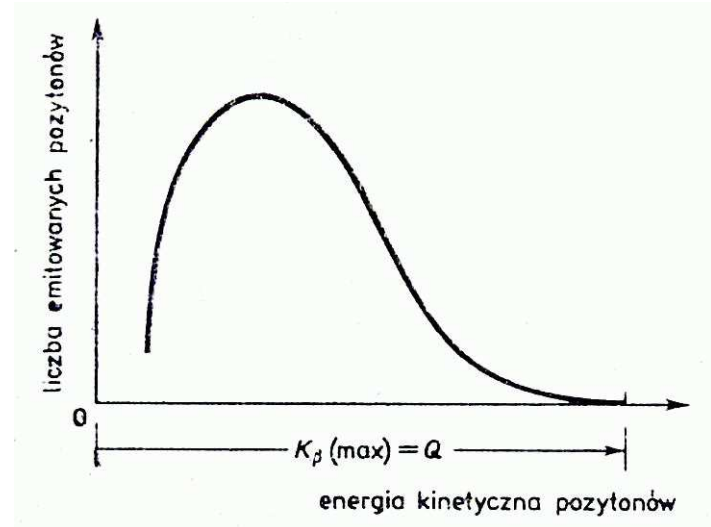
Postulowane właściwości:

- bardzo słabo oddziałuje z materią
- ma zaniedbywalną masę

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

Na masy neutrin istnieją też liczne ograniczenia **astrofizyczne** i **kosmologiczne**

Ciągłe widmo energii:



Ograniczenia na masy (95% CL):

z bezpośredniego pomiaru

$$m_{\nu_e} < 2.2 \text{ eV} \approx 4.3 \cdot 10^{-6} m_e$$

$$m_{\nu_\mu} < 170 \text{ keV} \approx 0.0018 m_\mu$$

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

Neutrino

Przekrój czynny

Przekrój czynny na oddziaływanie neutrin z materią jest **niewyobrażalnie mały**.

Dla neutrin o energii rzędu 1 MeV

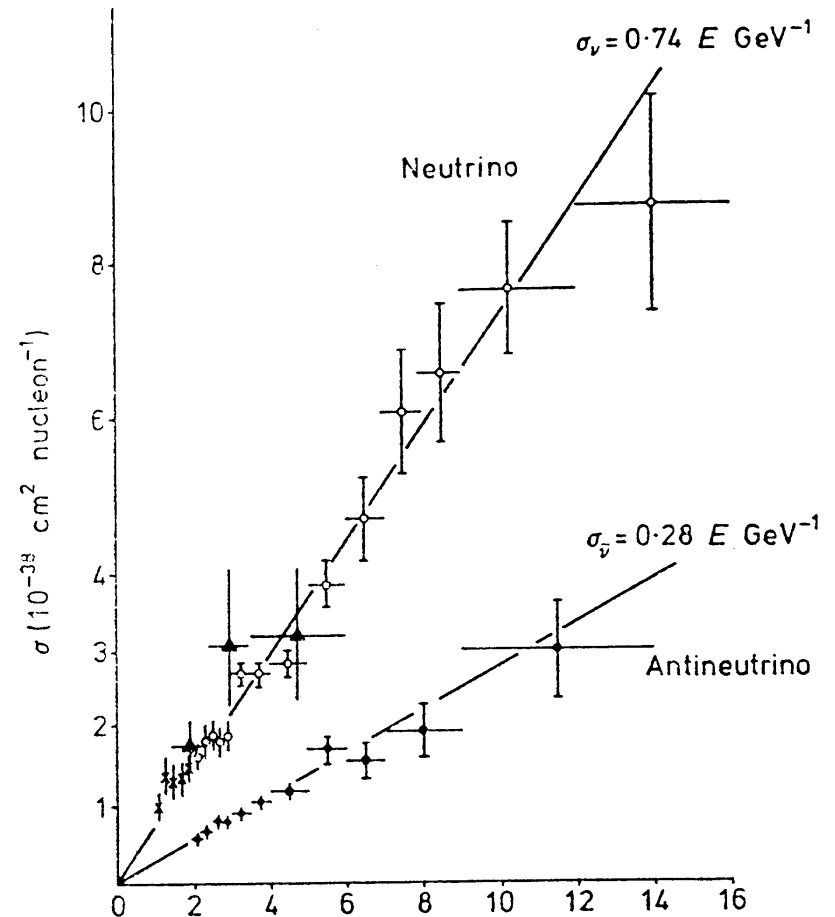
$$\sigma_{\nu N} \sim 10^{-43} \text{ cm}^2 = 10^{-19} \text{ b}$$

Odpowiada to średniej **drodze swobodnej** w materii rzędu **lat świetlnych !!!**

Przekrój czynny na oddziaływanie neutrin z materią **rośnie z energią**, ale tylko liniowo...

Badanie oddziaływań neutrin możliwe jest tylko w oparciu o **bardzo intensywnego źródła...**

Słońce, promieniowanie kosmiczne, reaktory jądrowe, oddziaływania cząstek...



Neutrino

Wiązki neutrin

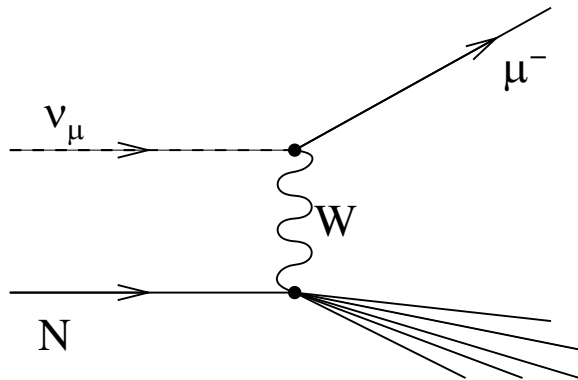
Neutrino powstają w **rozpadach pionów** i **kaonów**, które potrafimy licznie produkować w **oddziaływaniach hadronów** (np. zderzając protony z tarczą):



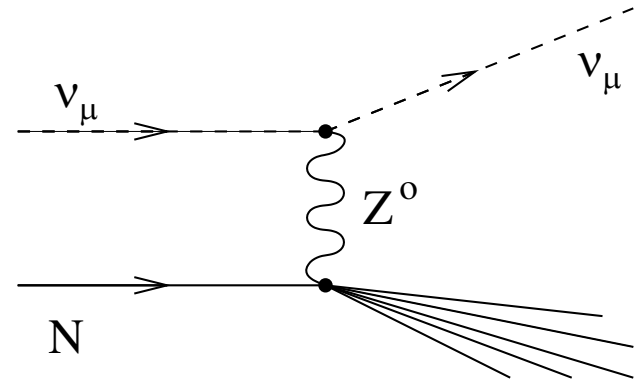
Wytwarzanie intensywnych wiązek **neutrin** i **antyneutrin** z rozpadów wiązek π^\pm i K^\pm
⇒ **przełom** w badaniach oddziaływań słabych (≥ 1963)

W wyniku oddziaływania **neutrin mionowych** w detektorze

na ogół **produkowany** jest
wysokoenergetyczny **mion**
⇒ oddziaływania typu **CC**:



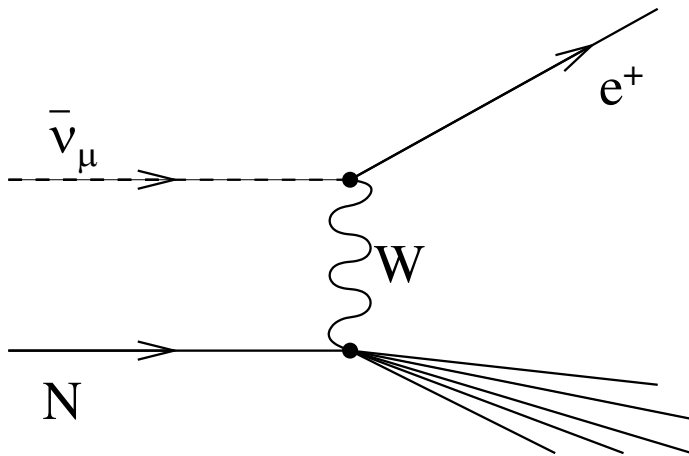
choć obserwujemy też oddziaływania
bez produkcji **mionu**
⇒ oddziaływania typu **NC**:



Neutrino

Zachowanie liczby leptonowej

Nie obserwujemy natomiast oddziaływań $\bar{\nu}_\mu$ z produkcją pozytonu:



⇒ zachowanie liczby leptonowej

Model Standardowy

W Modelu Standardowym przyjmowaliśmy do niedawna, że

- neutrino są bezmasowe i
- liczba leptonowa jest ściśle zachowana

Oba te postulaty wynikały tylko z danych doświadczalnych

Ogólna teoria nie narzuca zachowania liczby leptonowej !

Neutrina atmosferyczne

Promieniowanie kosmiczne

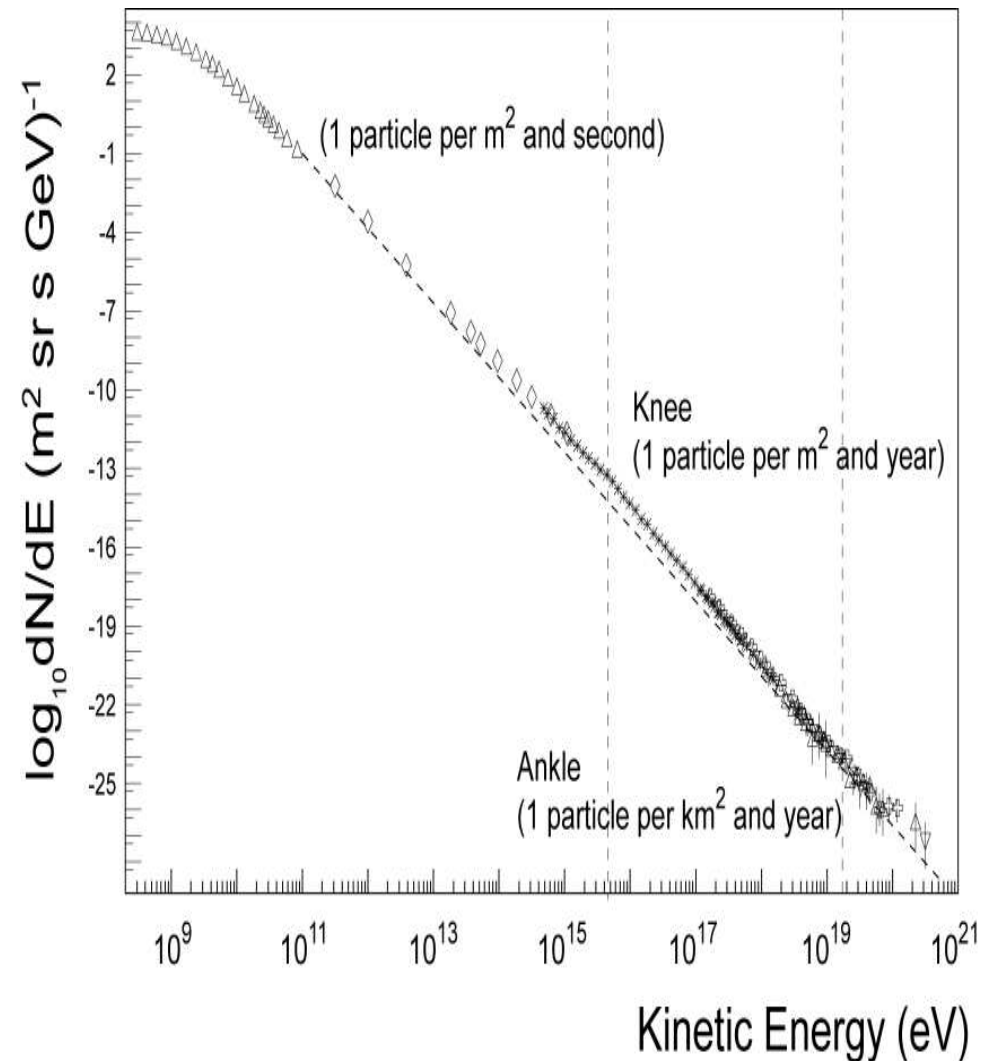
Przestrzeń kosmiczna wypełniona jest cząstkami o energiach dochodzących do 10^{12} GeV (10^{21} eV).

⇒ 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 $\ll 1\%$

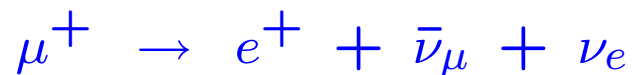
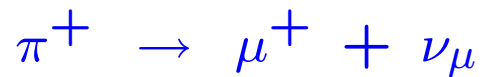


Neutrina atmosferyczne

Produkcja

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

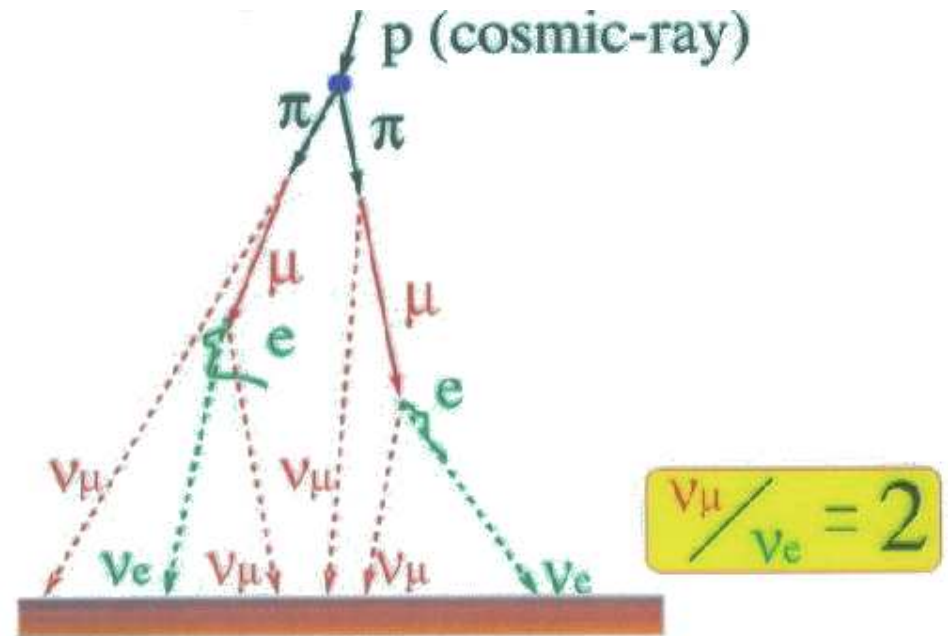
W wyniku **rozpadów**:



(podobnie dla π^- / μ^-)

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

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

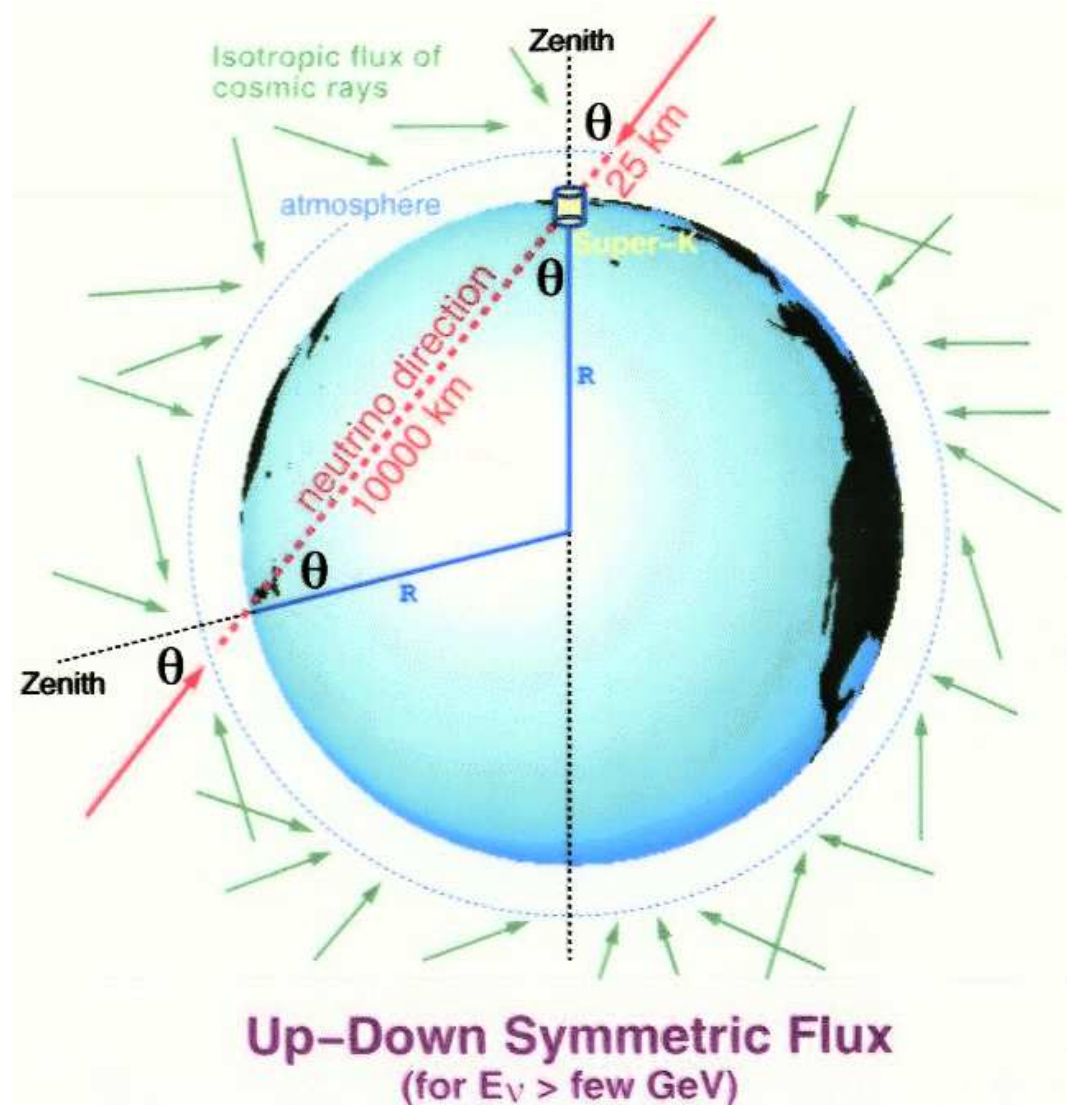


Neutrina atmosferyczne

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.



Neutrino atmosferyczne

Eksperyment Super-Kamiokande

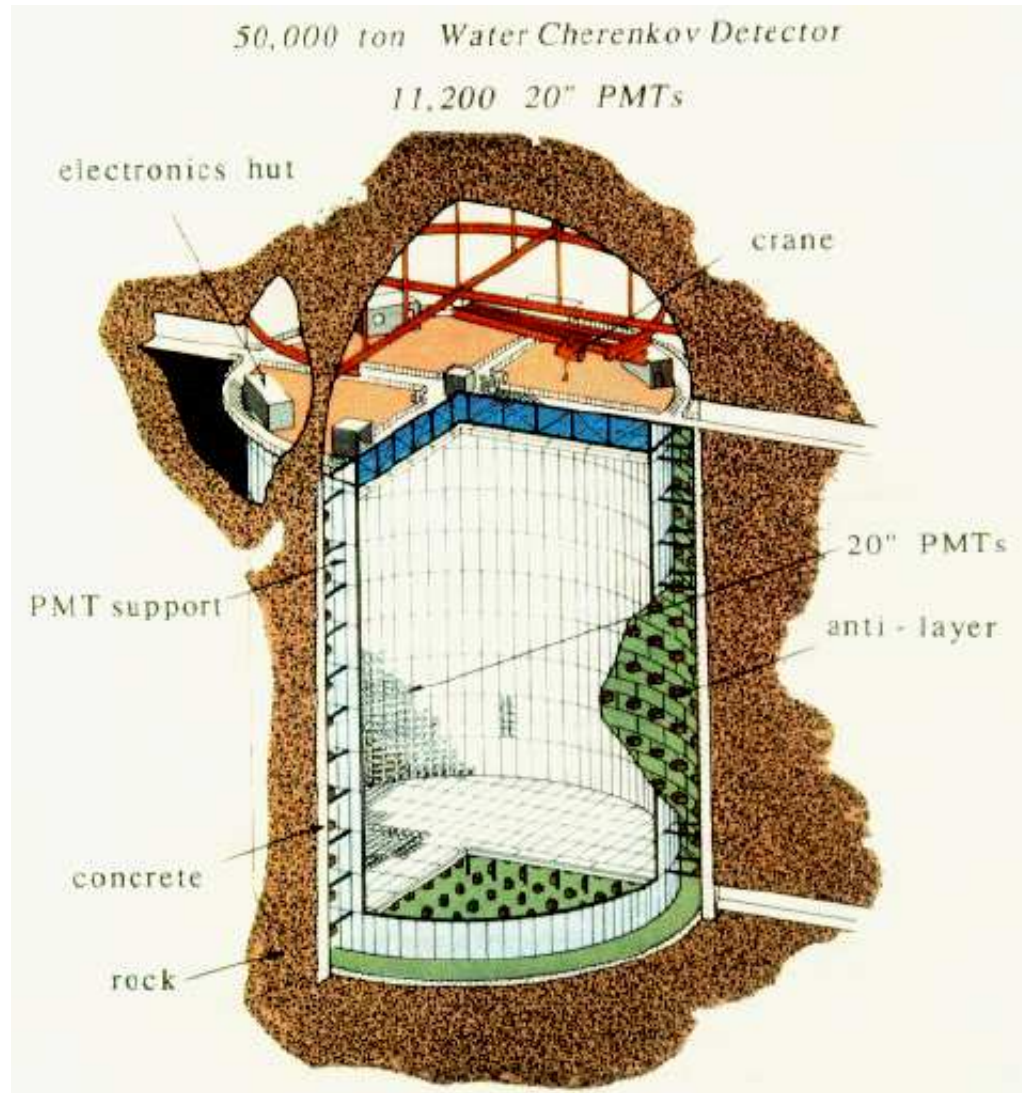
Japonia, w starej kopalni, 1 km pod górą Kamioka, komora o wysokości 40 m i średnicy 40 m, wypełniona **wodą**

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

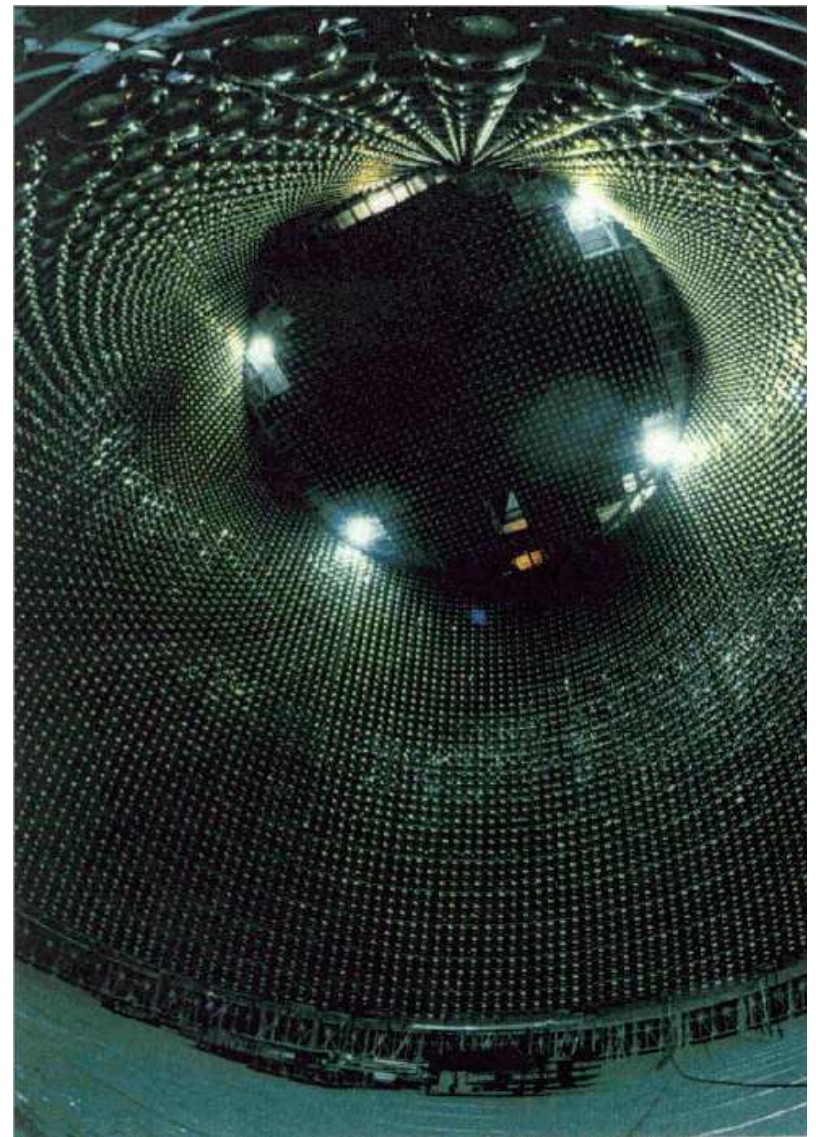
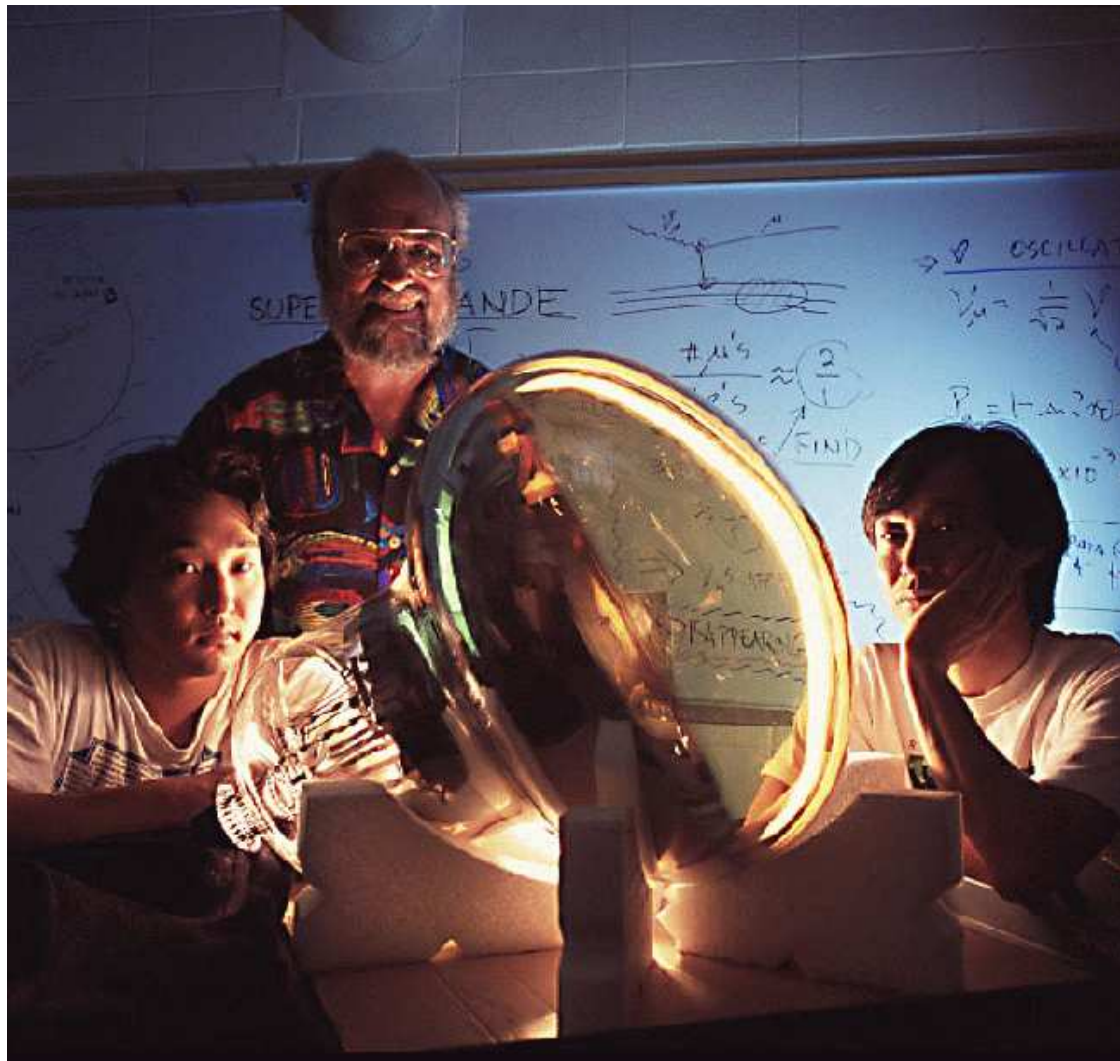
rejestrowane jest

promieniowanie Czerenkowa

emitowane w kierunku ruchu przez cząstki poruszające się z prędkością większą od prędkości światła (w wodzie)



Super-Kamiokande



Napelnianie

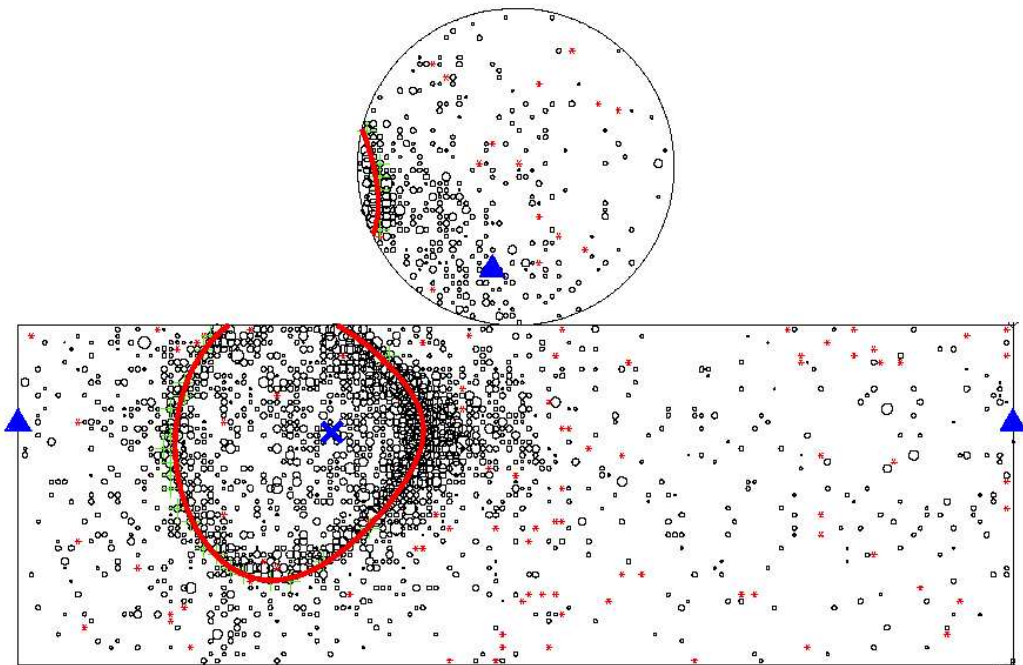


Super-Kamiokande

Neutrino elektronowe

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

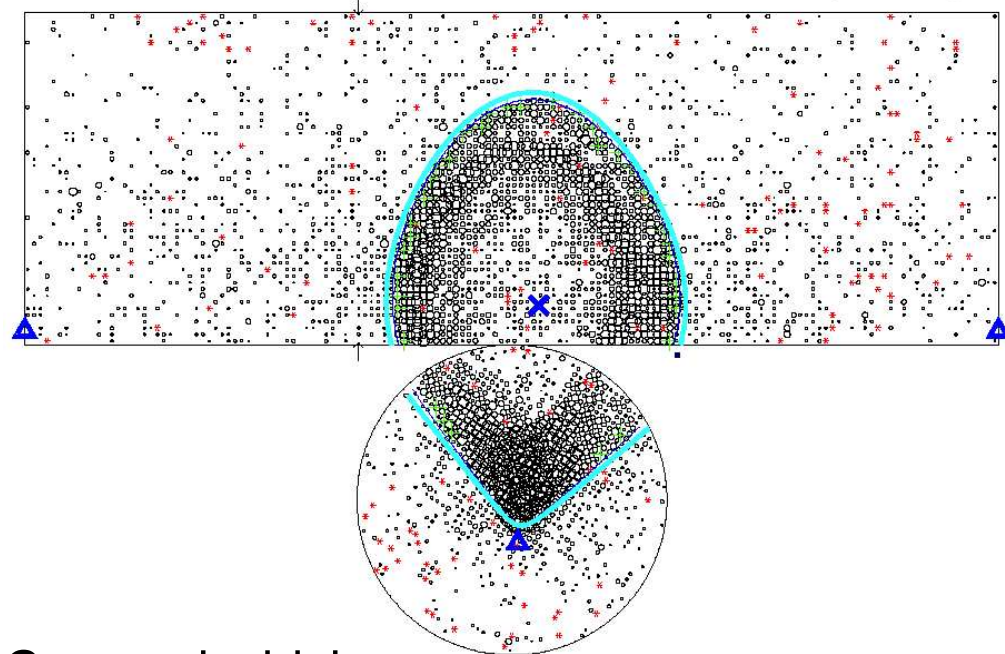
Krótki zasięg elektronu - “cienki” pierścień



Neutrino mionowe

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

Długa droga w wodzie - “gruby” pierścień.



Czasami widzimy
też opóźniony sygnał e^- z rozpadu μ^- .

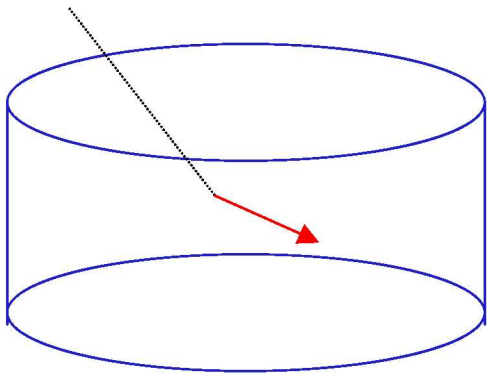
Super-Kamiokande

Klasyfikacja przypadków

Przypadki które rozpoznajemy jako **oddziaływania neutrin**:

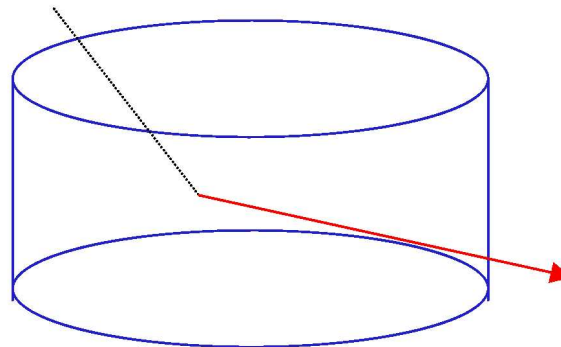
FC: Fully Contained

Elektron lub niskoenergetyczny mion **wyprodukowany** w detektorze **zatrzymuje się** w nim



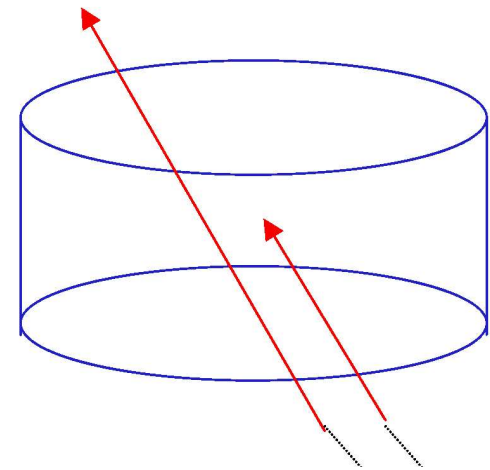
PC: Partially Contained

Wysokoenergetyczny mion **wyprodukowany** w środku **ucieka** z detektora



Upward

Miony **wpadające** do detektora **od dołu**



Super-Kamiokande

Wyniki

Zależność liczby obserwowanych przypadków **elektronowych** i **mionowych** od kierunku (przypadki typu FC) \Rightarrow

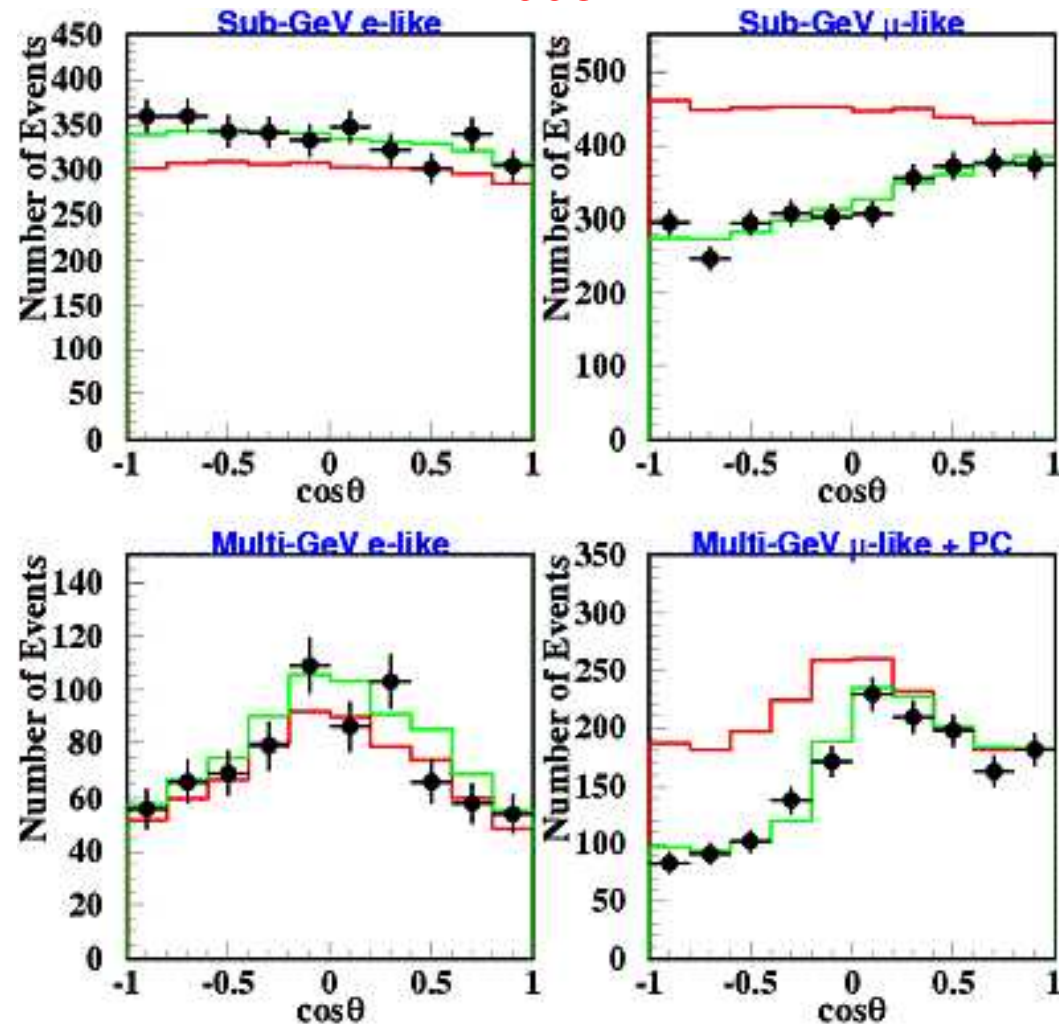
Zgodnie z oczekiwaniami **tyle samo** neutrin **elektronowych** leci **do dołu** ($\cos \theta > 0$) i **do góry** ($\cos \theta < 0$).

Neutrino mionowych **mniej** niż oczekujemy (**czerwona linia**) !

Wyraźnie **mniej** ν_μ lecących **od dołu** niż z góry !

zielona linia - dopasowanie modelu oscylacji

2003



Super-Kamiokande

Wyniki

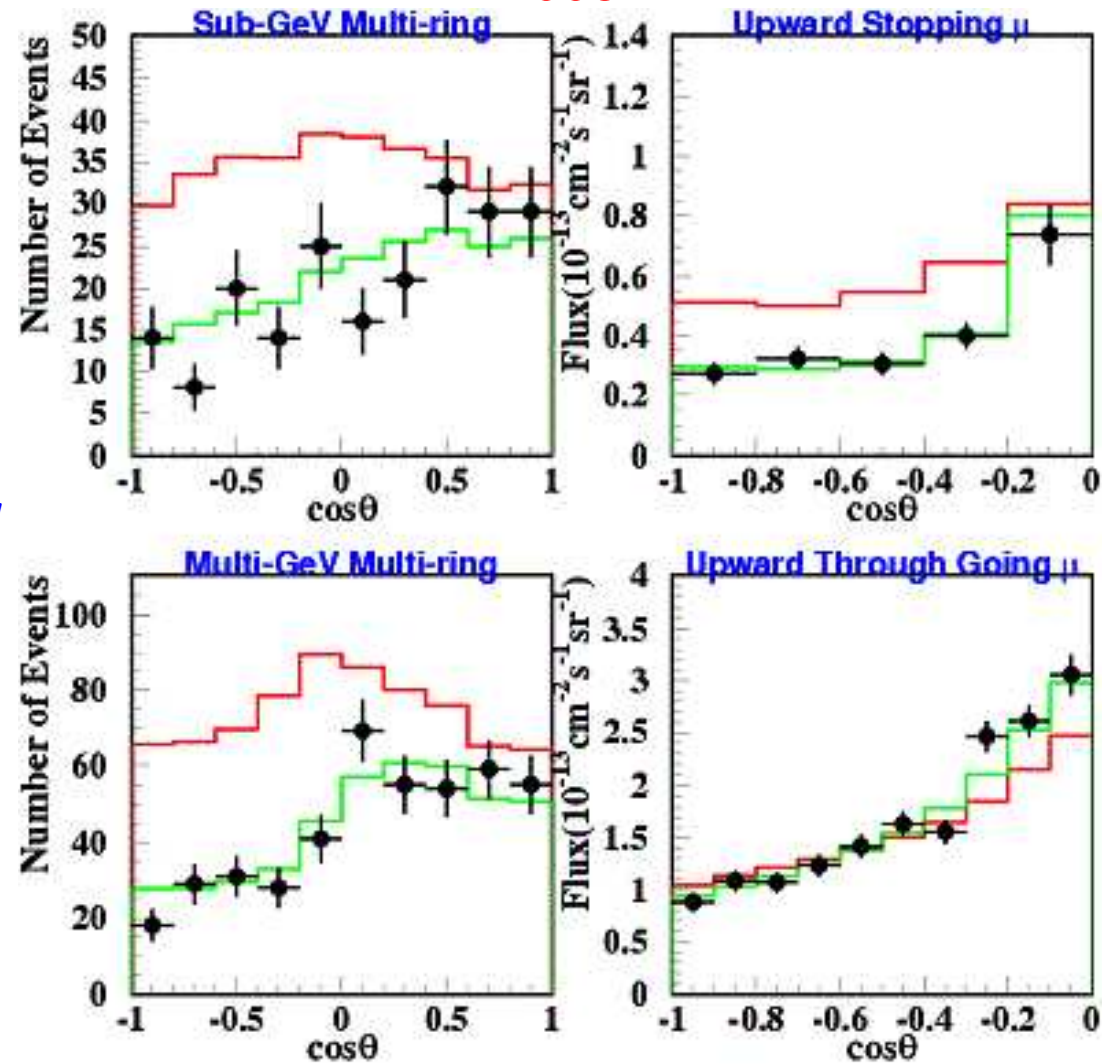
Efekt widoczny we **wszystkich** rozważanych **próbkach**.

Stosunek liczby przypadków **mionowych do elektronowych**:

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

Czy neutrino mionowe mogą **“znikać”** przechodząc przez Ziemię ?

2003



Inne eksperymenty

Super-Kamiokande jest **największym** istniejącym detektorem neutrin zebrała **najwięcej przypadków** \Rightarrow ma **najdokładniejsze** wyniki
(np. Super-K: 12785 contained + 1251 U_{μ} ; IMB: 935 contained + 624 U_{μ})

Efekt “**znikania**” neutrin mionowych widziany jest jednak także przez **inne eksperymenty** badające neutrina atmosferyczne:

Super-K	0.65 ± 0.05
IMB	$0.54 \pm 0.05 \pm 0.07$
Kamiokande	0.60 ± 0.06
Soudan-2	$0.68 \pm 0.11 \pm 0.06$

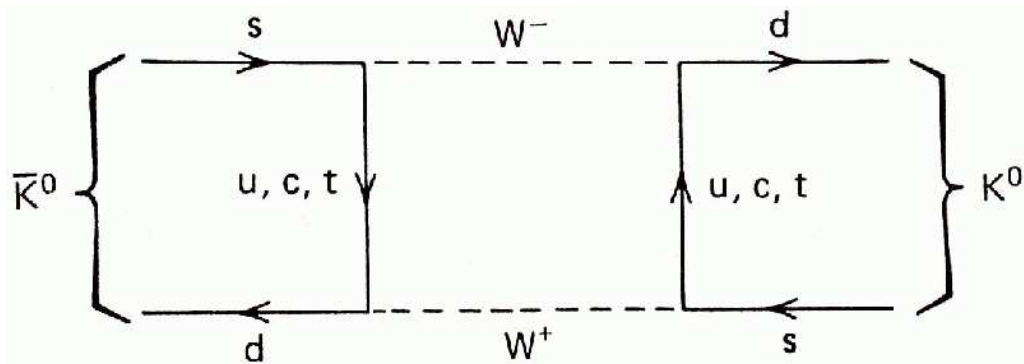
Jak można to wytłumaczyć ?!...

Oscylacje neutrin

Przypomnienie

Wiemy, że oddziaływania słabe nie zachowują dziwności, mieszają kwarki u i s .

Mezony \bar{K}^0 mogą się “przemieniać” w K^0 :



Cząstka wyprodukowana (w oddziaływaniach silnych) jako \bar{K}^0 może oddziaływać jako K^0 .

Dzieje się tak dlatego, że stany K^0 i \bar{K}^0 nie są fizycznymi stanami cząstki swobodnej.

Fizycznymi stanami są:

$$K_S \sim K^0 + \bar{K}^0$$

$$K_L \sim K^0 - \bar{K}^0$$

Wyprodukowany stan K^0 możemy przedstawić jako:

$$|K^0\rangle \approx \frac{1}{\sqrt{2}} (|K_L\rangle + |K_S\rangle)$$

Oscylacje pojawiają się dla tego, że K_L i K_S mają różne masy \Rightarrow ich funkcje falowe różnie ewoluują w czasie...

Oscylacje neutrin

Mieszanie stanów

Przyjmijmy, że neutrina ν_e i ν_μ są mieszkankami stanów fizycznych ν_1 i ν_2

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

Przyjmijmy, że w chwili $t = 0$ i $\vec{x} = 0$ wyprodukowaliśmy ν_e :

$$|\nu\rangle_0 = \cos \theta_{12} |\nu_1\rangle_0 + \sin \theta_{12} |\nu_2\rangle_0 = |\nu_e\rangle$$

Swobodne stany $|\nu_i\rangle$ ewoluują w czasie:

$$|\nu_i\rangle(t, \vec{x}) = |\nu_i\rangle_0 \cdot \exp\left(-\frac{i}{\hbar}(Et - \vec{p} \cdot \vec{x})\right)$$

\Rightarrow **Jeśli** $m_1 \neq m_2$ to względna **faza** stanów $|\nu_1\rangle$ i $|\nu_2\rangle$ **zmienia się** w czasie!
Oznacza to, że:

$$|\nu\rangle(t, \vec{x}) \neq |\nu_e\rangle(t, \vec{x})$$

“Nowy” stan możemy jednak rozłożyć na składowe:

$$|\nu\rangle(t, \vec{x}) = a(t) |\nu_1\rangle + b(t) |\nu_2\rangle$$

Co można sprowadzić do:

$$|\nu\rangle(t, \vec{x}) = A(t) |\nu_e\rangle + B(t) |\nu_\mu\rangle$$

Oscylacje neutrin

Prawdopodobieństwo przejścia

Prawdopodobieństwo, że po czasie t wyprodukowana cząstka ν_e oddziałła jako ν_e :

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_e}(t) = |A(t)|^2$$

Zakładając, że masy i różnice mas są małe: $\Delta m \ll m_1 \sim m_2 \ll E_\nu$
można pokazać że:

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_e}(t) = 1 - \sin^2(2\theta_{12}) \sin^2 \left(\frac{(m_2^2 - m_1^2) t}{4E} \cdot \frac{c^4}{\hbar} \right)$$

W bardziej “praktycznych” jednostkach,

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_e}(t) = 1 - \sin^2(2\theta_{12}) \sin^2 \left(1.27 \cdot \Delta m^2 \frac{L}{E} \right)$$

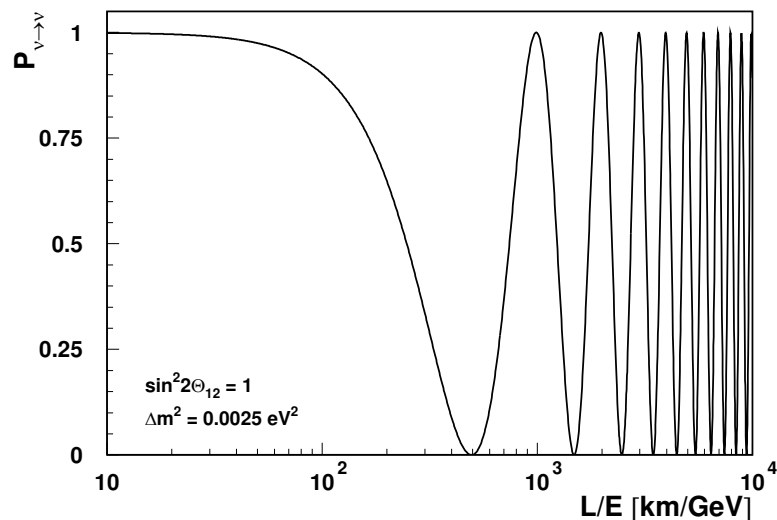
gdzie $L = ct$ [km], Δm^2 [eV²] i E [GeV].

Jesli różnice mas są rzeczywiście bardzo małe,
musimy wykonywać pomiary dla bardzo dużych odległości...

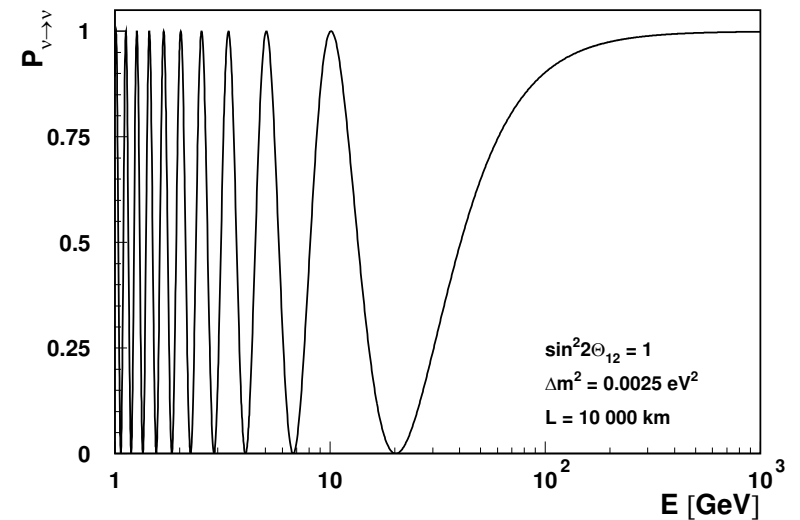
Super-Kamiokande

Prawdopodobieństwo przejścia

W funkcji odległości:



W funkcji energii neutrina
(odległość \sim średnica Ziemi):



Zależność **rozmywa się** jeśli neutrina mają **różne energie** !

Dla bardzo **dużych** L/E ($E/L \ll \Delta m^2$) otrzymujemy: $P_{\nu_e \rightarrow \nu_e} \approx 0.5$

Super-Kamiokande

Wyniki

Przedstawione wyniki Super-Kamiokande (i innych pomiarów neutrin atmosferycznych) można wytłumaczyć przyjmując, że ν_μ “znikają” na skutek oscylacji w inny rodzaj neutrina.

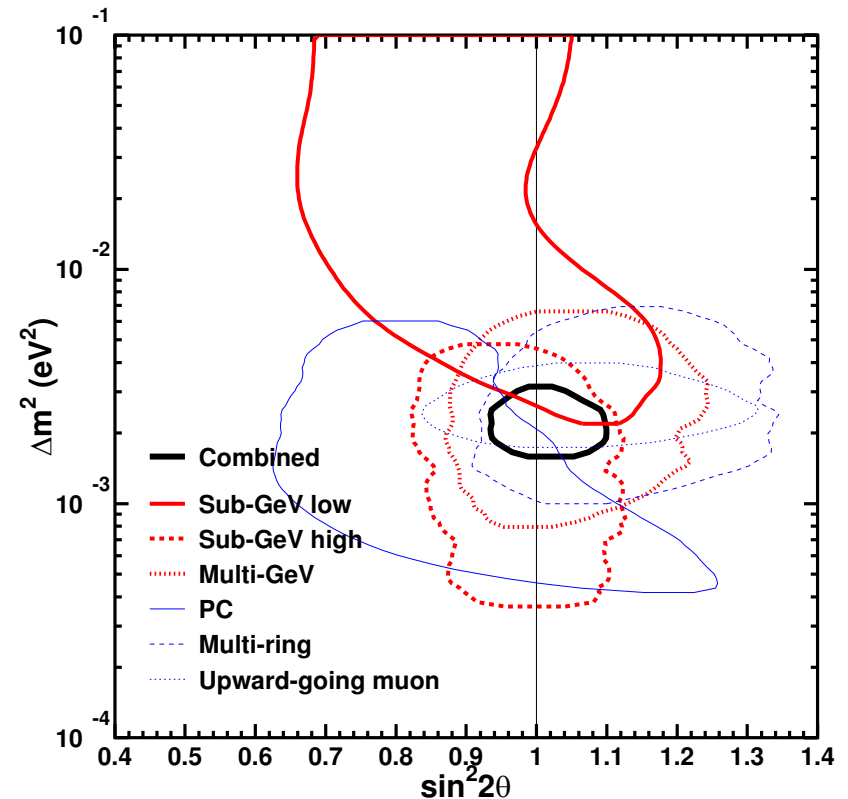
Oscylacje w ν_e wykluczamy (strumień zgodny z modelem)

⇒ najlepszym kandydatem **neutrino taonowe**

Dopasowanie parametrów mieszania do wszystkich danych:

$$\sin^2 2\theta_{12} = 1.00$$

$$\Delta m_{12}^2 = 0.0021 \text{ eV}^2$$



Zgodne wyniki dla różnych próbek

Super-Kamiokande

Wyniki

Ostateczne potwierdzenie **hipotezy oscylacji** neutrin wymaga jednak obserwacji nie tylko “znikania” ale i powtórnego “pojawiania” się neutrin mionowych.

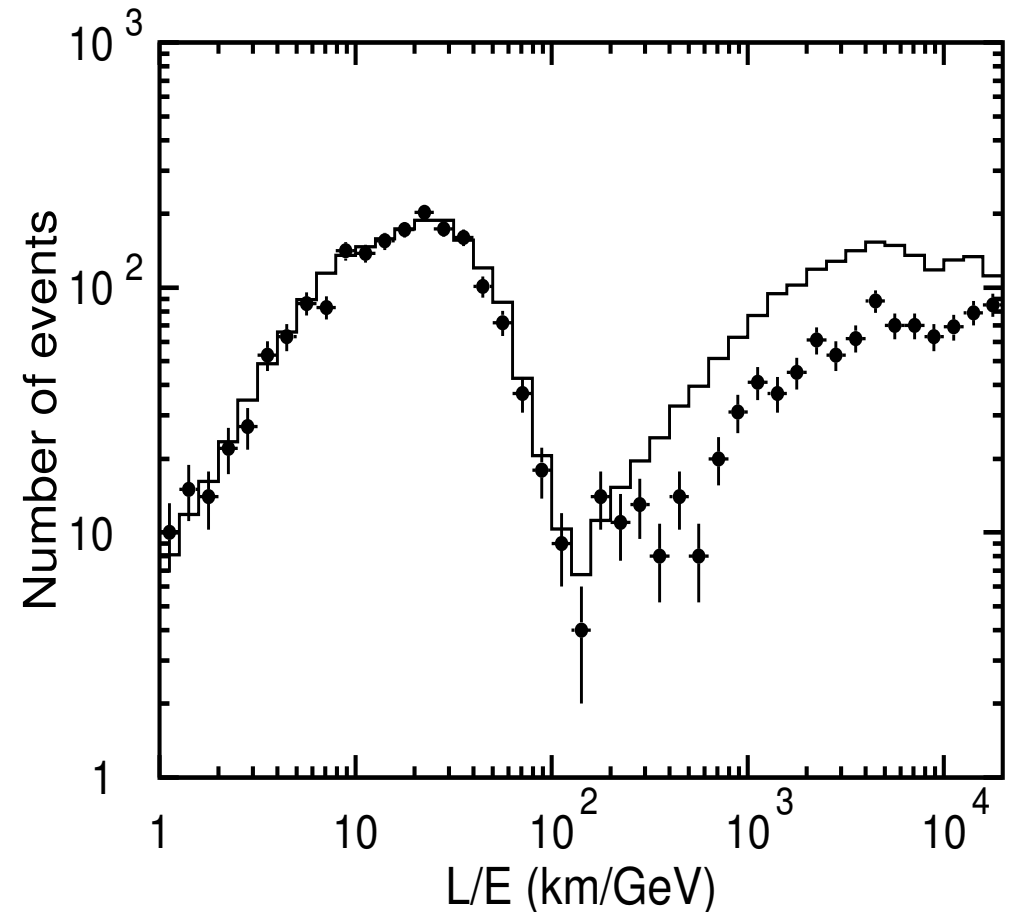
Nowa analiza Super-Kamiokande:
rozkład przypadków w funkcji **L/E**

Trudny pomiar ze względu na **duże błędy**:

$$\sigma_E/E \sim 30\%$$

$$\sigma_\theta \sim 30^\circ \quad (\text{dla } E=1 \text{ GeV})$$

Spadek liczby przypadków mionowych **w stosunku do przewidywań** (czarna linia) tylko dla **dużych L/E**



Super-Kamiokande

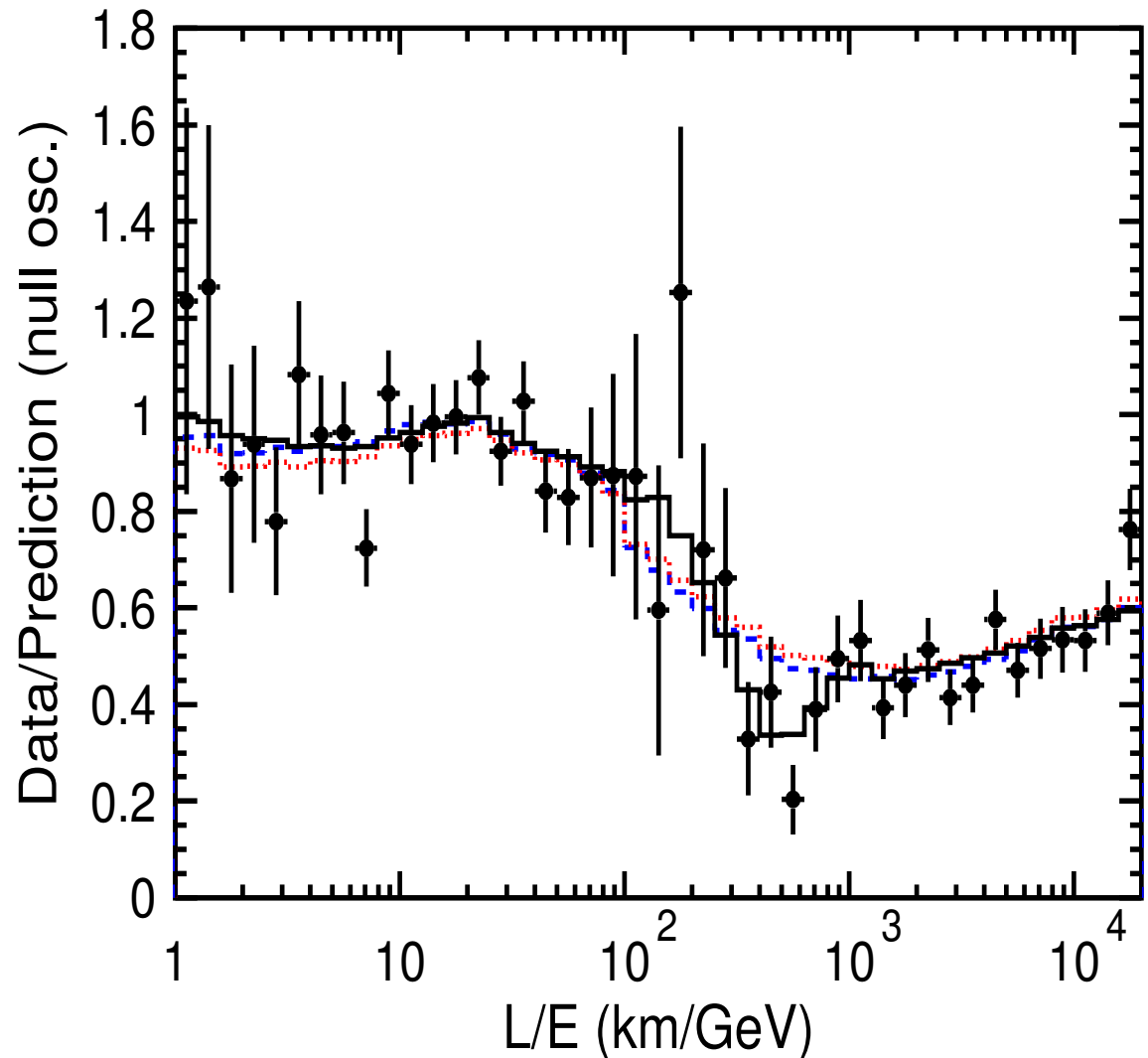
Wyniki

W rozkładzie $\frac{N_{obs}}{N_{exp}} \left(\frac{L}{E} \right)$ widoczne jest **minimum** przy $\frac{L}{E} \sim 500 \frac{km}{GeV}$

⇒ “regeneracja” neutrin dla większych $\frac{L}{E}$

Wyniki zgodne z hipotezą **oscylacji** (niebieska linia)

Wykluczają inne proponowane modele na poziomie $> 3\sigma$ (np. rozpad neutrin - niebieska linia)

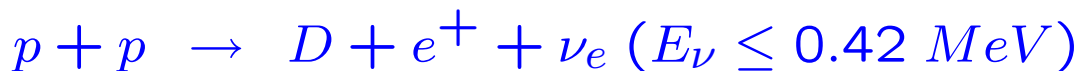


Neutrina słoneczne

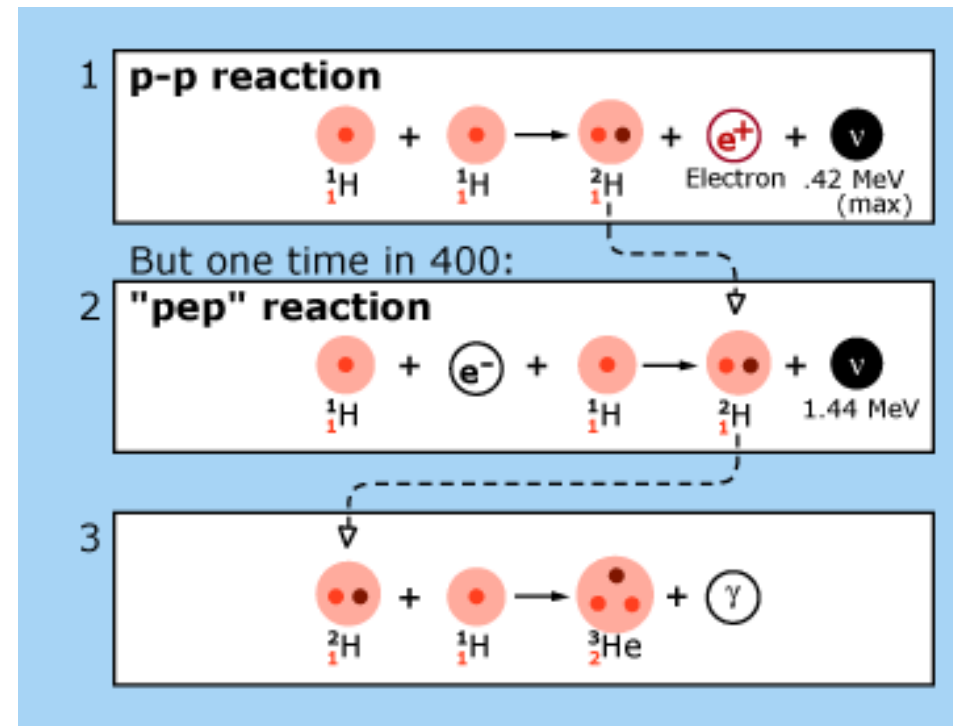
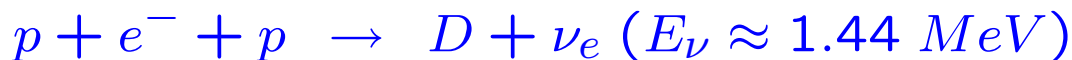
Produkcja neutrin

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

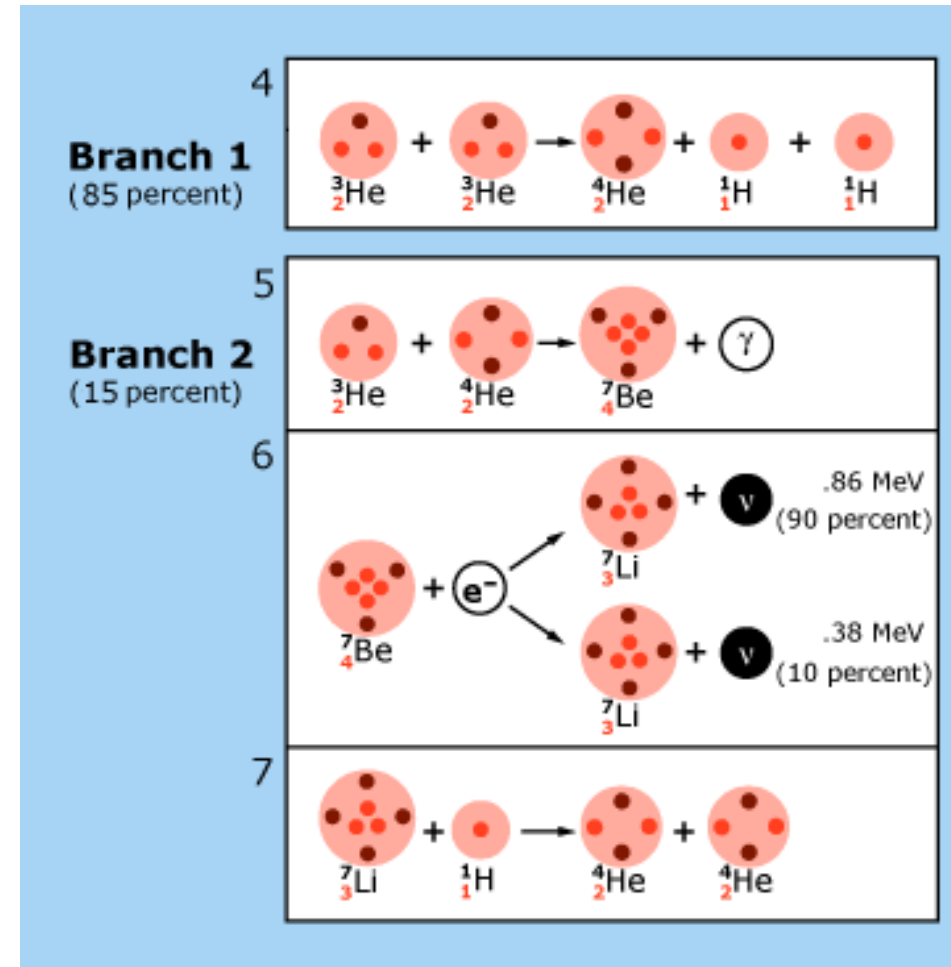
Produkcja neutrin

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

Neutrino z przemiany ${}^7\text{Be}$



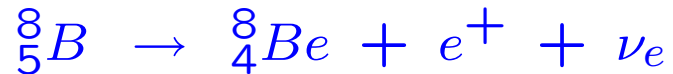
mają jednak energie **poniżej 1 MeV**



Neutrina słoneczne

Produkcja neutrin

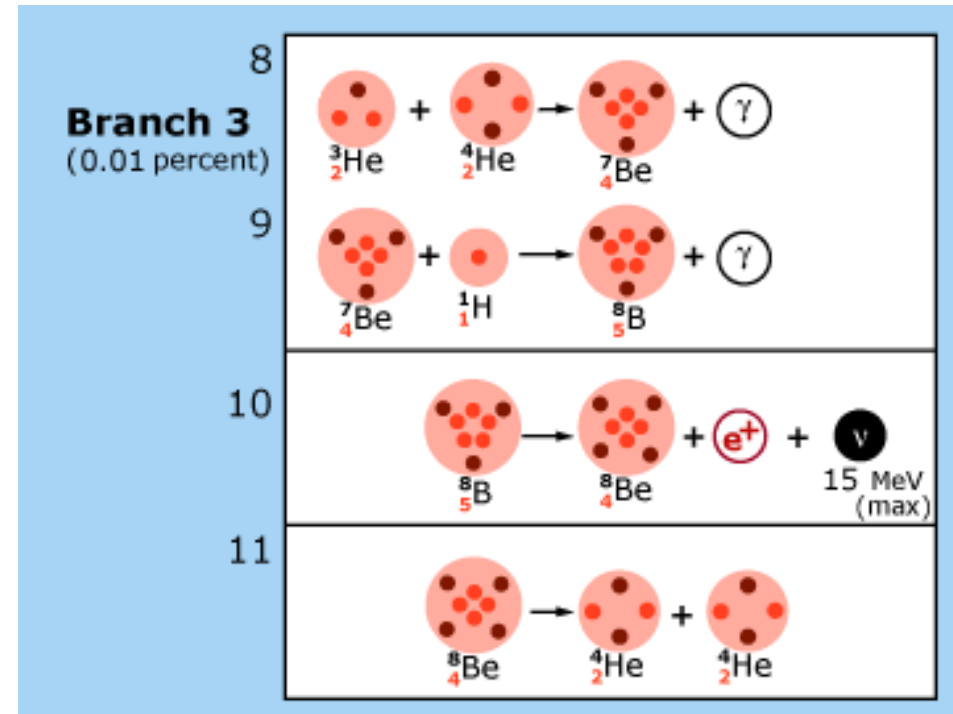
Źródłem wysokoenergetycznych neutrin jest przemiana 8B



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

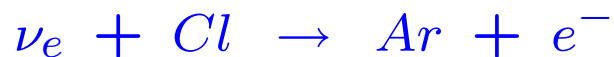


Neutrina słoneczne

Widmo energii

Widmo energii **neutrino elektronowych** produkowanych w reakcjach jądrowych na słońcu \Rightarrow

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

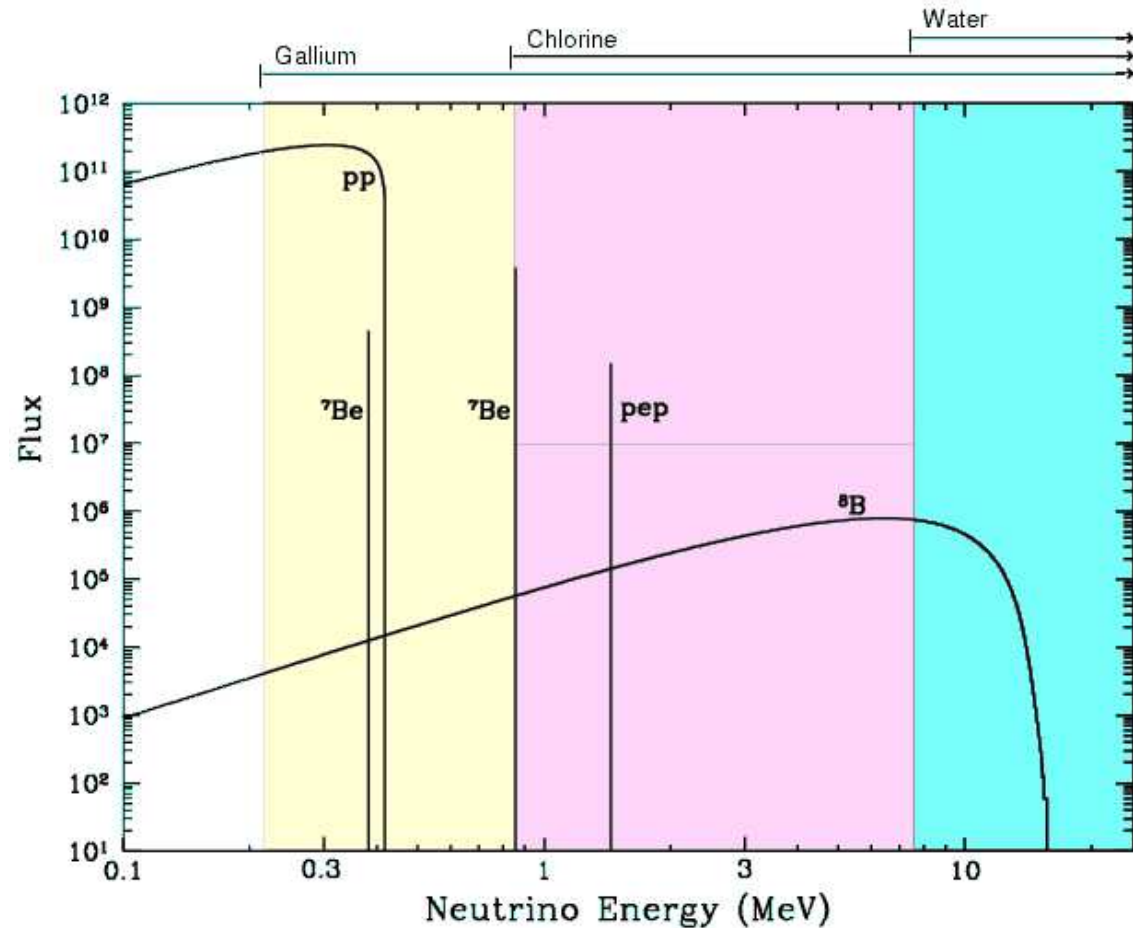


(eksperyment Homestake)



(SAGE, GALLEX, GNO)

Tylko neutrino elektronowe !



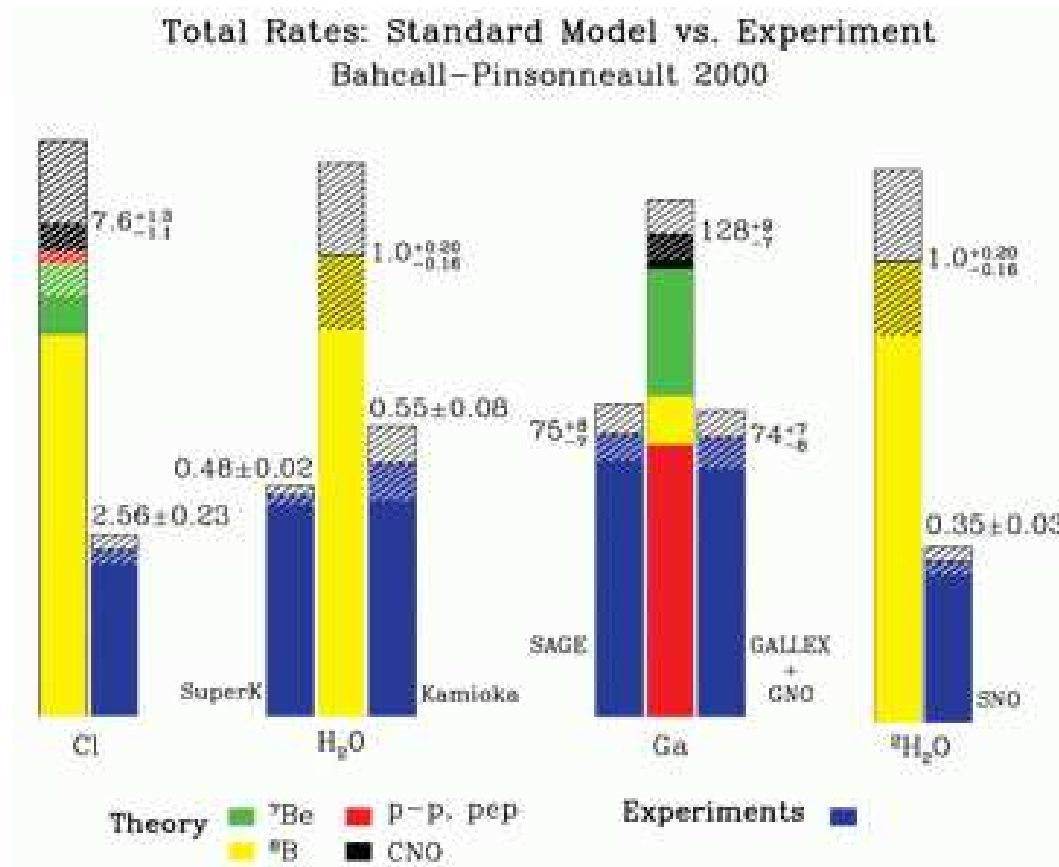
Ga

Cl

woda

Neutrina słoneczne

Deficyt neutrin słonecznych



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

Aby wytłumaczyć wyniki pomiarów trzeba by założyć, że:

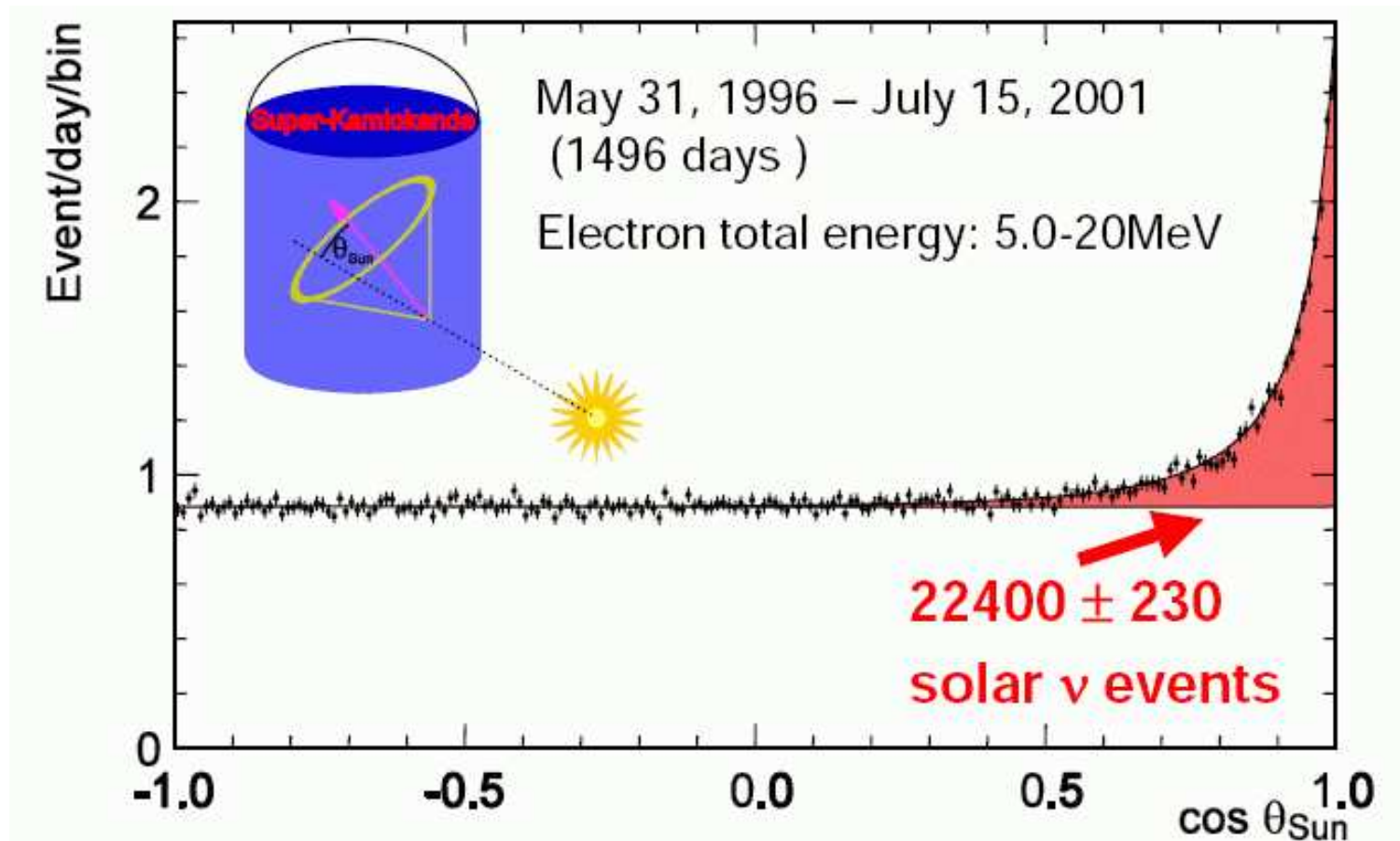
- reakcja ${}^8_5B \rightarrow {}^8_4Be + e^+ + \nu_e$ zachodzi 2 × rzadziej
- reakcja ${}^7_4Be + e^- \rightarrow {}^7_3Li + \nu_e$ wogóle nie zachodzi !...

Ale Słońce świeciłoby wtedy zupełnie inaczej...

Super-Kamiokande

Obserwacja neutrin słonecznych

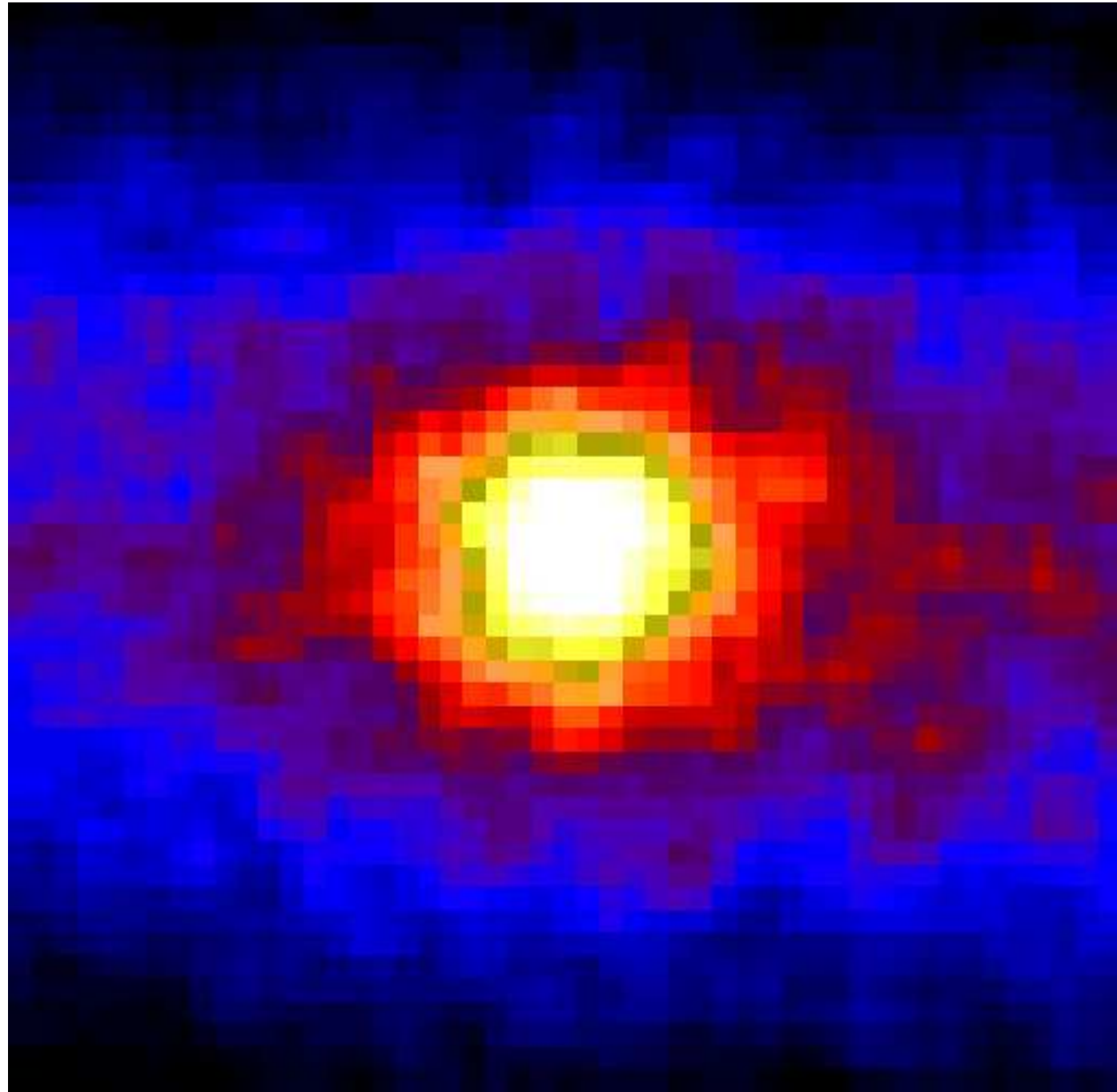
Oddziaływania **neutrin słonecznych** możemy odróżnić od oddziaływań neutrin atmosferycznych mierząc **kąt rozproszenia** elektronu względem **kierunku od słońca**:



Super-Kamiokande

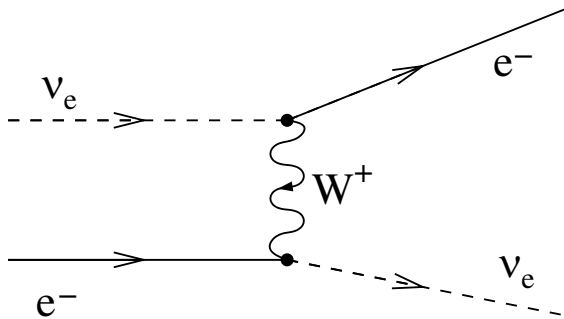
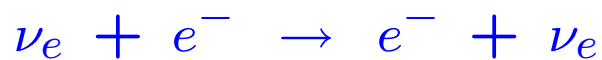
“Zdjęcie” Słońca
w “świele” neutrin

rzeczywisty rozmiar
Słońca $\sim \frac{1}{2}$ pixla

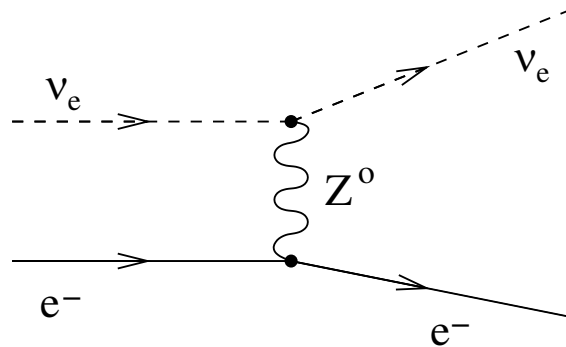
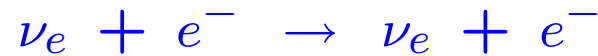


Super-Kamiokande

Neutrina słoneczne obserwowane w SK pochodzą głównie z reakcji typu **CC**

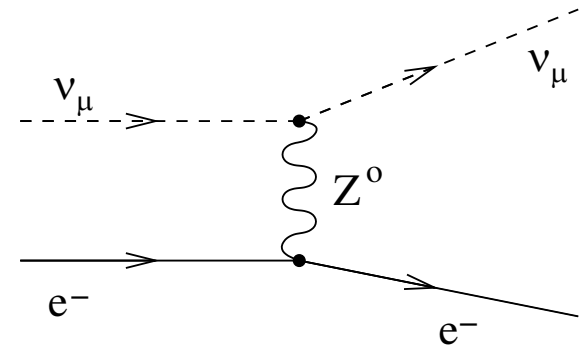
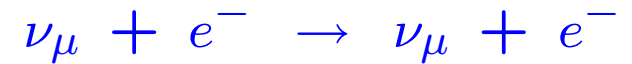


Możliwa jest też detekcja ν_e poprzez proces typu **NC**:



przekrój czynny ~ 5 razy mniejszy...

Ale proces typu **NC** możliwy jest też dla innych neutrino, np:



(także dla ν_τ)

Pomiar Super-Kamiokande:

$$\Phi^{SK} \approx \Phi_{\nu_e} + 0.154 \cdot (\Phi_{\nu_\mu} + \Phi_{\nu_\tau})$$

Super-Kamiokande

Deficyt neutrin słonecznych

Obserwowany **kształt rozkładu energii** neutrin słonecznych zgadza się **bardzo dobrze** z SSM (Standard Solar Model).

Obserwujemy jednak jedynie ok. **45%** oczekiwanych **przypadków** (neutrin **elektronowych**?!):

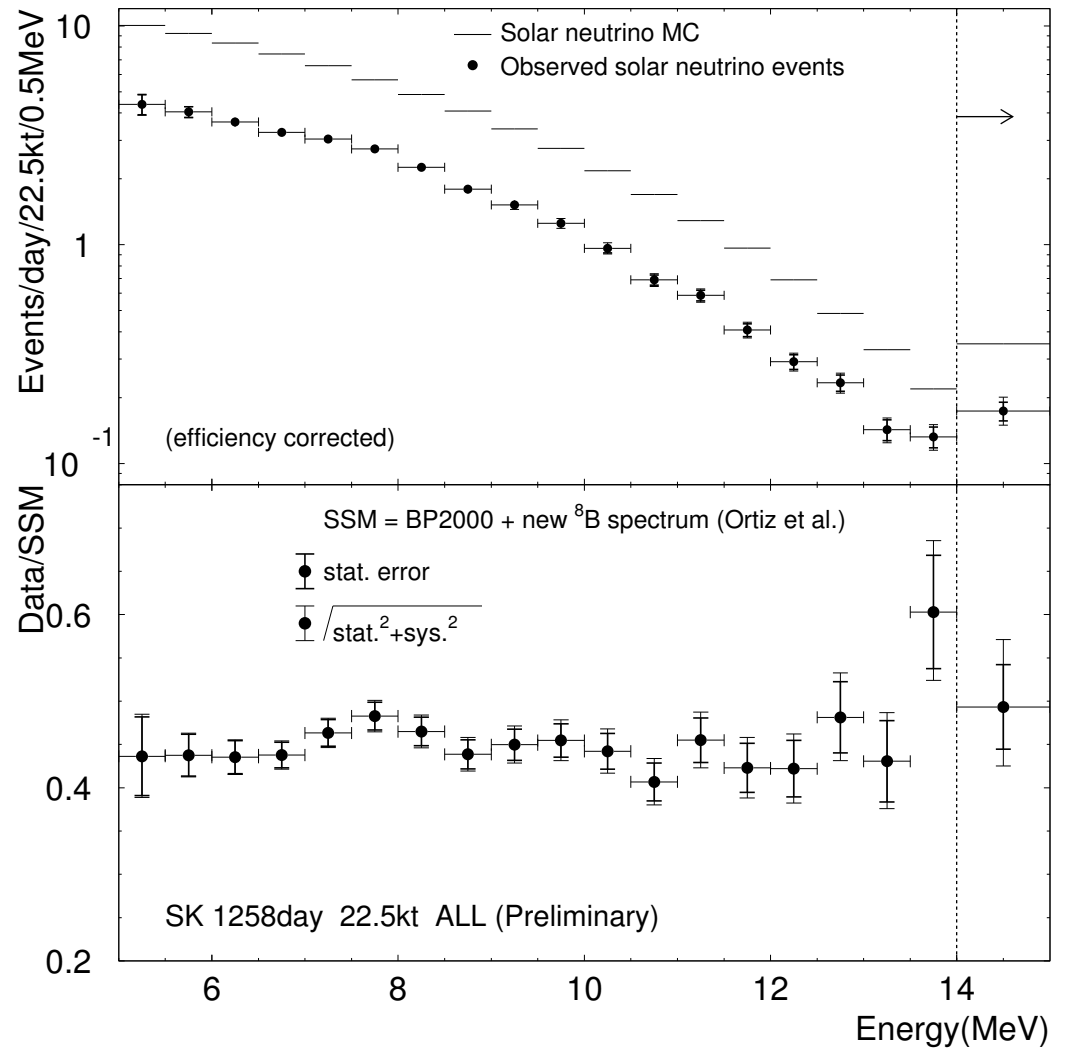
$$N^{SSM} = 48\,200 \quad \text{oczekiwanych}$$

$$N^{SK} = 22\,400 \quad \text{zmierzonych}$$

$$\frac{SK}{SSM} = 0.465 \pm 0.005 \begin{matrix} +0.016 \\ -0.015 \end{matrix}$$

Deficyt neutrin elektronowych...

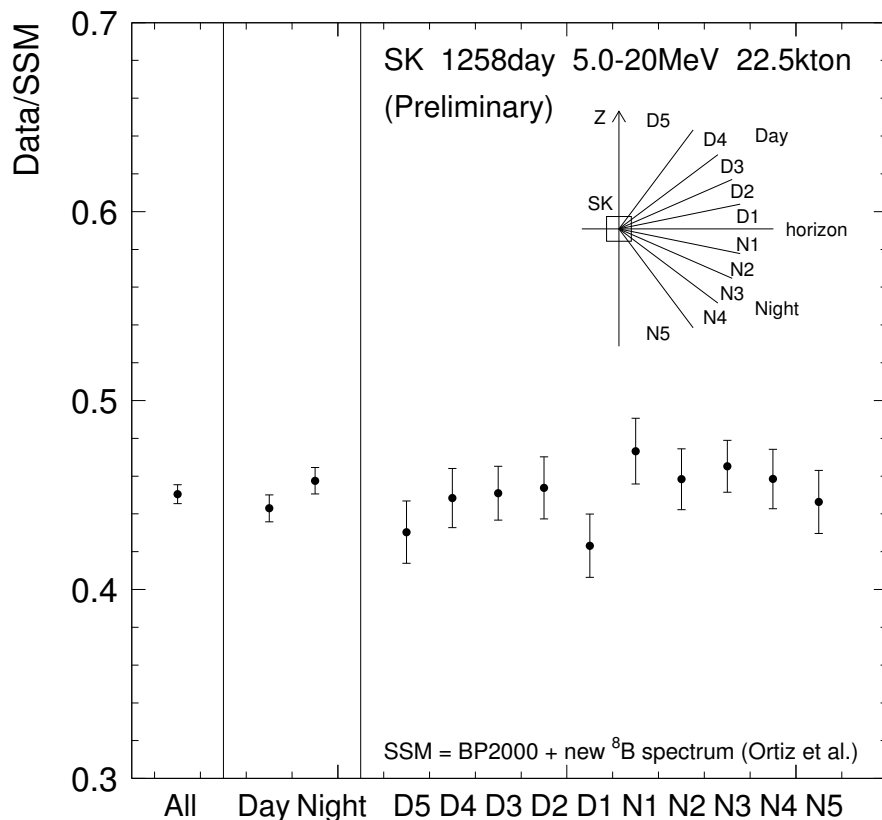
Może to znowu oscylacje !?...



Super-Kamiokande

Efekt dzień–noc

Strumień neutrin słonecznych
mierzony w różnych porach **dnia** i **nocy**:



Porównując strumień mierzony **w dzień** (“od góry”) i **w nocy** (“od dołu”), możemy sprawdzić **oscylacje** na odległości \sim średnicy **Ziemi**

Nie obserwujemy zmian związanych z przechodzeniem neutrin przez Ziemię

\Rightarrow ewentualne **oscylacje** ν_e dużo **słabsze** niż dla ν_μ (**oscylacje neutrin atmosferycznych**)

Wszystkie pomiary neutrin słonecznych można wytłumaczyć przyjmując ($X = \mu$ lub τ):

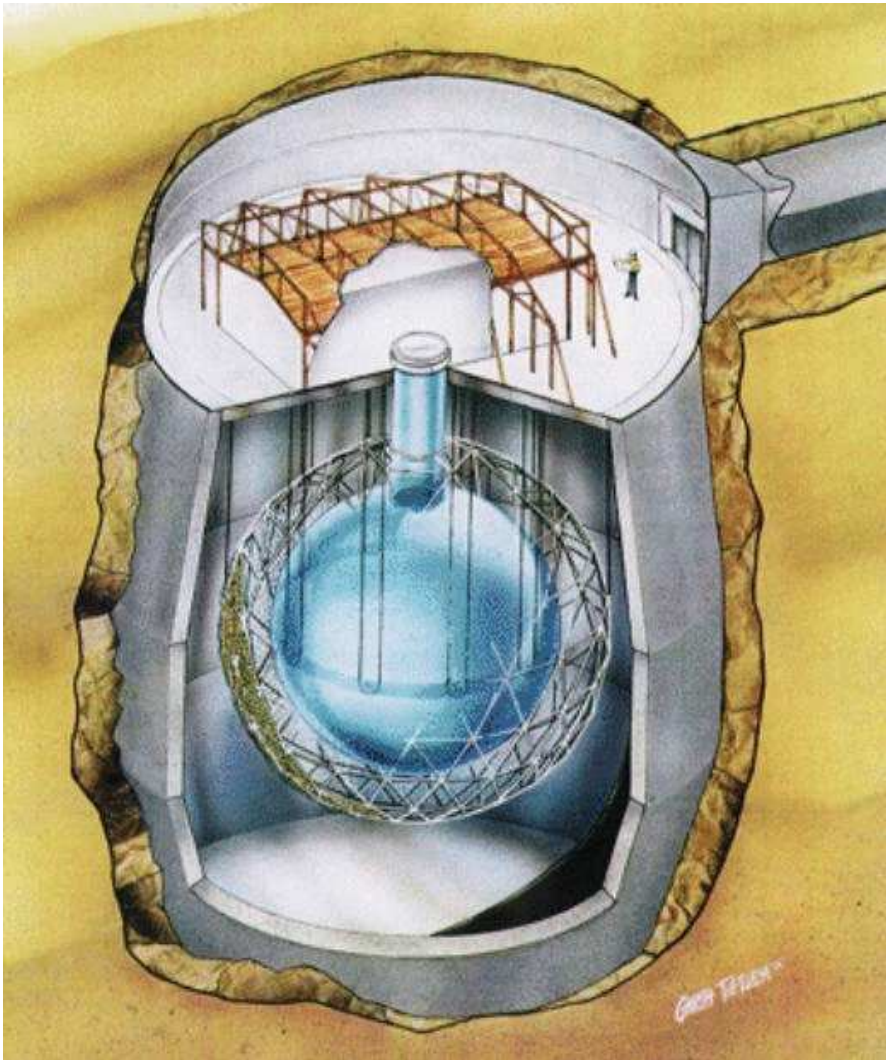
$$\sin^2 2\theta_{eX} \sim 0.80$$

$$\Delta m_{eX}^2 \sim 0.00005 \text{ eV}^2$$

parametry oscylacji $\nu_e \longleftrightarrow \nu_X$

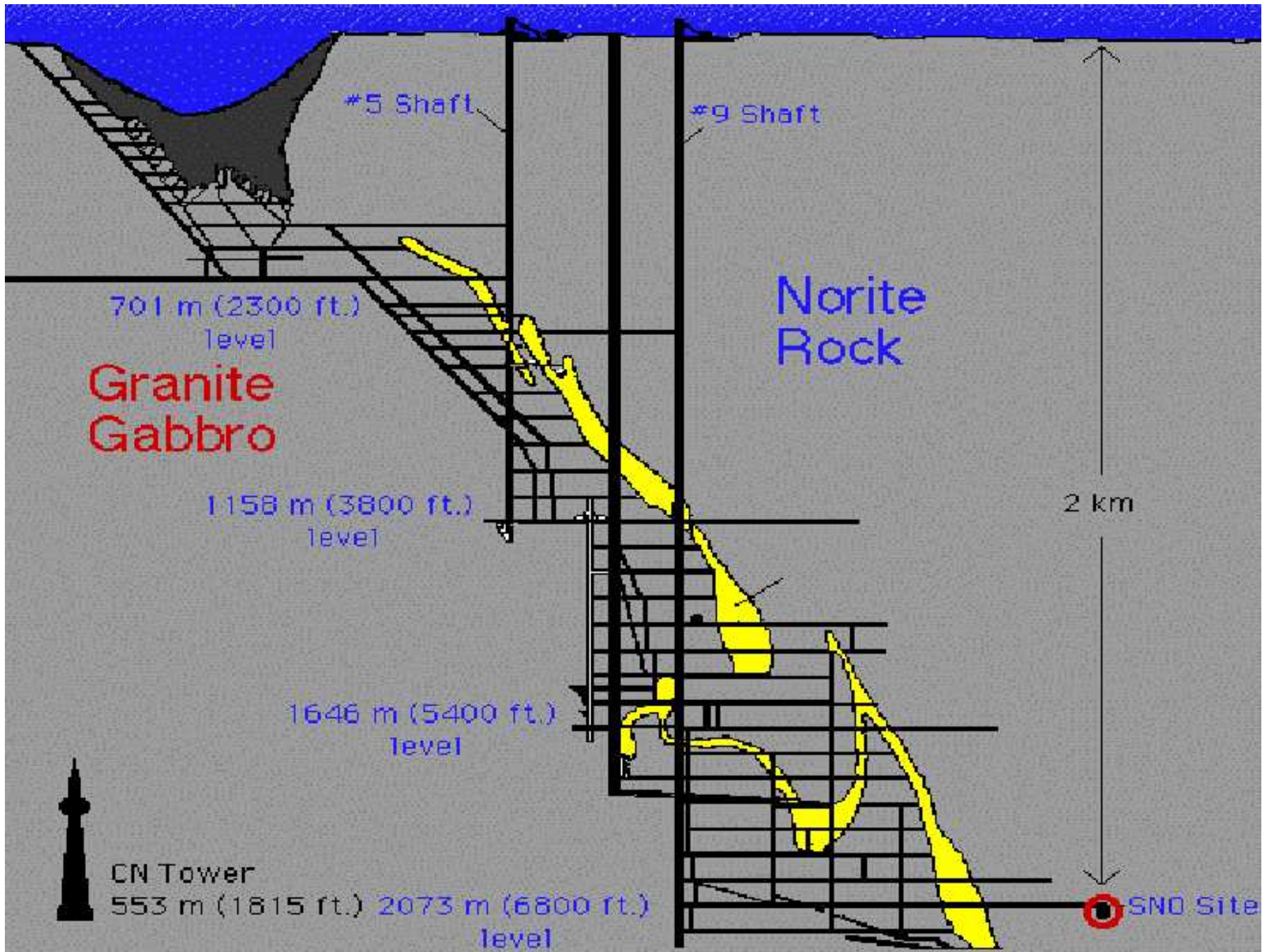
SNO

Eksperyment SNO (Sudbury Neutrino Observatory)



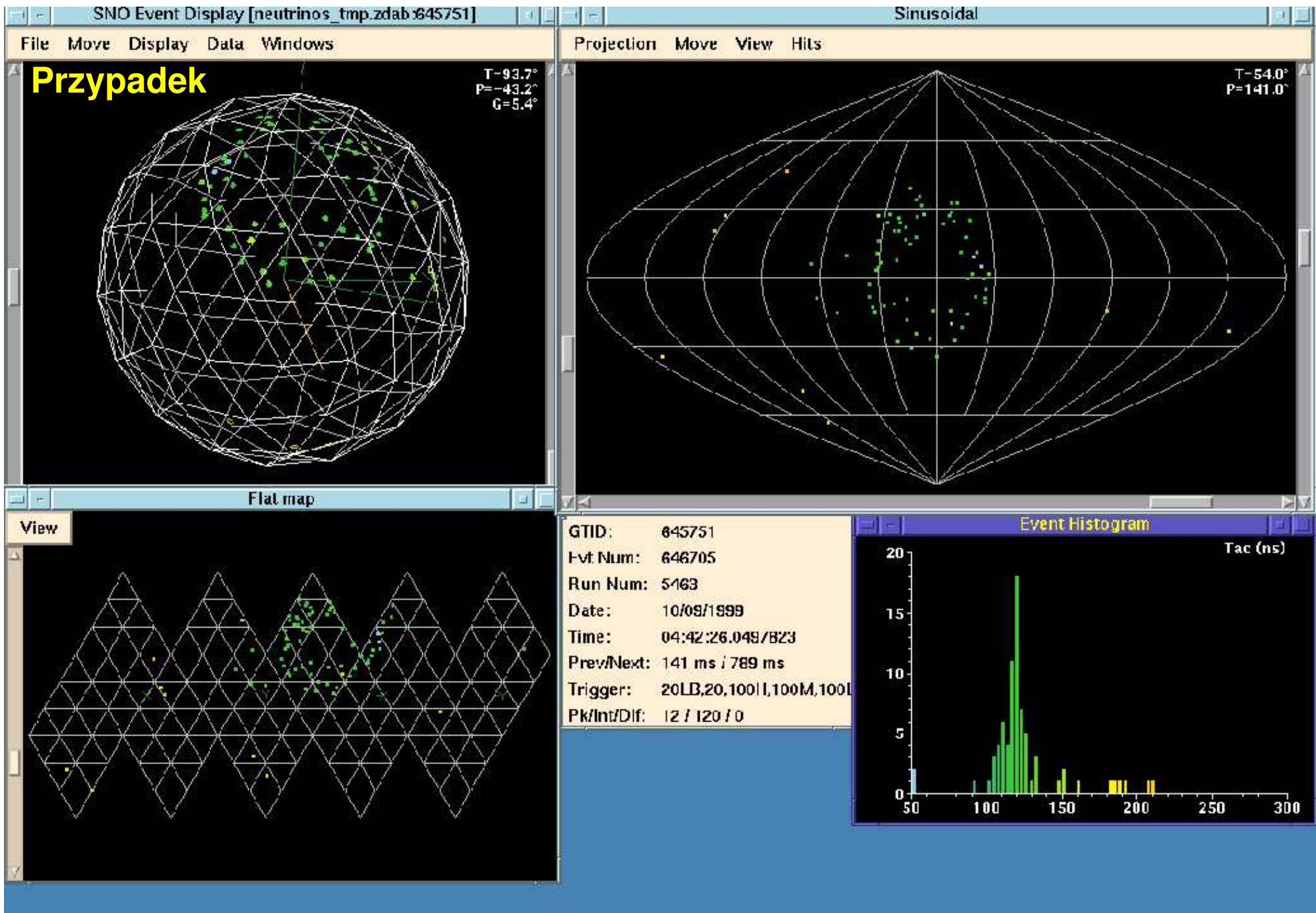
- ogromny zbiornik wypełniony 7000 t wody (H_2O)
- w środku kula wypełniona 1000 t ciężkiej wody (D_2O)
- promieniowanie Czerenkowa mierzone przez ok. 9500 fotopowielaczy.
- całość umieszczona na głębokości ponad 2000 m

SNO



Fotopowielacze





SNO

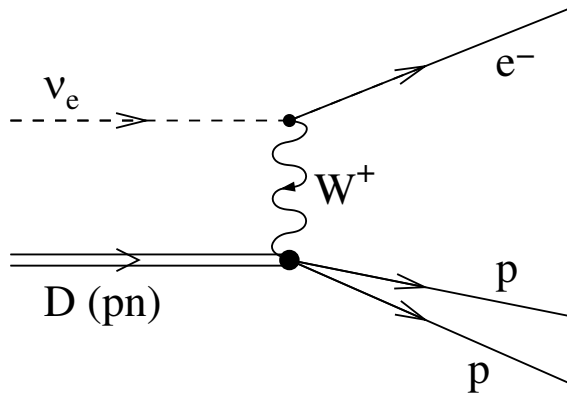
Detekcja neutrin

Jak w SK możemy zmierzyć sygnał pochodzący z rozpraszania neutrin na elektronach:



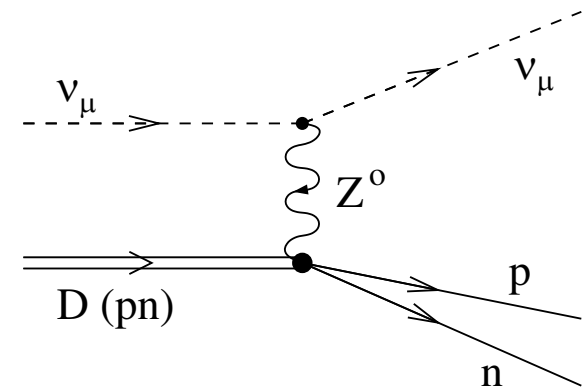
$$\sim \Phi_{\nu_e} + 0.154 \cdot (\Phi_{\nu_\mu} + \Phi_{\nu_\tau}) \Rightarrow \text{informacja o wszystkich typach neutrin}$$

Zastosowanie ciężkiej wody umożliwia dodatkowo pomiar rozpraszania na deuterze:



$$\sim \Phi_{\nu_e}$$

\Rightarrow informacja o **neutrinach elektronowych**



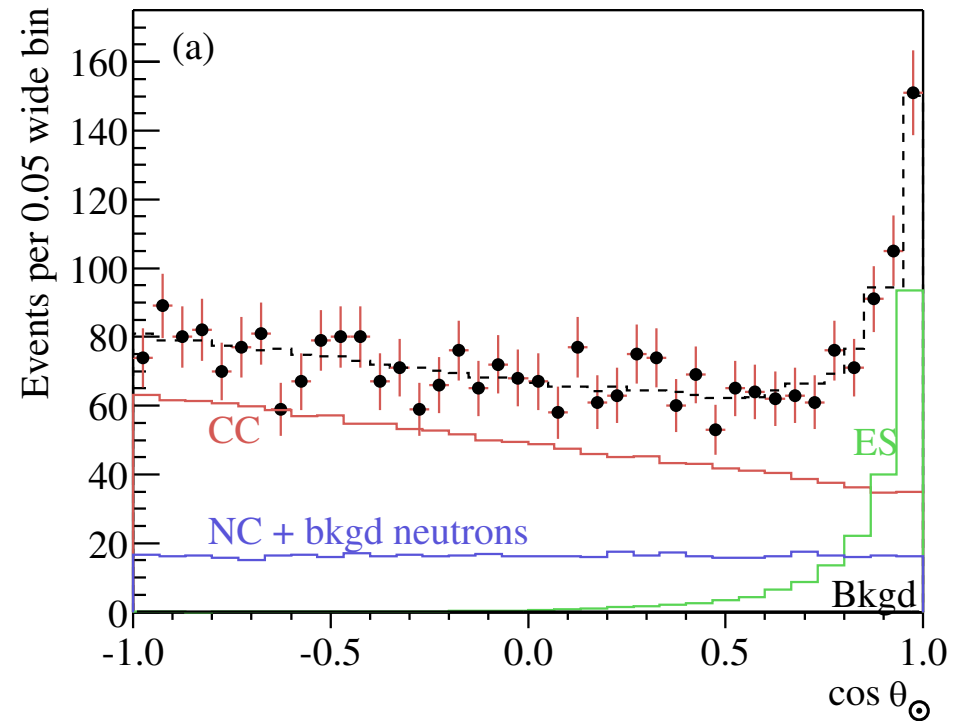
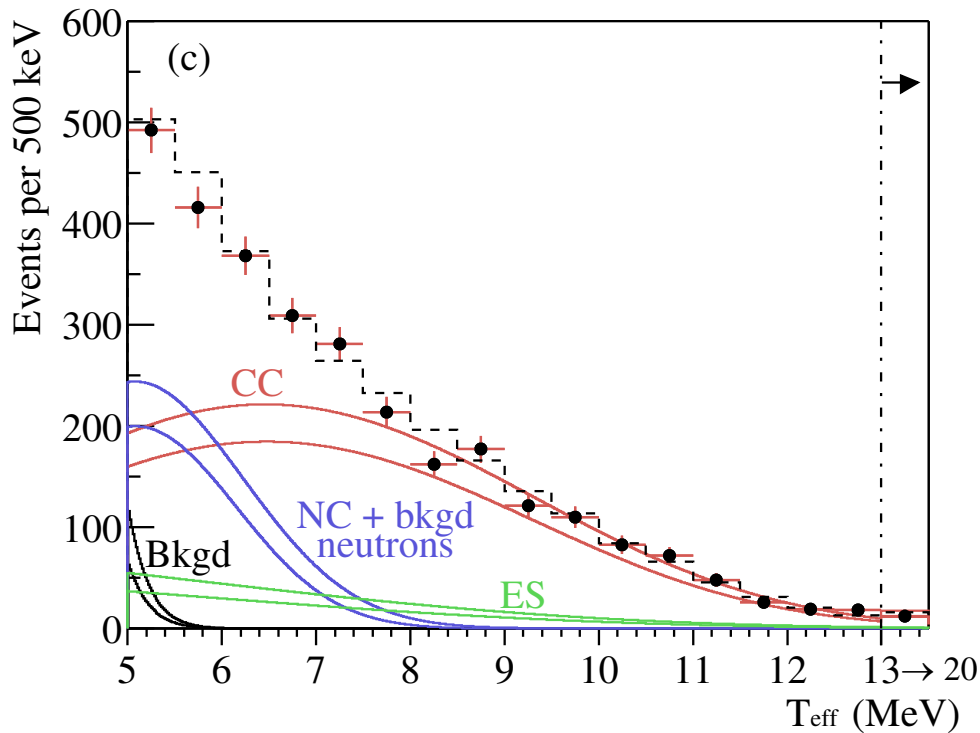
$$\sim \Phi_{\nu_e} + \Phi_{\nu_\mu} + \Phi_{\nu_\tau}$$

\Rightarrow informacja o **wszystkich neutrinach**

SNO

Wyniki

Wkłady od poszczególnych procesów można rozdzielić na podstawie mierzonych rozkładów energii i kąta rozproszenia:



SNO

Wyniki (“Phase I” - D_2O)

Z dopasowania uzyskujemy
(w jednostkach $10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$):

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

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

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

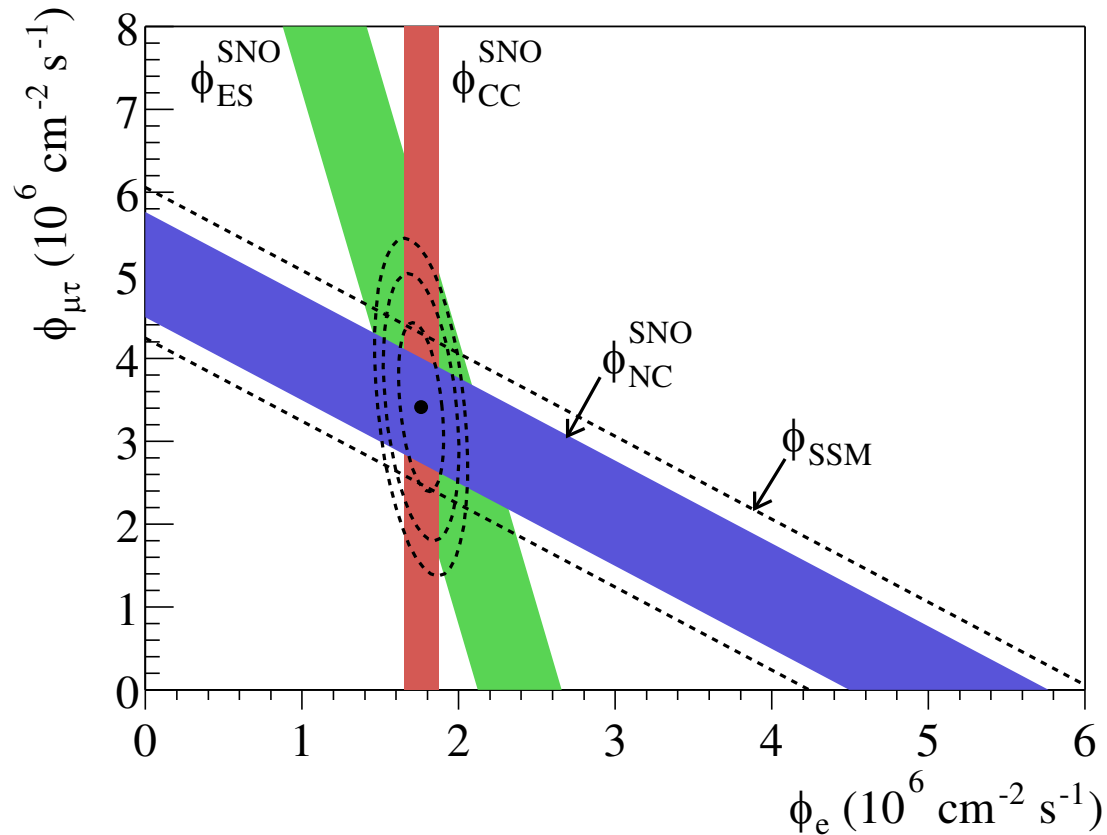
Przewidywania SSM

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

Dobra zgodność dla całkowitego strumienia neutrin.

W miejsce “brakujących” ν_e obserwujemy ν_μ i ν_τ

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



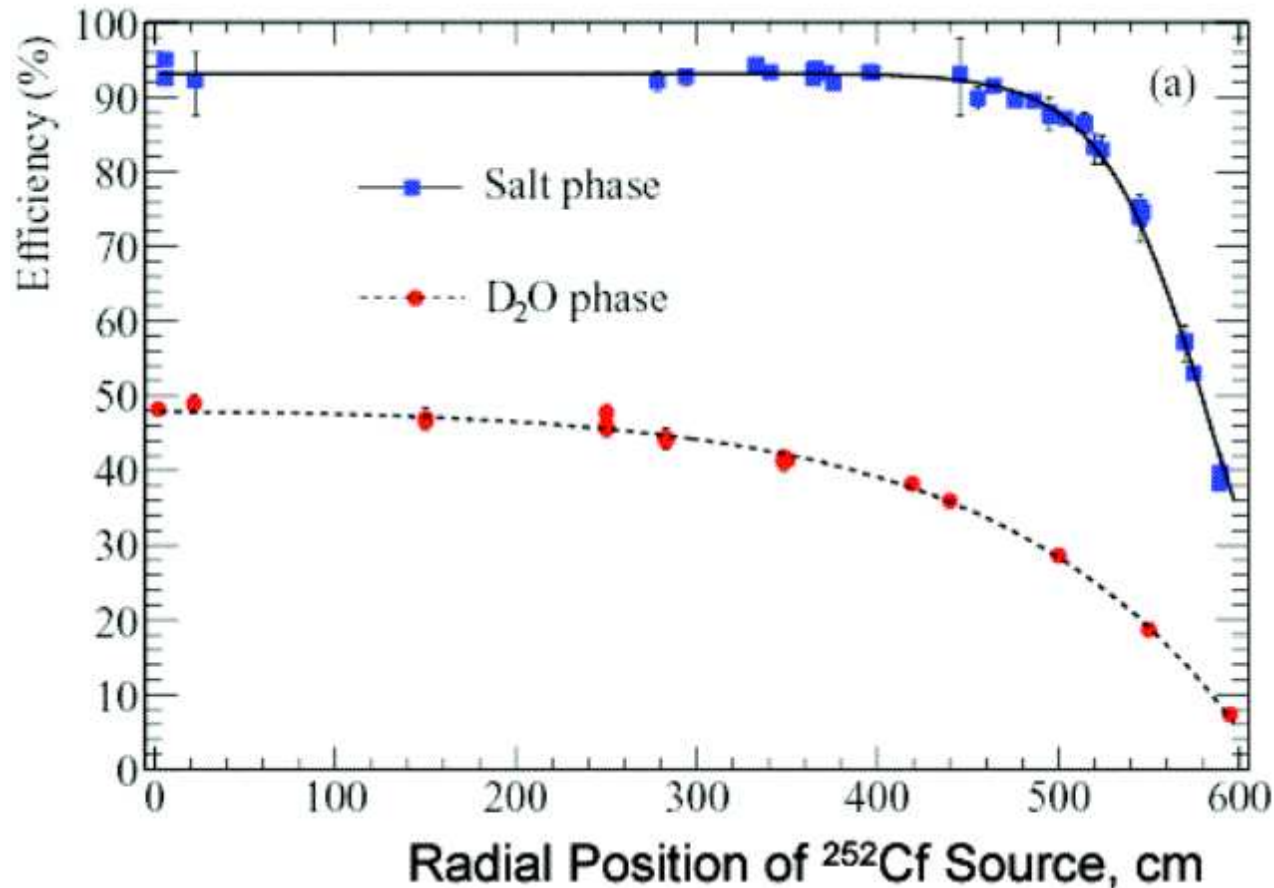
SNO

Phase II

W roku 2001 nastąpiła istotna zmiana w detektorze SNO: do wody... **dosypano soli**.

Jądra sodu mają dużo większy przekrój czynny na wychwyty neutronu - ponad dwukrotnie podniosła się efektywność rejestracji przypadków typu NC.

⇒ mniejszy **błąd statystyczny** w pomiarze całkowitego strumienia neutrin



SNO

Wyniki (Phase I + Phase II)

Z łącznego dopasowania
(w jednostkach $10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$):

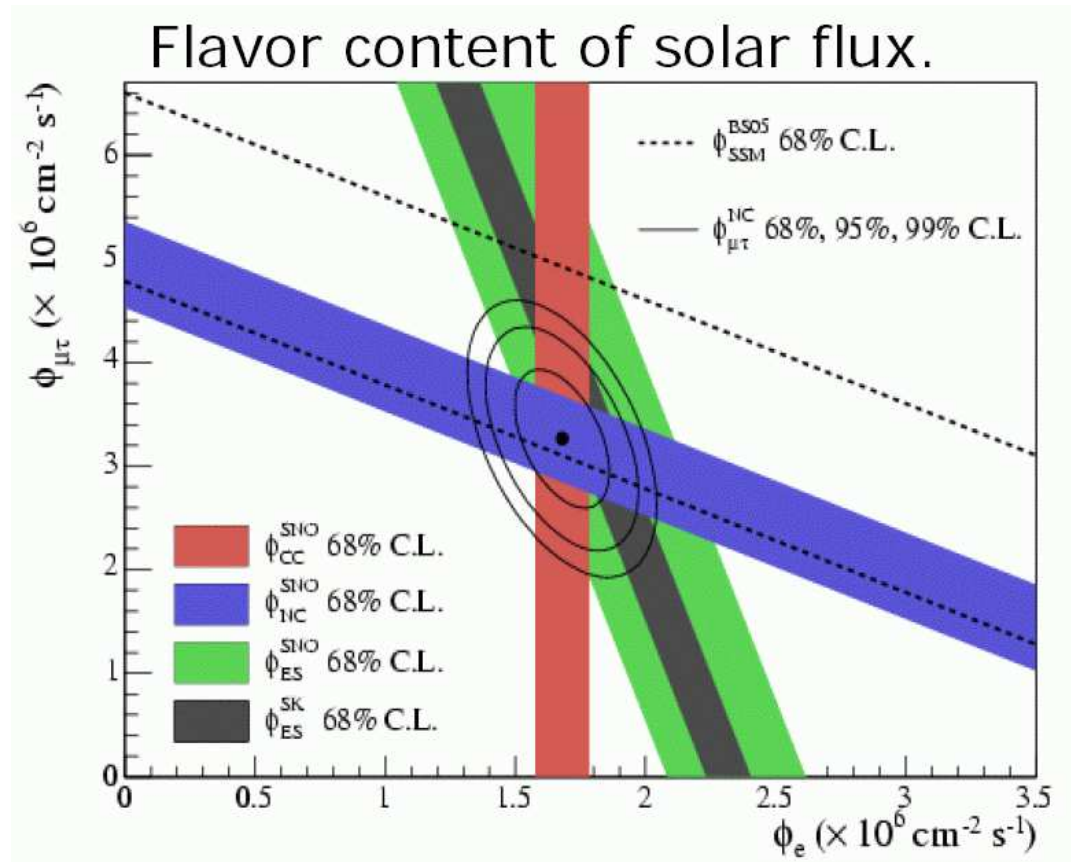
$$\Phi_{CC} = 1.68 \pm 0.06 \pm 0.09 = \Phi_{\nu_e}$$

$$\begin{aligned} \Phi_{ES} &= 2.35 \pm 0.22 \pm 0.15 \\ &= \Phi_{\nu_e} + \varepsilon(\Phi_{\nu_\mu} + \Phi_{\nu_\tau}) \\ &\quad (SK : 2.32 \pm 0.09) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi_{NC} &= 4.94 \pm 0.21 \pm 0.36 \\ &= \Phi_{\nu_e} + \Phi_{\nu_\mu} + \Phi_{\nu_\tau} \end{aligned}$$

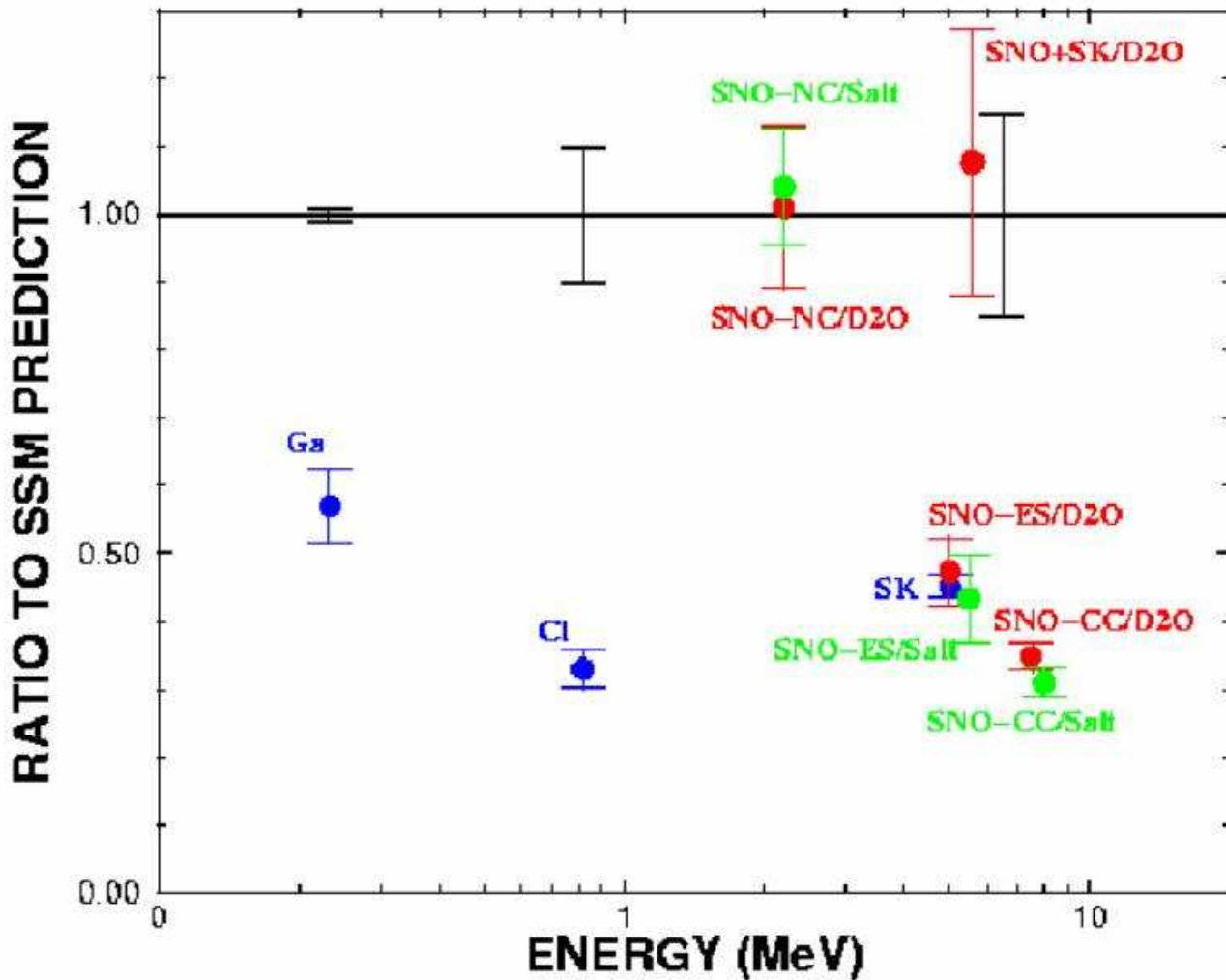
Przewidywania SSM (nowe)

$$\Phi^{SSM}(\nu_e) = 5.82 \pm 1.34$$



SNO

Porównanie wyników



Bardzo dobra zgodność z poprzednimi wynikami.

Całkowity strumień neutrin w dobrej zgodności z SSM.

Oscylacje neutrin

Podsumowanie

Stany fizyczne neutrin są mieszankami stanów o ustalonym zapachu.

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

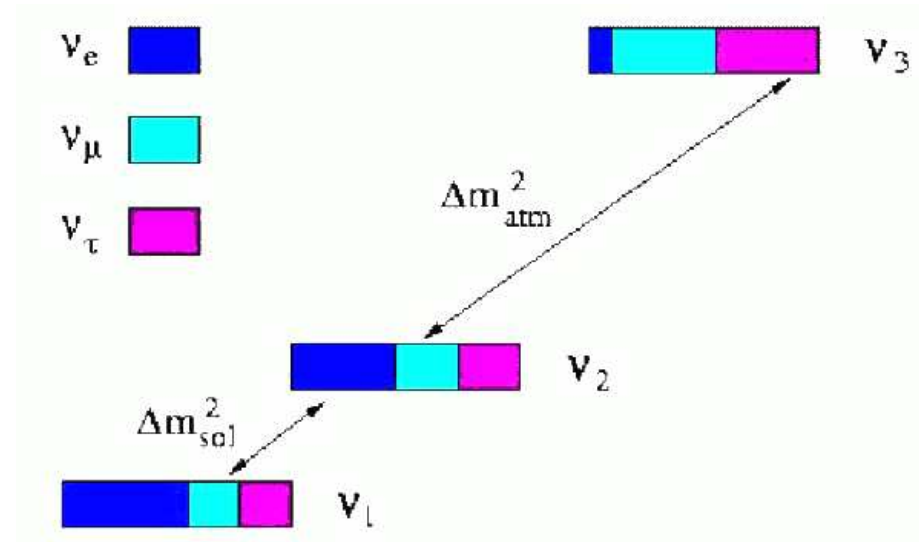
- neutrina atmosferyczne

$$\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau: \quad \Delta m_{\mu\tau}^2 \sim 0.002 \text{ eV}^2$$

- neutrina słoneczne

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

Widmo mas (jedna z możliwości):



Oscylacje neutrin

Podsumowanie

Możemy wprowadzić macierz mieszania dla neutrin:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{11} & V_{12} & V_{13} \\ V_{21} & V_{22} & V_{23} \\ V_{31} & V_{32} & V_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 0.82 & -0.55 & 0 \\ 0.42 & 0.61 & 0.64 \\ 0.34 & 0.52 & -0.76 \end{pmatrix}$$

Macierz **MNS** - Maki-Nakagawa-Sakata odpowiednik macierzy CKM dla kwarków

$$U = \underbrace{\begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu} \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix}}_{\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau} \underbrace{\begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13} & 0 & c_{13} \end{pmatrix}}_{\nu_e \leftrightarrow \nu_\tau}$$

Mieszanie:

$\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$

neutrina

słoneczne

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

neutrina

atmosferyczne

$\nu_e \leftrightarrow \nu_\tau$

ew. słabe

mieszanie

maksymalne mieszanie (?)