

# Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

## Neutrino i ich oscylacje

Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki

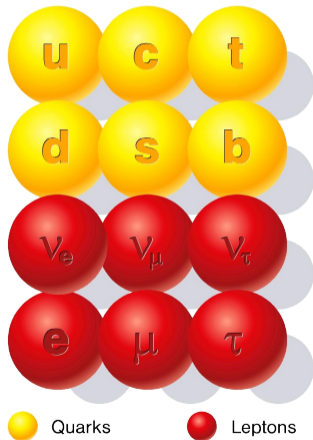


10 grudnia 2024

- 1 Mieszanie kwarków
- 2 Źródła neutrin
- 3 Super-Kamiokande
- 4 Oscylacje neutrin

- 1 Mieszanie kwarków
- 2 Źródła neutrin
- 3 Super-Kamiokande
- 4 Oscylacje neutrin

## Cząstki fundamentalne Modelu Standardowego



Zapach fermionu jest zawsze zachowany w oddziaływaniach silnych i elektromagnetycznych:

$$e^- \rightarrow e^- + \gamma$$

$$u \rightarrow u + g$$

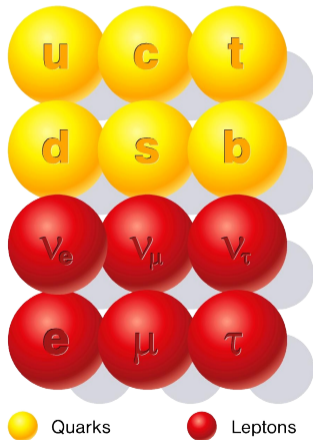
Nie zmienia się też w oddziaływaniach słabych z wymianą  $Z^0$  (tzw. wymiana prądów neutralnych, Neutral Current - NC):

$$\nu_e \rightarrow \nu_e + Z^0$$

(jedyne dozwolony wierzchołek)



## Cząstki fundamentalne Modelu Standardowego



Zapach fermionu jest zawsze zachowany w oddziaływaniach silnych i elektromagnetycznych:

$$e^- \rightarrow e^- + \gamma$$

$$u \rightarrow u + g$$

Nie zmienia się też w oddziaływaniach słabych z wymianą  $Z^0$  (tzw. wymiana prądów neutralnych, Neutral Current - NC):

$$\nu_e \rightarrow \nu_e + Z^0$$

(jedyne dozwolone wierzchołki)

Łamiące zachowanie zapachu procesy z wymianą prądów neutralnych (Flavour Changing Neutral Currents - FCNC) zabronione w SM!

## Cząstki fundamentalne Modelu Standardowego

Rodziny/generacje fermionów układają się parami - dublety SU(2):

$$\begin{array}{ccc}
 \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix} \\
 \begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}
 \end{array}$$

Kluczowe dla zrozumienia oddziaływań słabych z wymianą  $W^\pm$ ,  
 tzw. wymiana prądów naładowanych, Charged Current - CC

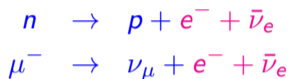
W **pierwszym przybliżeniu**, wymiana  $W^\pm$  jest przejściem w ramach jednego dubletu:

$$\begin{array}{l}
 e^- \rightarrow \nu_e + W^- \\
 u \rightarrow d + W^+
 \end{array}$$

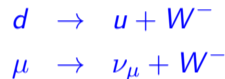
## Kąt Cabibbo

Zakładając, że przejścia zachodzą zawsze w ramach danego dubletu, wymieniany jest ten sam bozon  $W^\pm$ , **rozpady leptonów i hadronów** powinny być ze sobą powiązane.

Na poziomie cząstek:



Na poziomie fundamentalnym:

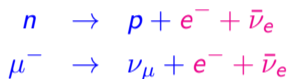


Jednak rozpady hadronów zdawały się zachodzić **odrobinę za wolno** w porównaniu do  $\mu^\pm$ .  
Mniejsze sprzężenie kwarków do  $W^\pm$  !?

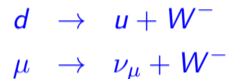
## Kąt Cabibbo

Zakładając, że przejścia zachodzą zawsze w ramach danego dubletu, wymieniany jest ten sam bozon  $W^\pm$ , **rozpady leptonów i hadronów** powinny być ze sobą powiązane.

Na poziomie cząstek:



Na poziomie fundamentalnym:



Jednak rozpady hadronów zdawały się zachodzić **odrobinę za wolno w porównaniu do  $\mu^\pm$** .  
Mniejsze sprzężenie kwarków do  $W^\pm$  !?

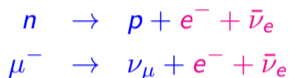
Z drugiej strony rozpady np. **cząstek "dziwnych"** są dużo wolniejsze, wymagają przejścia nie mieszczącego się w jednym dublecie:



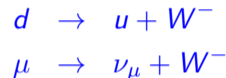
## Kąt Cabibbo

Zakładając, że przejścia zachodzą zawsze w ramach danego dubletu, wymieniany jest ten sam bozon  $W^\pm$ , **rozpady leptonów i hadronów** powinny być ze sobą powiązane.

Na poziomie cząstek:



Na poziomie fundamentalnym:



Jednak rozpady hadronów zdawały się zachodzić **odrobinę za wolno** w porównaniu do  $\mu^\pm$ .  
Mniejsze sprzężenie kwarków do  $W^\pm$  !?

Z drugiej strony rozpady np. cząstek “dziwnych” są dużo wolniejsze, wymagają przejścia nie mieszczącego się w jednym dublecie:



Cabibbo zaproponował, żeby **oddziaływania CC** wiązały **kwark  $u$**  z pewną **mieszanką zapachów**:

$$d' = d \cdot \cos \theta_C + s \cdot \sin \theta_C \quad \theta_C \approx 12^\circ - \text{kąt Cabibbo}$$

## Kąt Cabibbo

Jak może opisać "mieszanie"?



Z pizzy o dwóch smakach chcemy odciąć górną prawą ćwiartkę...

Zdjęcie pizzy z <https://www.apachepizza.co.uk>

## Kąt Cabibbo

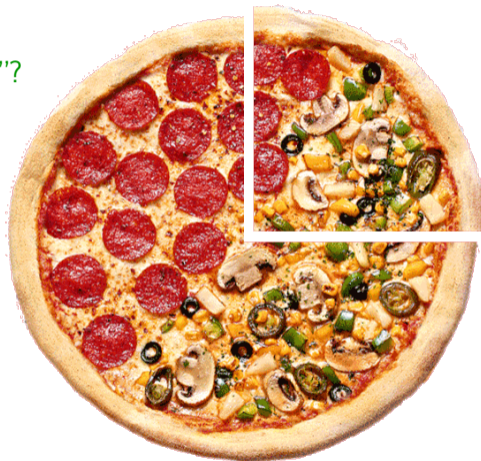
Jak może opisać "mieszanie"?



Gdy pizza jest równo ułożona, odcięty kawałek ma jeden smak...

## Kąt Cabibbo

Jak może opisać "mieszanie"?



Gdy pizza jest obrócona, odcięty kawałek ma oba smaki...



## Teoria Cabibbo (1963)

Pozwalała wyjaśnić wszystkie znane wówczas rozpady cząstek.

Rozpady  $n$  i  $\Lambda$  tłumione w porównaniu do rozpadów  $\mu^-$  o czynniki odpowiednio proporcjonalne do  $\cos^2 \theta_C$  ( $\sim 0.95$ ; niewielka poprawka) i  $\sin^2 \theta_C$  ( $\sim 0.05$ ; duże tłumienie, "dziwne" rozpady)

Tłumaczy dlaczego cząstki dziwne mają "dziwnie długie" czasy życia...

## Teoria Cabibbo (1963)

Pozwalała wyjaśnić wszystkie znane wówczas rozpady cząstek.

Rozpady  $n$  i  $\Lambda$  tłumione w porównaniu do rozpadów  $\mu^-$  o czynniki odpowiednio proporcjonalne do  $\cos^2 \theta_C$  ( $\sim 0.95$ ; niewielka poprawka) i  $\sin^2 \theta_C$  ( $\sim 0.05$ ; duże tłumienie, "dziwne" rozpady)

Tłumaczy dlaczego cząstki dziwne mają "dziwnie długie" czasy życia...

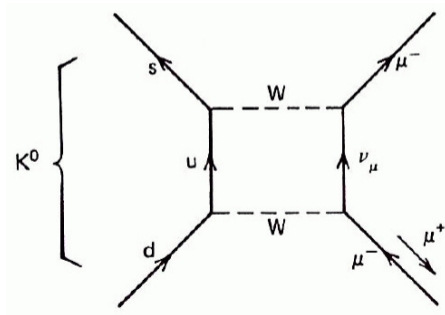
Jednak założone mieszanie kwarków dopuszczało też istnienie procesów z niezachowaniem zapachu (typu FCNC).

Oczekiwany kanał rozpadu:

$$K^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$$

Na poziomie kwarkowym:

$$d \bar{s} \rightarrow \mu^+ \mu^-$$



## Teoria Cabibbo (1963)

Pozwalała wyjaśnić wszystkie znane wówczas rozpady cząstek.

Rozpady  $n$  i  $\Lambda$  tłumione w porównaniu do rozpadów  $\mu^-$  o czynniki odpowiednio proporcjonalne do  $\cos^2 \theta_C$  ( $\sim 0.95$ ; niewielka poprawka) i  $\sin^2 \theta_C$  ( $\sim 0.05$ ; duże tłumienie, "dziwne" rozpady)

Tłumaczy dlaczego cząstki dziwne mają "dziwnie długie" czasy życia...

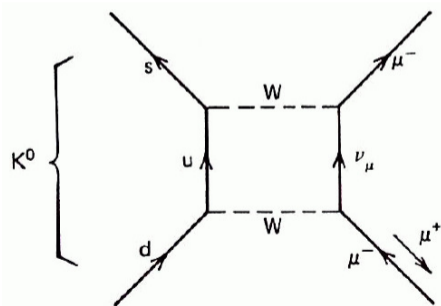
Jednak założone mieszanie kwarków dopuszczało też istnienie procesów z niezachowaniem zapachu (typu FCNC).

Oczekiwany kanał rozpadu:

$$K^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$$

Na poziomie kwarkowym:

$$d \bar{s} \rightarrow \mu^+ \mu^-$$



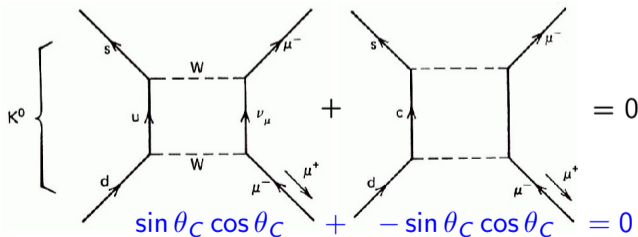
Ale takich rozpadów nie obserwujemy?!...

## Kwark $c$

W roku 1970 Glashow, Iliopoulos i Maiani (GIM), aby wytłumaczyć brak procesów typu FCNC, zapostulowali istnienie czwartego kwarku  $c$ . Kwarki  $u$  i  $c$  sprzęgały się z kombinacjami  $d'$  i  $s'$ :

$$d' = d \cdot \cos \theta_C + s \cdot \sin \theta_C \quad s' = d(-\sin \theta_C) + s \cdot \cos \theta_C$$

Diagram z wymianą kwarku  $c$  kasuje wkład od diagramu z wymianą kwarku  $u$   
 $\Rightarrow$  amplituda typu FCNC znika !



Kwark  $c$  odkryty został dopiero w 1974...

Stanami “fizycznymi” cząstek są stany, które przyjmują **cząstki swobodne**.  
Stany takie mają określoną masę (!) i inne własności (ładunek, dziwność...)

W przypadku kwarków wprowadziliśmy sześć takich stanów (trzy “górne” i trzy “dolne”):

*u c t    d s b*

(pomijamy w tym momencie fakt, że każdy kwark występuje w trzech kolorach)

Te stany kwarkowe uczestniczą w oddziaływaniach silnych i elektromagnetycznych

Stanami “fizycznymi” cząstek są stany, które przyjmują **cząstki swobodne**.  
Stany takie mają określoną masę (!) i inne własności (ładunek, dziwność...)

W przypadku kwarków wprowadziliśmy sześć takich stanów (trzy “górne” i trzy “dolne”):

$$u \quad c \quad t \quad d \quad s \quad b$$

(pomijamy w tym momencie fakt, że każdy kwark występuje w trzech kolorach)

Te stany kwarkowe uczestniczą w oddziaływaniach silnych i elektromagnetycznych

Ale oddziaływania słabe “widzą” trochę inny zestaw zapachów:

$$u \quad c \quad t \quad d' \quad s' \quad b'$$

gdzie zapachy  $d'$ ,  $s'$  i  $b'$  są **“prawie”** równe  $d$ ,  $s$  i  $b$ , ale zawierają też domieszki innych dolnych kwarków...  
np.  $b' \approx 0.999b + 0.040s + 0.009d$

To mieszanie powoduje właśnie, że w oddziaływaniach słabych zapach nie jest zachowany...

## Mieszanie cząstka-antycząstka

Neutralne mezon produkowane w oddziaływaniach silnych opisujemy jako pary kwark-antykwar, np.  $K^0$  ( $d\bar{s}$ ) lub  $\bar{K}^0$  ( $s\bar{d}$ )

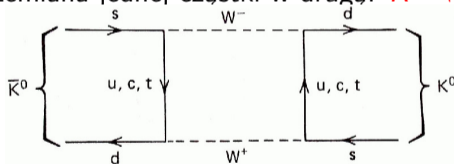
Te dwa stany różnią się tylko **dziwnością**, która **nie jest zachowana** w oddziaływaniach słabych. W szczególności stan  $d'\bar{s}'$  zawiera domieszkę  $s\bar{d}$

## Mieszanie cząstka-antycząstka

Neutralne mezon produkowane w oddziaływaniach silnych opisujemy jako pary kwark-antykwar, np.  $K^0$  ( $d\bar{s}$ ) lub  $\bar{K}^0$  ( $s\bar{d}$ )

Te dwa stany różnią się tylko **dziwnością**, która **nie jest zachowana** w oddziaływaniach słabych. **W szczególności stan  $d'\bar{s}'$  zawiera domieszkę  $s\bar{d}$**

⇒ możliwe jest przejście, przemiana jednej cząstki w drugą:  $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$



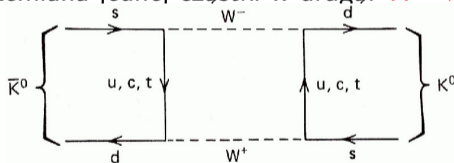


## Mieszanie cząstka-antycząstka

Neutralne mezon produkowane w oddziaływaniach silnych opisujemy jako pary kwark-antykwar, np.  $K^0$  ( $d\bar{s}$ ) lub  $\bar{K}^0$  ( $s\bar{d}$ )

Te dwa stany różnią się tylko **dziwnością**, która **nie jest zachowana** w oddziaływaniach słabych. W szczególności stan  $d'\bar{s}'$  zawiera domieszkę  $s\bar{d}$

⇒ możliwe jest przejście, przemiana jednej cząstki w drugą:  $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$



## Oscylacje

Jeśli w jakimś procesie produkujemy mezon  $K^0$  to w trakcie jego swobodnego ruchu w przestrzeni obserwujemy cykliczne przemiany:

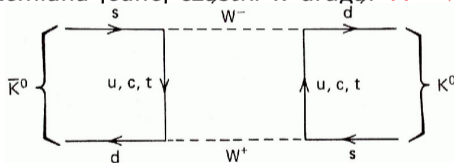
produkcja:  $K^0 \rightarrow K^0$  detekcja blisko punktu produkcji

## Mieszanie cząstka-antycząstka

Neutralne mezon produkowane w oddziaływaniach silnych opisujemy jako pary kwark-antykwar, np.  $K^0$  ( $d\bar{s}$ ) lub  $\bar{K}^0$  ( $s\bar{d}$ )

Te dwa stany różnią się tylko **dziwnością**, która **nie jest zachowana** w oddziaływaniach słabych. **W szczególności stan  $d'\bar{s}'$  zawiera domieszkę  $s\bar{d}$**

⇒ możliwe jest przejście, przemiana jednej cząstki w drugą:  $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$



## Oscylacje

Jeśli w jakimś procesie produkujemy mezon  $K^0$  to w trakcie jego swobodnego ruchu w przestrzeni obserwujemy cykliczne przemiany:

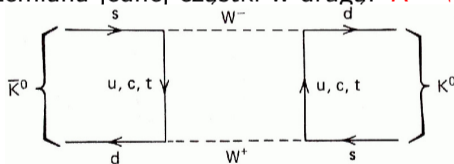
produkcja:  $K^0 \rightarrow$   $\bar{K}^0$  detekcja w jakiejś odległości  $\Delta L$

## Mieszanie cząstka-antycząstka

Neutralne mezon produkowane w oddziaływaniach silnych opisujemy jako pary kwark-antykwar, np.  $K^0$  ( $d\bar{s}$ ) lub  $\bar{K}^0$  ( $s\bar{d}$ )

Te dwa stany różnią się tylko **dziwnością**, która **nie jest zachowana** w oddziaływaniach słabych. **W szczególności stan  $d'\bar{s}'$  zawiera domieszkę  $s\bar{d}$**

⇒ możliwe jest przejście, przemiana jednej cząstki w drugą:  $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$



## Oscylacje

Jeśli w jakimś procesie produkujemy mezon  $K^0$  to w trakcie jego swobodnego ruchu w przestrzeni obserwujemy cykliczne przemiany:

produkcja:  $K^0 \rightarrow$

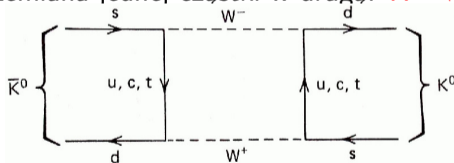
$K^0$   $2\Delta L$

## Mieszanie cząstka-antycząstka

Neutralne mezon produkowane w oddziaływaniach silnych opisujemy jako pary kwark-antykwar, np.  $K^0$  ( $d\bar{s}$ ) lub  $\bar{K}^0$  ( $s\bar{d}$ )

Te dwa stany różnią się tylko **dziwnością**, która **nie jest zachowana** w oddziaływaniach słabych. **W szczególności stan  $d'\bar{s}'$  zawiera domieszkę  $s\bar{d}$**

⇒ możliwe jest przejście, przemiana jednej cząstki w drugą:  $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$



## Oscylacje

Jeśli w jakimś procesie produkujemy mezon  $K^0$  to w trakcie jego swobodnego ruchu w przestrzeni obserwujemy cykliczne przemiany:

produkcja:  $K^0 \rightarrow$

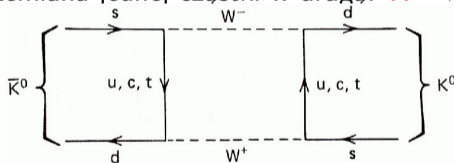
$\bar{K}^0$   $3\Delta L$

## Mieszanie cząstka-antycząstka

Neutralne mezon produkowane w oddziaływaniach silnych opisujemy jako pary kwark-antykwar, np.  $K^0$  ( $d\bar{s}$ ) lub  $\bar{K}^0$  ( $s\bar{d}$ )

Te dwa stany różnią się tylko **dziwnością**, która **nie jest zachowana** w oddziaływaniach słabych. **W szczególności stan  $d'\bar{s}'$  zawiera domieszkę  $s\bar{d}$**

⇒ możliwe jest przejście, przemiana jednej cząstki w drugą:  $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$



## Oscylacje

Jeśli w jakimś procesie produkujemy mezon  $K^0$  to w trakcie jego swobodnego ruchu w przestrzeni obserwujemy cykliczne przemiany:

produkcja:  $K^0 \rightarrow$

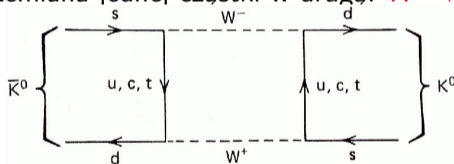
$K^0$   $4\Delta L$

## Mieszanie cząstka-antycząstka

Neutralne mezon produkowane w oddziaływaniach silnych opisujemy jako pary kwark-antykwar, np.  $K^0$  ( $d\bar{s}$ ) lub  $\bar{K}^0$  ( $s\bar{d}$ )

Te dwa stany różnią się tylko **dziwnością**, która **nie jest zachowana** w oddziaływaniach słabych. **W szczególności stan  $d'\bar{s}'$  zawiera domieszkę  $s\bar{d}$**

⇒ możliwe jest przejście, przemiana jednej cząstki w drugą:  $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$



## Oscylacje

Jeśli w jakimś procesie produkujemy mezon  $K^0$  to w trakcie jego swobodnego ruchu w przestrzeni obserwujemy cykliczne przemiany:

produkcja:  $K^0 \rightarrow$

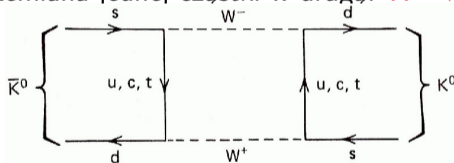
$\bar{K}^0$   $5\Delta L$

## Mieszanie cząstka-antycząstka

Neutralne mezon produkowane w oddziaływaniach silnych opisujemy jako pary kwark-antykwar, np.  $K^0$  ( $d\bar{s}$ ) lub  $\bar{K}^0$  ( $s\bar{d}$ )

Te dwa stany różnią się tylko **dziwnością**, która **nie jest zachowana** w oddziaływaniach słabych. **W szczególności stan  $d'\bar{s}'$  zawiera domieszkę  $s\bar{d}$**

⇒ możliwe jest przejście, przemiana jednej cząstki w drugą:  $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$



## Oscylacje

Jeśli w jakimś procesie produkujemy mezon  $K^0$  to w trakcie jego swobodnego ruchu w przestrzeni obserwujemy cykliczne przemiany:

produkcja:  $K^0 \rightarrow$

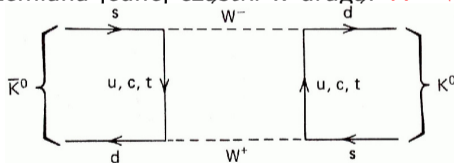
$K^0$   $6\Delta L$

## Mieszanie cząstka-antycząstka

Neutralne mezon produkowane w oddziaływaniach silnych opisujemy jako pary kwark-antykwar, np.  $K^0$  ( $d\bar{s}$ ) lub  $\bar{K}^0$  ( $s\bar{d}$ )

Te dwa stany różnią się tylko **dziwnością**, która **nie jest zachowana** w oddziaływaniach słabych. **W szczególności stan  $d'\bar{s}'$  zawiera domieszkę  $s\bar{d}$**

⇒ możliwe jest przejście, przemiana jednej cząstki w drugą:  $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$



## Oscylacje

Jeśli w jakimś procesie produkujemy mezon  $K^0$  to w trakcie jego swobodnego ruchu w przestrzeni obserwujemy cykliczne przemiany:

produkcja:  $K^0 \rightarrow$

$\bar{K}^0$   $\gamma \Delta L$



- 1 Mieszanie kwarków
- 2 Źródła neutrin**
- 3 Super-Kamiokande
- 4 Oscylacje neutrin

## Promieniotwórczość

Odkrycie promieniotwórczości uranu: [Henri Becquerel, 1896.](#)

1903 - nagroda Nobla, wraz z [M.Skłodowską](#) i [P.Curie](#)

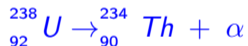
## Promieniotwórczość

Odkrycie promieniotwórczości uranu: [Henri Becquerel, 1896.](#)

1903 - nagroda Nobla, wraz z [M.Skłodowską](#) i [P.Curie](#)

[E.Rutherford](#) and [F.Soddy](#) opublikowali pracę tłumaczącą promieniotwórczość jako wynik **przemiany pierwiastków**: atom emitując promieniowanie przemienia się w inny pierwiastek.

- promieniowanie  $\alpha$



jądra helu:  $2p2n$

- promieniowanie  $\beta$



elektrony ( $\beta^+$  - pozytony)

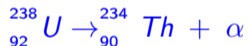
## Promieniotwórczość

Odkrycie promieniotwórczości uranu: [Henri Becquerel, 1896.](#)

1903 - nagroda Nobla, wraz z [M.Skłodowską](#) i [P.Curie](#)

[E.Rutherford](#) and [F.Soddy](#) opublikowali pracę tłumaczącą promieniotwórczość jako wynik **przemiany pierwiastków**: atom emitując promieniowanie przemienia się w inny pierwiastek.

- promieniowanie  $\alpha$



jądra helu:  $2p2n$

- promieniowanie  $\beta$



elektrony ( $\beta^+$  - pozytony)

- promieniowanie  $\gamma$



wysokoenergetyczne fotony

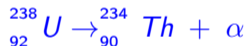
## Promieniotwórczość

Odkrycie promieniotwórczości uranu: [Henri Becquerel, 1896.](#)

1903 - nagroda Nobla, wraz z [M.Skłodowską](#) i [P.Curie](#)

[E.Rutherford](#) and [F.Soddy](#) opublikowali pracę tłumaczącą promieniotwórczość jako wynik **przemiany pierwiastków**: atom emitując promieniowanie przemienia się w inny pierwiastek.

- promieniowanie  $\alpha$



jądra helu:  $2p2n$

- promieniowanie  $\beta$



elektrony ( $\beta^+$  - pozytony)

- promieniowanie  $\gamma$

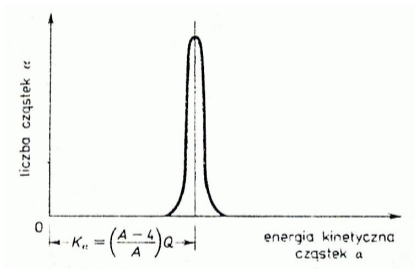


wysokoenergetyczne fotony

Cząstki promieniowania powinny nieść **energię  $E_0$**  odpowiadającą różnicy mas izotopów...

## Rozpady $\alpha$

Dyskretne widmo energii:



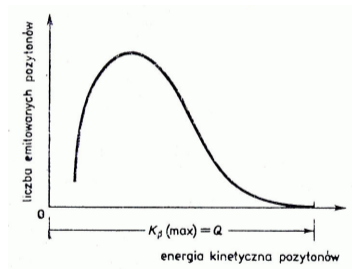
Energia emitowanej cząstki

$$E_{\alpha} = E_0 \equiv \Delta m c^2$$

## Rozpad $\beta$

Ciągłe widmo energii:

Naruszenie zasady zachowania !?



Energia emitowanych elektronów

$$E_{\beta} \leq E_0 \equiv \Delta m c^2$$

## Hipoteza Pauliego

Aby “uratować” zasadę zachowania energii Pauli zaproponował istnienie neutrino - dodatkowej cząstki unoszącej część energii w rozpadzie  $\beta$ :



## Hipoteza Pauliego

Aby “uratować” zasadę zachowania energii Pauli zaproponował istnienie neutrino - dodatkowej cząstki unoszącej część energii w rozpadzie  $\beta$ :



Neutrino nie oddziałuje silnie (nie ma koloru), elektromagnetycznie (nie ma ładunku). Oddziaływania grawitacyjne są pomijalne (ma praktycznie zerową, zaniedbywalną masę).

Aby opisać rozpad  $\beta$  (z udziałem neutrino) trzeba wprowadzić nowe, dodatkowe oddziaływanie: oddziaływanie słabe.



## Hipoteza Pauliego

Aby “uratować” zasadę zachowania energii Pauli zaproponował istnienie neutrina - dodatkowej cząstki unoszącej część energii w rozpadzie  $\beta$ :



Neutrino nie oddziałuje silnie (nie ma koloru), elektromagnetycznie (nie ma ładunku). Oddziaływania grawitacyjne są pomijalne (ma praktycznie zerową, zaniedbywalną masę).

Aby opisać rozpad  $\beta$  (z udziałem neutrina) trzeba wprowadzić nowe, dodatkowe oddziaływanie: oddziaływanie słabe.

Na poziomie nukleonów rozpad  $\beta^-$  odpowiada przemianie:



rozpad ten zachodzi również dla swobodnego neutronu...

Teorię opisującą ten rozpad zaproponował w 1933 roku Enrico Fermi...

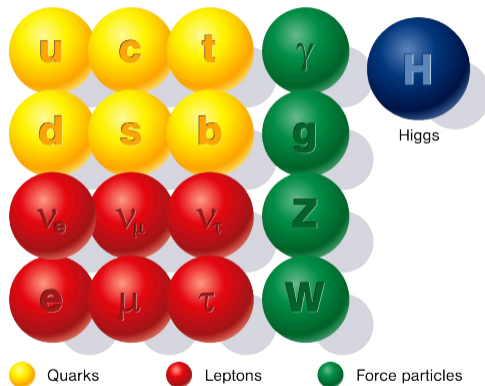
## Model Standardowy

Przeprowadzone doświadczenia wykazały, że każdy naładowany lepton sprzęga się z innym rodzajem neutrina

⇒ trzy zapachy neutrin

Do końca XX wieku wierzyliśmy, że

- neutrina są **bezmasywe**
- **zapach leptonów jest ściśle zachowany**



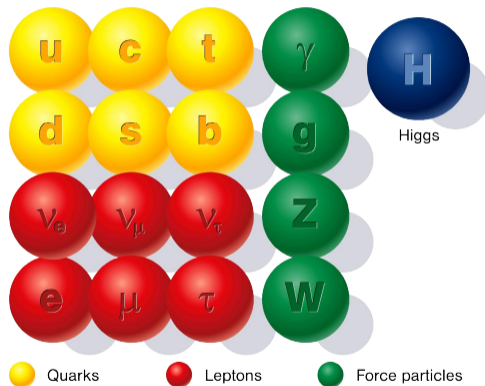
## Model Standardowy

Przeprowadzone doświadczenia wykazały, że każdy naładowany lepton sprzęga się z innym rodzajem neutrina

⇒ trzy zapachy neutrin

Do końca XX wieku wierzyliśmy, że

- neutrina są **bezmasywe**
- **zapach leptonów jest ściśle zachowany**



Ale zachowanie liczby leptonowej nie wynika z żadnej symetrii.

Zostało wprowadzone na podstawie **braku obserwacji łamania liczby leptonowej...**

## Pomiary masy

Dokładny pomiar końca widma elektronów  $\beta$  pozwala wyznaczyć  $m_\nu$

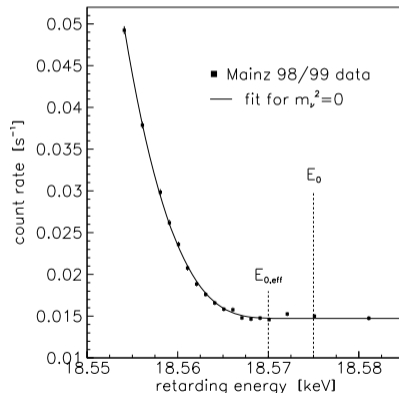
Wyniki eksperymentu w Mainz (2001)



$$m_\nu^2 = -1.6 \pm 2.5_{(stat)} \pm 2.1_{(sys)} \text{ eV}^2$$

⇒ ograniczenie na masę  
neutrina elektronowego:

$$m_\nu < 2.2 \text{ eV (95\% CL)}$$



## Pomiary masy

Dokładny pomiar końca widma elektronów  $\beta$  pozwala wyznaczyć  $m_\nu$

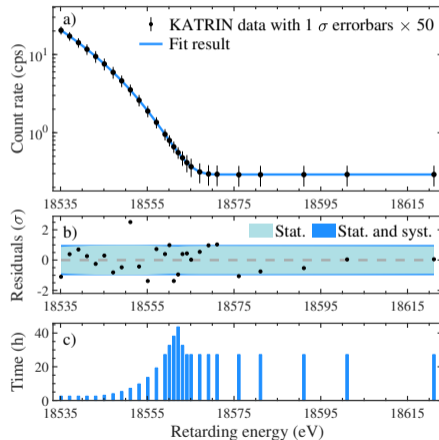
Najnowsze wyniki KATRIN (dane 2021)



$$m_\nu^2 = 0.26 \pm 0.34 \text{ eV}^2$$

⇒ ograniczenie na masę  
neutrina elektronowego:

$$m_\nu < 0.8 \text{ eV (90\% CL)}$$



## Pomiary masy

Dokładny pomiar końca widma elektronów  $\beta$  pozwala wyznaczyć  $m_\nu$

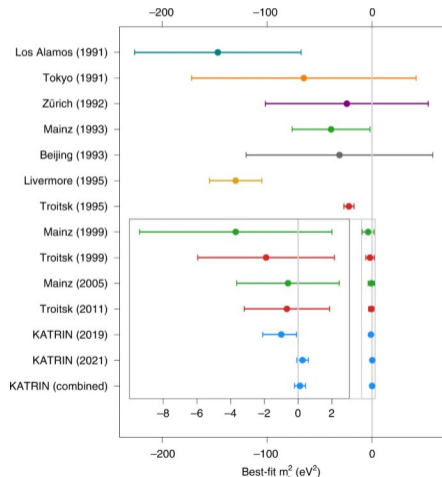
Najnowsze wyniki KATRIN (dane 2021)



$$m_\nu^2 = 0.26 \pm 0.34 \text{ eV}^2$$

⇒ ograniczenie na masę  
neutrina elektronowego:

$$m_\nu < 0.8 \text{ eV} \text{ (90\% CL)}$$



## Pomiary masy

Dokładny pomiar końca widma elektronów  $\beta$  pozwala wyznaczyć  $m_\nu$

Najnowsze wyniki KATRIN (dane 2021)



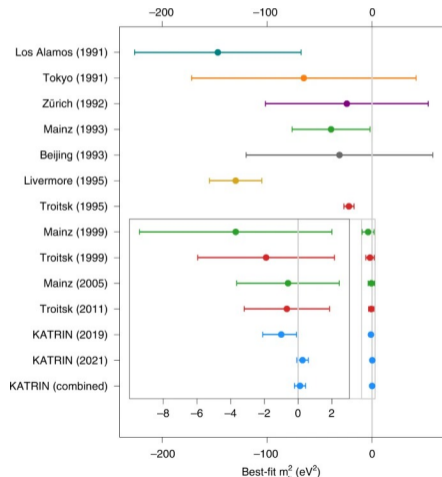
$$m_\nu^2 = 0.26 \pm 0.34 \text{ eV}^2$$

⇒ ograniczenie na masę  
neutrina elektronowego:

$$m_\nu < 0.8 \text{ eV (90\% CL)}$$

Ograniczenia kosmologiczne

$$\sum m_\nu < 0.11 - 0.26 \text{ eV (95\% CL)}$$



## Ziemia

Rozpady promieniotwórcze zachodzą cały czas w skorupie ziemskiej. W każdej tonie skorupy kontynentalnej ok. 1g  $^{238}\text{U}$  i 6g  $^{232}\text{Th}$ . Szacowany strumień wydostających się z Ziemi neutrin

$$\Phi_Z \sim 10^7 \frac{1}{\text{s} \cdot \text{cm}^2}$$

Wydaje się dużo? Poczekajmy...



## Ziemia

Rozpady promieniotwórcze zachodzą cały czas w skorupie ziemskiej. W każdej tonie skorupy kontynentalnej ok. 1g  $^{238}\text{U}$  i 6g  $^{232}\text{Th}$ . Szacowany strumień wydostających się z Ziemi neutrin

$$\Phi_Z \sim 10^7 \frac{1}{\text{s} \cdot \text{cm}^2}$$

Wydaje się dużo? Poczekajmy...

## Człowiek

Każdy z nas jest źródłem neutrin. Przeciętny człowiek ma w sobie 20g naturalnego izotopu potasu  $^{40}\text{K}$ . Czas połowicznego zaniku 1.28 mld lat, co daje ok. 4000 rozpadów na sekundę.  
⇒ Dziennie nasze ciało produkuje ok. 340 mln neutrin !...

## Reaktory

W każdym akcie rozszczepienia jądra  $^{238}\text{U}$  wyzwala się  $\sim 200$  MeV energii.  
Z tego średnio **9 MeV** unoszone jest przez **antyneutrino** (średnio 6 na jądro).

Blok energetyczny o mocy 1 GW  $\Rightarrow \sim 10^{20}$  rozszczepień/s  $\Rightarrow \sim 6 \cdot 10^{20}$  neutrin/s

Na szczęście natężenie strumienia neutrin **maleje z kwadratem odległości** od reaktora  
W odległości **10 m od reaktora** strumień neutrin:

$$\Phi_R \sim 5 \cdot 10^{13} \frac{1}{\text{s} \cdot \text{cm}^2}$$

W odległości **1 km od reaktora** strumień neutrin:

$$\Phi_R \sim 5 \cdot 10^9 \frac{1}{\text{s} \cdot \text{cm}^2}$$

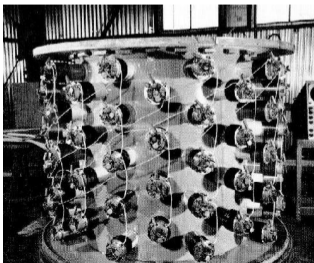
W odległości rzędu 100 km zaczynają przeważać neutrina z Ziemi...

## Doświadczenia Reinesa i Cowana

Oddziaływanie **neutrin** zaobserwowano po raz pierwszy wykorzystując jako źródło **reaktor jądrowy**. Produkcja neutrin m.in. w rozpadach neutronów:



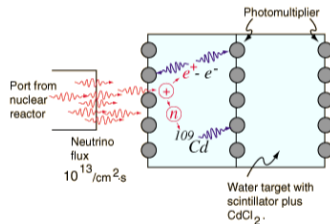
Detektor:



A. F. Żarnecki

## Pierwsza obserwacja neutrin (1953-1959)

Zaobserwowano reakcję



- pozytrony anihilują emitując **dwa fotony**.
- kadm zawarty w wodzie wychwytuje neutrony  
 $\Rightarrow$  **(opóźniona)** emisja **trzeciego fotonu**.
- $\Rightarrow$  **koincydencja** trzech sygnałów pozwala na skuteczne eliminowanie tła

## Oddziaływania

Przekrój czynny ( $\sim$ prawdopodobieństwo) oddziaływania neutrin z materią jest **niewyobrażalnie mały**.

Dla neutrin o energii rzędu 1 MeV (rozpady i reaktory)

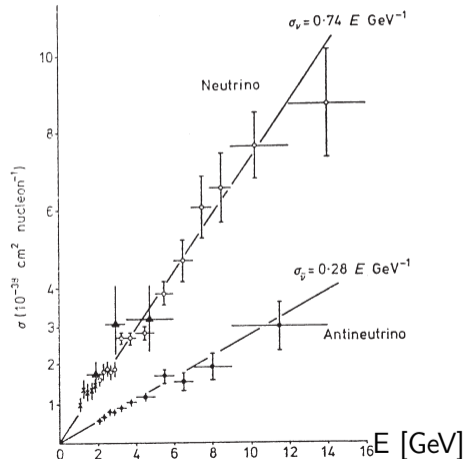
$$\sigma_{\nu N} \sim 10^{-43} \text{ cm}^2$$

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

Dla porównania:  $\sigma_{NN} \sim 10^{-24} \text{ cm}^2$

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

Potrzebujemy **intensywnych źródeł** i **bardzo dużych detektorów...**

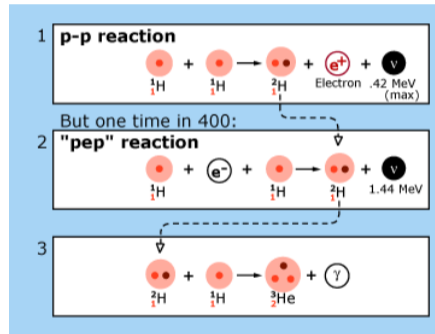
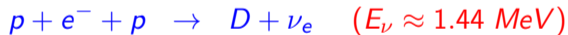


## Słońce

Słońce jest niezwykle silnym źródłem neutrin. Większość pochodzi z reakcji **p-p** produkcji deuteru:



Trochę wyższe energie z procesu "pep":

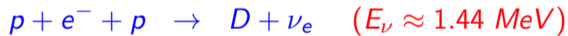


## Słońce

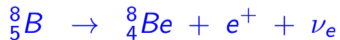
Słońce jest niezwykle silnym źródłem neutrin. Większość pochodzi z reakcji **p-p** produkcji deuteru:



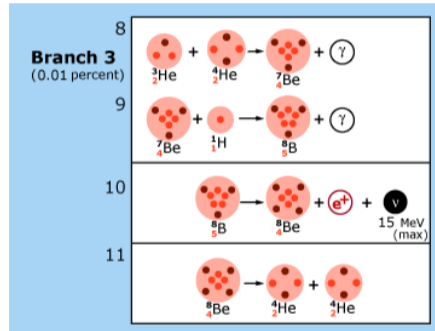
Trochę wyższe energie z procesu “**pep**”:



Najwyższe energie dostępne w rozpadach  ${}^8\text{B}$



gdzie neutrino może osiągnąć **15 MeV**



Wyższe energie łatwiej obserwować w detektorach fizyki cząstek...

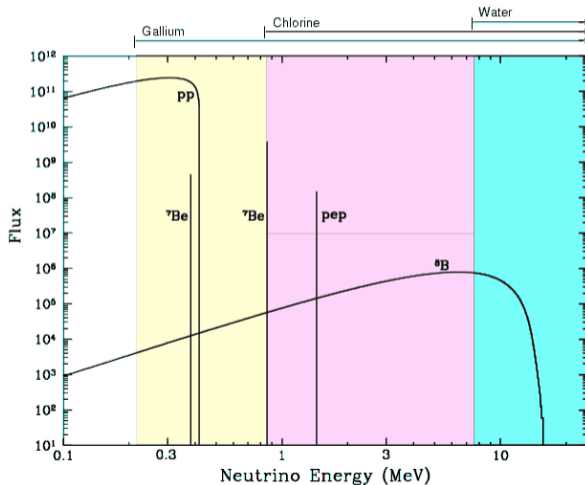
## Słońce

Całkowity strumień neutrin docierających do Ziemi:

$$\Phi_S \sim 6 \cdot 10^{10} \frac{1}{s \cdot cm^2} \quad (!)$$

jak  $\sim 300$  m od reaktora 1 GW  
jednak dominują niskie energie...

Widmo energii **neutrin elektronowych** ze Słońca

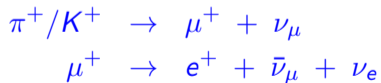


## Neutrina atmosferyczne

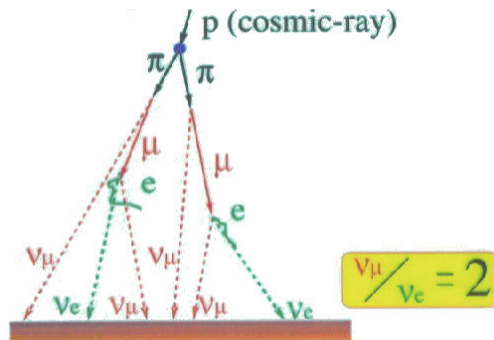
Pierwotne promieniowanie kosmiczne składa się głównie z protonów i lekkich jąder o energiach od pojedynczych GeV do  $\sim 10^{12}$  GeV ( $10^{21}$  eV).

Oddziałują w atmosferze z jądrami tlenu i azotu wywołując kaskady cząstek wtórnych, w większości pionów  $\pi^\pm$ , także kaonów  $K^\pm$ .

Neutrina powstają głównie w rozpadach:



Analogiczne rozpady zachodzą dla  $\pi^-$ ,  $K^-$  i  $\mu^-$



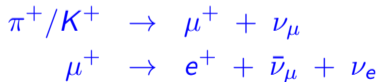


## Neutrina atmosferyczne

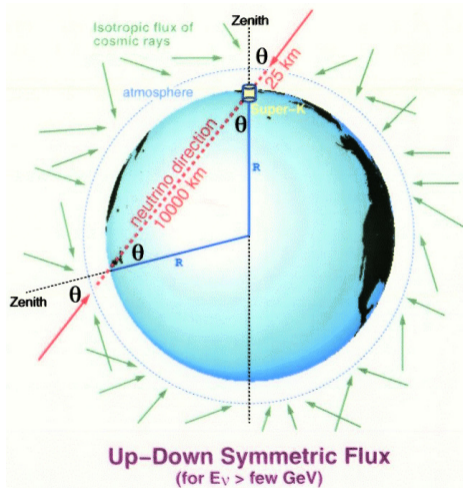
Pierwotne promieniowanie kosmiczne składa się głównie z protonów i lekkich jąder o energiach od pojedynczych GeV do  $\sim 10^{12}$  GeV ( $10^{21}$  eV).

Oddziałują w atmosferze z jądrami tlenu i azotu wywołując kaskady cząstek wtórnych, w większości pionów  $\pi^\pm$ , także kaonów  $K^\pm$ .

Neutrina powstają głównie w rozpadach:



Ponieważ pierwotne promieniowanie kosmiczne jest izotropowe **strumień neutrin atmosferycznych** też powinien być izotropowy !



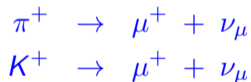
## Neutrina akceleratorowe

Potrafimy wytwarzać wysokiej energii, intensywne wiązki protonów.

Wiązki te możemy skierować na gęste tarcze, w których wywołamy reakcje podobne do zachodzących w atmosferze dla promieniowania kosmicznego.

W reakcjach tych produkują się licznie piony i kaony.

W ich rozpadach produkowane są głównie neutrina mionowe:



Przez odpowiednie ogniskowanie produkowanych pionów i kaonów możemy dokonać ich selekcji i uzyskać wysokoenergetyczne wiązki neutrin lub antyneutrin mionowych

Niestety problemem jest stosunkowo mała intensywność...

- 1 Mieszanie kwarków
- 2 Źródła neutrin
- 3 Super-Kamiokande**
- 4 Oscylacje neutrin

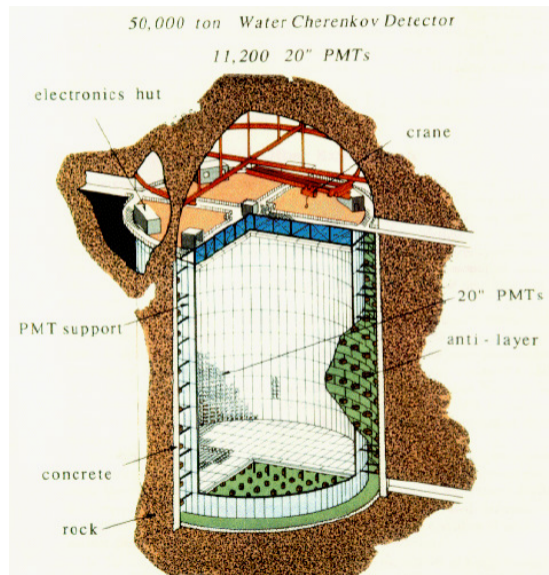
## Detektor Super-Kamiokande Japonia

W starej kopalni, 1 km pod górą Kamioka, komora o wysokości 40 m i średnicy 40 m, wypełniona **ultra czystą wodą** (50 tys. ton)

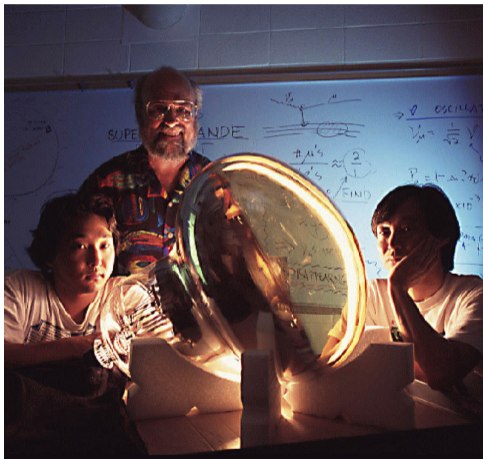
11'000 fotopowielaczy (średnica 50 cm!) rejestruje przechodzące cząstki

rejestrowane jest **promieniowanie Czerenkowa**

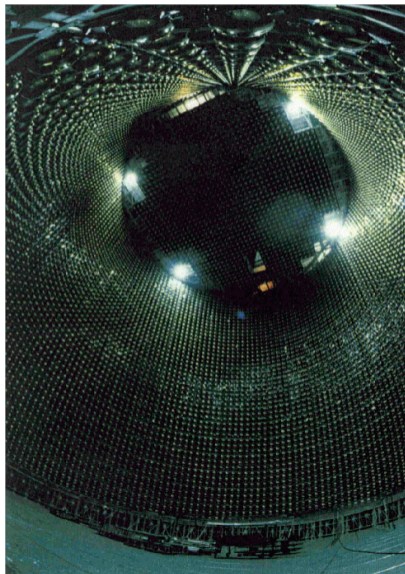
emitowane gdy cząstka naładowana (produkt oddziaływania neutrina) porusza się w ośrodku z prędkością większą od prędkości światła

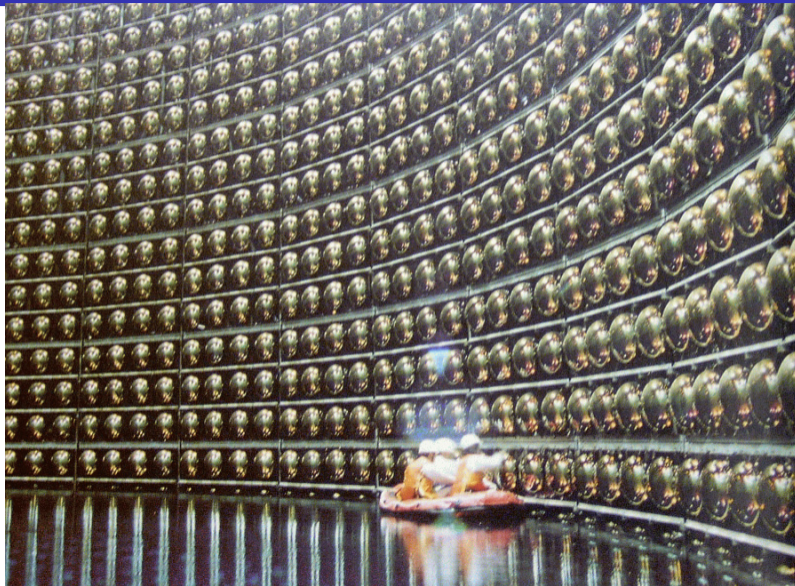


## Fotopowielacz



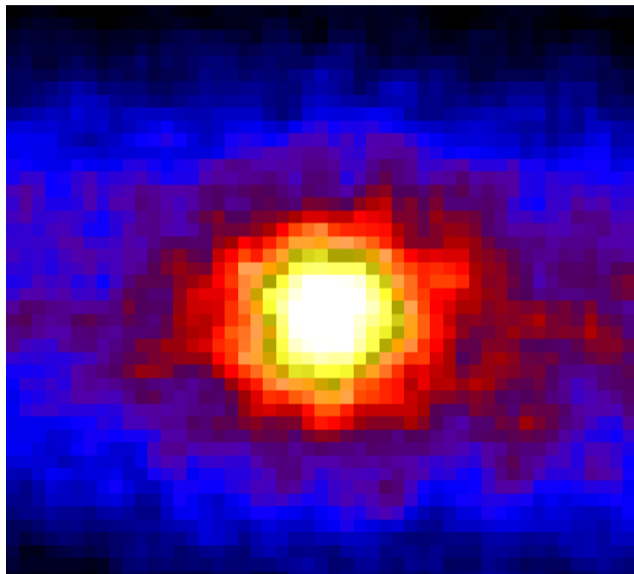
## Detektor





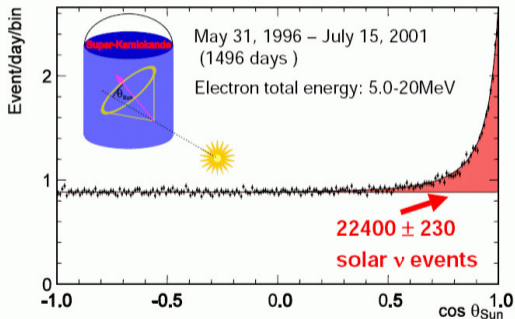
Obraz Słońca rekonstruowany przez Super-Kamiokande na podstawie obserwacji neutrin

prawdziwy rozmiar Słońca  $\sim \frac{1}{2}$  piksel



## Obserwacja neutrin słonecznych

Oddziaływania **neutrin słonecznych** możemy odróżnić od oddziaływań innych neutrin mierząc **kąt emisji** elektronu względem **kierunku od Słońca**. Przewidywania teorii:

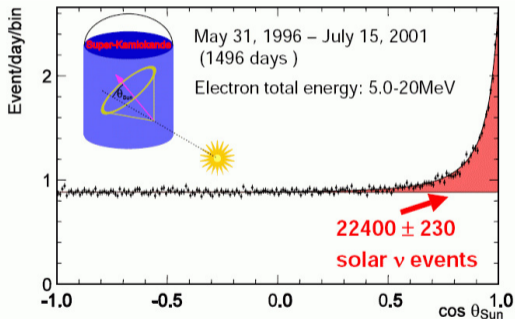


$$\Phi_S^{(B)} = 5.3 \pm 0.6 \cdot 10^6 \frac{1}{s \cdot \text{cm}^2}$$



## Obserwacja neutrin słonecznych

Oddziaływania **neutrin słonecznych** możemy odróżnić od oddziaływań innych neutrin mierząc **kąt emisji** elektronu względem **kierunku od Słońca**. Przewidywania teorii:



$$\Phi_S^{(B)} = 5.3 \pm 0.6 \cdot 10^6 \frac{1}{s \cdot \text{cm}^2}$$

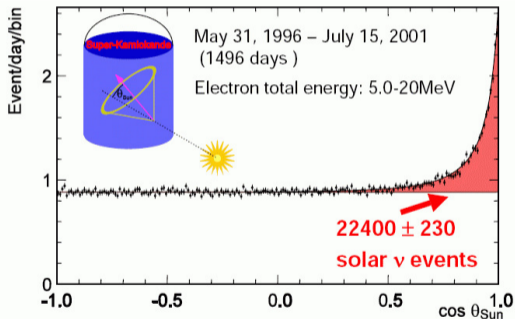
Strumień zmierzony przez S-K:

$$\Phi_S^{(B)} = 2.4 \pm 0.1 \cdot 10^6 \frac{1}{s \cdot \text{cm}^2}$$

Widzimy mniej niż połowę oczekiwanego strumienia...

## Obserwacja neutrin słonecznych

Oddziaływania **neutrin słonecznych** możemy odróżnić od oddziaływań innych neutrin mierząc **kąt emisji** elektronu względem **kierunku od Słońca**. Przewidywania teorii:



$$\Phi_S^{(B)} = 5.3 \pm 0.6 \cdot 10^6 \frac{1}{s \cdot cm^2}$$

Strumień zmierzony przez S-K:

$$\Phi_S^{(B)} = 2.4 \pm 0.1 \cdot 10^6 \frac{1}{s \cdot cm^2}$$

Widzimy mniej niż połowę oczekiwanego strumienia...

Deficyt neutrin słonecznych był już mierzony w latach '60 XX w. !

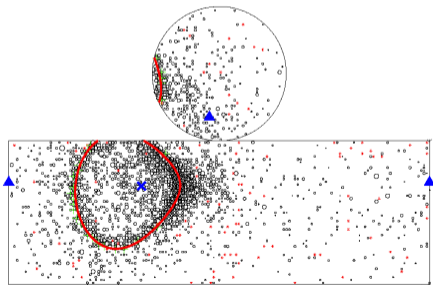
Ale zrozumieliśmy to dopiero w wieku XXI.

Dla neutrin **wysokich energii** (**neutrina atmosferyczne, akceleratorowe**) możliwa jest identyfikacja zapachu neutrina na podstawie kształtu rozkładu sygnału w detektorze...

## Neutrino elektronowe



Krótki zasięg elektronu, **rozmyty** pierścień

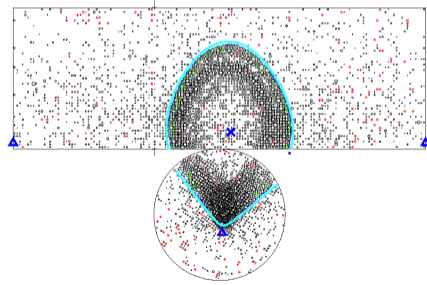


Próg (poziom tła):  $E_\nu > 5 \text{ MeV} \dots$

## Neutrino mionowe



Długa droga mionu w wodzie, **„gruby”** pierścień.

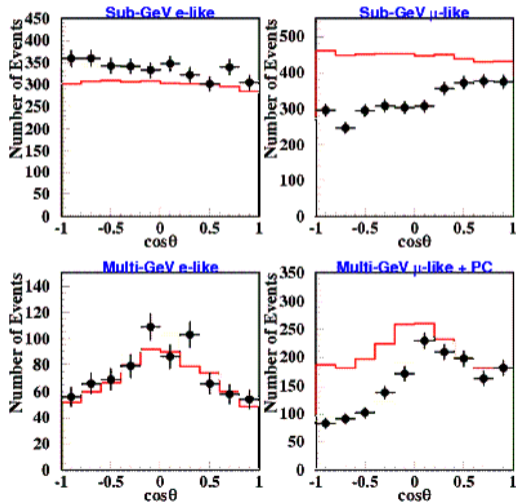


Próg:  $E_\nu > m_\mu \sim 100 \text{ MeV} \dots$

## Neutrina atmosferyczne

Zależność liczby neutrin **elektronowych** i **mionowych** od kierunku ( $\cos\theta = 1$  gdy lecą do dołu)  $\Rightarrow$

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



## Neutrina atmosferyczne

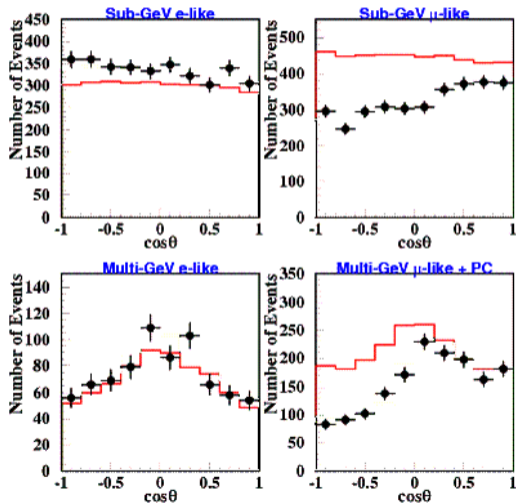
Zależność liczby neutrin **elektronowych** i **mionowych** od kierunku ( $\cos\theta = 1$  gdy lecą do dołu)  $\Rightarrow$

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

Wyraźnie **mniej**  $\nu_\mu$  lecących **od dołu** niż z góry !

Czy neutrina mionowe mogą “znikać” przechodząc przez Ziemię ?

Nie może to być wynikiem “zwykłego” oddziaływania z materią bo jego prawdopodobieństwo (przekój czynny) jest zbyt małe.



## Neutrina atmosferyczne

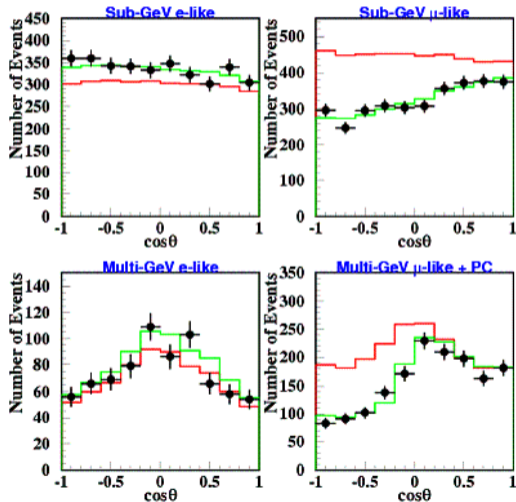
Zależność liczby neutrin **elektronowych** i **mionowych** od kierunku ( $\cos\theta = 1$  gdy lecą do dołu)  $\Rightarrow$

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

Wyraźnie **mniej**  $\nu_\mu$  lecących **od dołu** niż z góry !

Czy neutrina mionowe mogą “znikać” przechodząc przez Ziemię ?

Jedynym wyjaśnieniem jest założenie, że neutrina oscylują (zielona krzywa)



- 1 Mieszanie kwarków
- 2 Źródła neutrin
- 3 Super-Kamiokande
- 4 Oscylacje neutrin

## Obserwacje

Wyniki doświadczalne wykazały ponad wszelką wątpliwość, że

- neutrina elektronowe ze Słońca “znikają” w drodze do Ziemi (w próżni!?)
- atmosferyczne neutrina mionowe “znikają” przechodząc przez Ziemię



## Obserwacje

Wyniki doświadczalne wykazały ponad wszelką wątpliwość, że

- neutrina elektronowe ze Słońca “znikają” w drodze do Ziemi (w próżni!?)
- atmosferyczne neutrina mionowe “znikają” przechodząc przez Ziemię

## Wyjaśnienie

W oddziaływaniach słabych (CC) powstają neutrina o określonym zapachu (elektronowe/mionowe/taonowe).

Ale “fizyczne” (swobodne) neutrina są mieszankami stanów zapachowych.

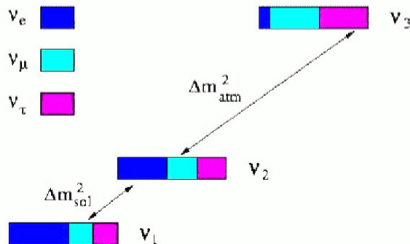
Lecące neutrimo może zmienić zapach!

A detektory są czułe głównie na  $\nu_e$ .

Pełny opis wymaga mechaniki kwantowej.

Wymaga też, żeby neutrima miały masę!

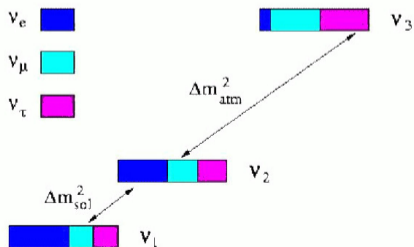
Widmo mas (przykład):



W oddziaływaniu określonego leptonu (np. elektronu) produkowane jest “słabe” neutrino, które jest **złożeniem** kilku stanów “fizycznych”, swobodnych neutrin ( $\nu_1, \nu_2, \nu_3$ ).  
Każdy z tych stanów zawiera **mieszankę** różnych **zapachów** ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ).

Produkowana jest zawsze kombinacja o określonej liczbie leptonowej.

Gdyby neutrina **nie miały masy** to produkowana kombinacja (**superpozycja**) stanów nie zmieniałaby się w czasie  $\Rightarrow$  **zachowanie liczby leptonowej**.



Jeśli przyjmujemy, że neutrina mają masy to każda składowa (stan fizyczny) porusza się z inną prędkością.

$\Rightarrow$  własności obserwowanej kombinacji zależą od względnej fazy (przesunięcia) składowych

$\Rightarrow$  zależą od przebytej odległości, zmieniają się w czasie.

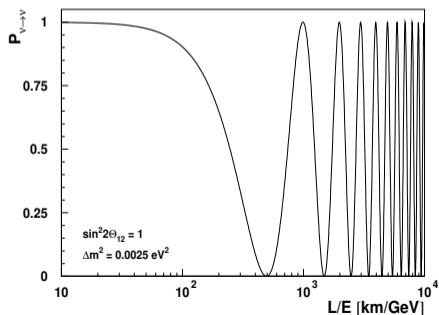
## Prawdopodobieństwo “przetrwania”

Mechanika kwantowa pozwala nam policzyć jakie jest prawdopodobieństwo, że po czasie  $t$  neutrino wyprodukowane jako  $\nu_\mu$  oddziała jako  $\nu_\mu$ .

$$P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu}(t) \approx 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2 \left( 1.27 \cdot \Delta m^2 \cdot \frac{L}{E} \right)$$

Zakładając, że istotny jest tylko wkład od **dwóch stanów**  $\nu_1$  i  $\nu_2$ .

$L = c \cdot t$  [km],  $\Delta m^2 = m_1^2 - m_2^2$  [eV<sup>2</sup>], energia  $E$  [GeV].



Jesli **różnice mas** są bardzo **małe** to oscylacje pojawiają się dopiero dla bardzo **dużych odległości**...

**Kluczowy parametr:**  $\theta$  - tzw. **kąt mieszania**

Dla dużych  $L/E \Rightarrow \langle P \rangle \approx 1 - \frac{1}{2} \sin^2(2\theta)$   
 $\Rightarrow$  **największe “znikane”** dla  $\theta = 45^\circ$

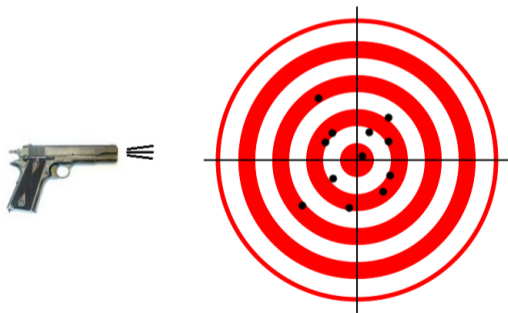
## Model

Wyobraźmy sobie, że są trzy kalibry broni, z której możemy strzelać i trzy rodzaje pocisków:



## Model

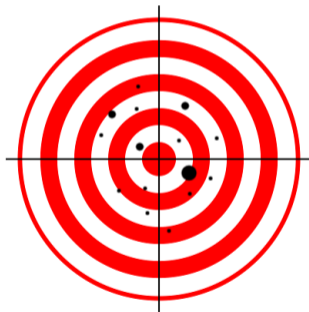
Wyobraźmy sobie, że są trzy kalibry broni, z której możemy strzelać i trzy rodzaje pocisków:



Gdy strzelamy na małą odległość, ślady na tarczy odpowiadają kalibrowi broni...

## Model

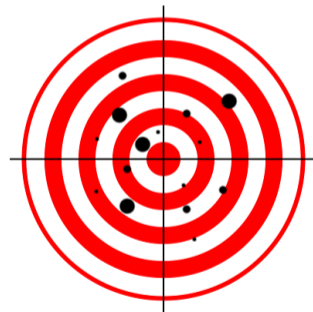
Wyobraźmy sobie, że są trzy kalibry broni, z której możemy strzelać i trzy rodzaje pocisków:



Ale przy większej odległości, kaliber kuli może zmienić się w locie...

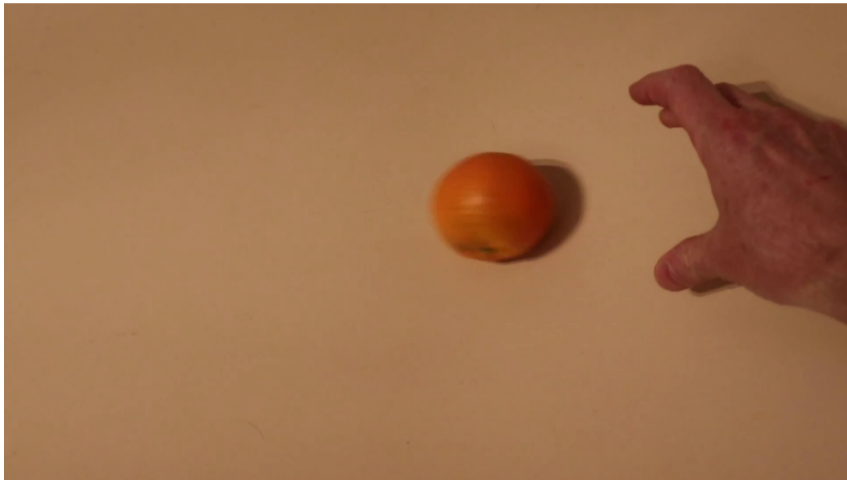
## Model

Wyobraźmy sobie, że są trzy kalibry broni, z której możemy strzelać i trzy rodzaje pocisków:



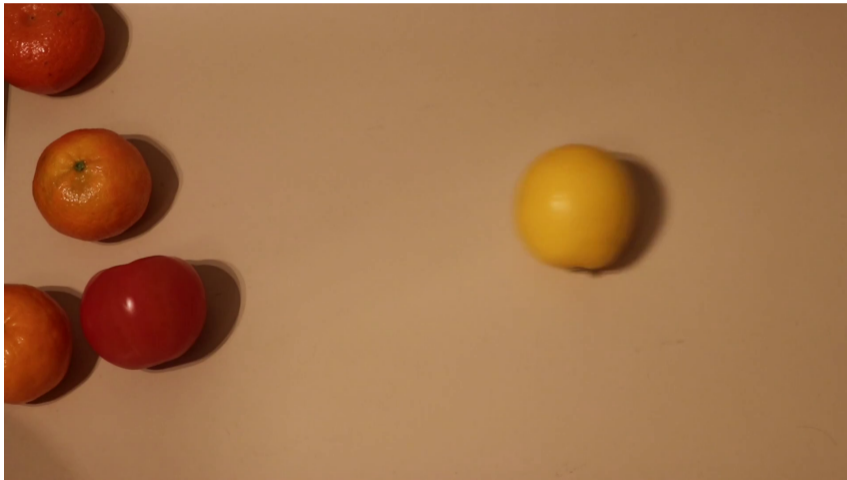
Na bardzo dużych odległościach wszystkie kalibry dokładnie się przemieszają...

## Model oscylacji - film





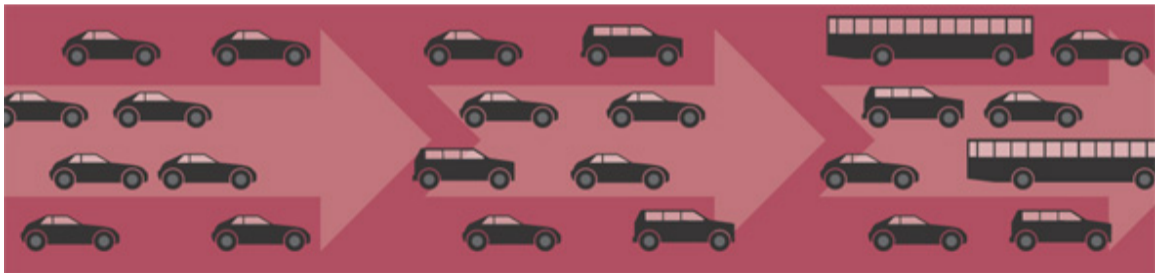
## Model oscylacji - film



## Model

Można sobie też wyobrazić samochody osobowe, które zmieniają się w trakcie podróży:

samochód osobowy  $\Leftrightarrow$  SUV  $\Leftrightarrow$  autobus



źródło: J. Pedro Ochoa-Ricoux @ ICHEP'2024

## Model

W konkursie ogłoszonym przez [Symmetry Magazine](#) wygrała analogia z bajką o Kopciuszk...  
Im dłużej Kopciuszek podróżuje kareta tym większa szansa, że kareta zmieni się w dynię...

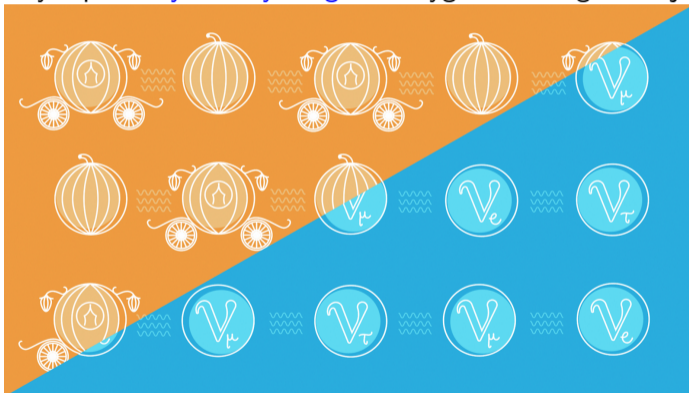


Illustration by Sandbox Studio, Chicago

Im dłużej Kopciuszek podróżuje kareta tym większa szansa, że kareta zmieni się w dynię...

## Neutrina atmosferyczne

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

Dopasowanie do danych, zakładając oscylacje  $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ :

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

## Neutrina atmosferyczne

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

Dopasowanie do danych, zakładając oscylacje  $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ :

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

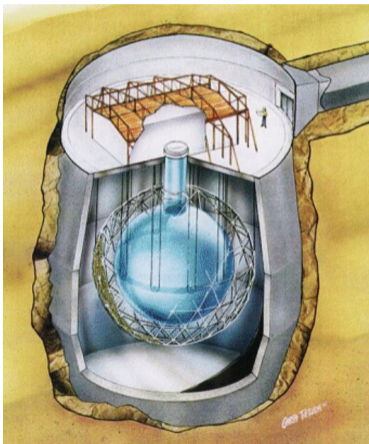
## Neutrina słoneczne

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  
 $\Rightarrow$  **neutrina powinny mieć masy rzędu 0.01 eV**

**SNO** (Sudbury Neutrino Observatory) potwierdziło ostatecznie oscylacje neutrin słonecznych



Ogromny zbiornik wypełniony 7000 t wody  
W środku kula 1000 t ciężkiej wody ( $D_2O$ )

Ok. 9500 fotopowielaczy mierzy promieniowanie Czerenkowa

Dzięki wykorzystaniu ciężkiej wody detektor czuły nie tylko na neutrina elektronowe, ale także na neutrina mionowe i taonowe.

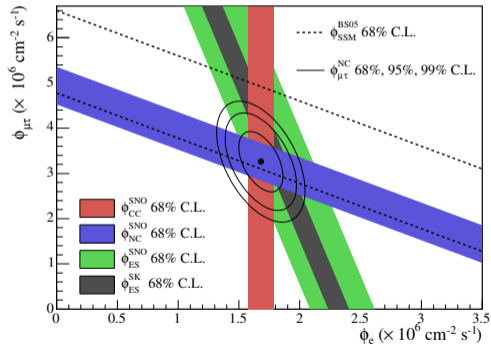
Reakcja “ślepa” na zapach neutrin (NC - wymiana  $Z^0$ ):



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

## Eksperyment SNO

Zmierzone strumienie neutrin słonecznych:



Całkowity strumień neutrin (pasek niebieski):

$$\phi_{\text{tot}}^{\text{SNO}} = 5.25 \pm 21 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{s} \cdot \text{cm}^2}$$

bardzo dobrze zgodny z przewidywaniami (przerywane linie).

Dopasowany do danych ułamek  $\nu_e$  w strumieniu (dla  $E_\nu = 10 \text{ MeV}$ ):

$$p_{ee}^{\text{SNO}} = 0.317 \pm 0.018$$

⇒ Idealne mieszanie 3 zapachów!

Neutrina docierające ze Słońca tylko w  $\frac{1}{3}$  pozostają neutrinami elektronowymi...

## 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**.



## Eksperyment Kamland



**Japonia** - “mocarstwo” energetyki atomowej.

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

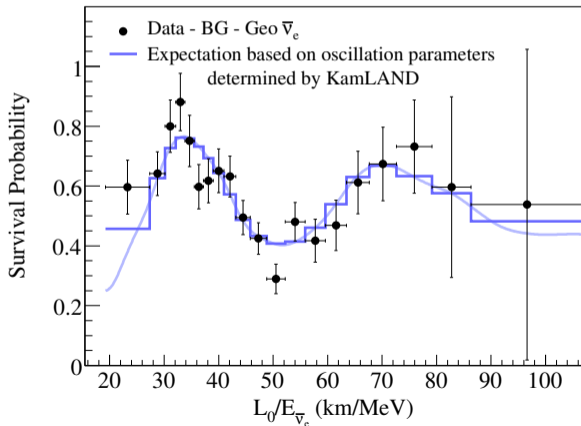
Duży strumień neutrin od licznych reaktorów znajdujących się w odległości **140–210 km**. Budowa podobna do SNO:

- 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**.

**Mierzymy widmo energii neutrin i porównujemy z oczekiwaniami...**

## Eksperyment KAMLAND

Zmierzone **prawdopodobieństwo przetrwania** dla neutrin ( $\bar{\nu}_e$ ) reaktorowych:



Wyraźne oscylacje!

Widoczna **“regeneracja”**  $\bar{\nu}_e$   
 dla  $L/E$  powyżej 50 km/MeV

To wyklucza hipotezę, że “znikanie”  
 neutrin jest wynikiem oddziaływania...

Neutrino zapostulowane przez Pauliego miały być bardzo “nudne”.

Pauli nie wierzył w ogóle, że zostaną odkryte!

Do końca XX w. niewiele poświęcano im uwagi.

Eksperyment Super-Kamiokande zbudowano, żeby szukać... rozpadów protonu!

(będzie jeszcze o tym mowa)

Od końca XX w. pojawiło się wiele nowych wyników, które zrewolucjonizowały nasze spojrzenie na neutrino. Obecnie jest to jeden z wiodących kierunków badań w fizyce cząstek!

W roku 2012 zmierzaliśmy po raz pierwszy trzeci (ostatni brakujący) kąt mieszania neutrin...

Obecnie budowane już są kolejnej generacji dużych detektorów neutrin.

Mamy nadzieję, na kolejne przełomowe wyniki...