

Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

Neutrino i ich oscylacje

Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki

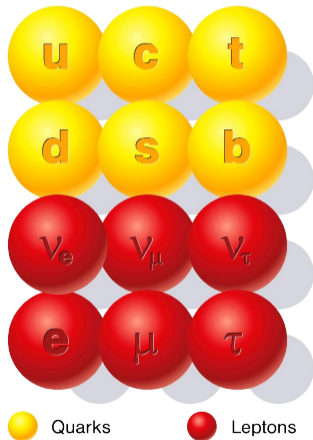


12 grudnia 2023

- 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:

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

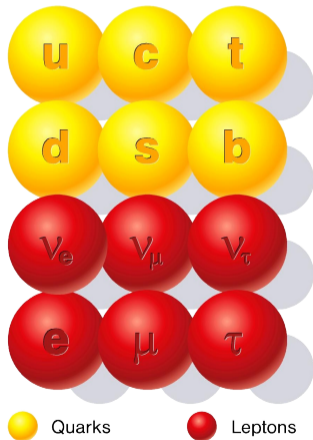
$$u \rightarrow u + g$$

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 procesu 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

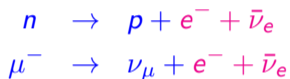
W **pierwszym przybliżeniu**, wymiana W^\pm jest przejściem w ramach jednego dubletu:

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

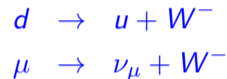
Kąt Cabibbo

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:

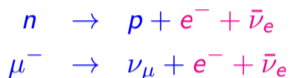


Jednak rozpady hadronów zdawały się zachodzić **odrobinę za wolno** w porównaniu do μ^\pm .
Mniejsze sprzężenie kwarków do W^\pm !?

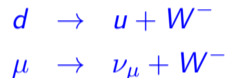
Kąt Cabibbo

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 μ^\pm** .
Mniejsze sprzężenie kwarków do W^\pm !?

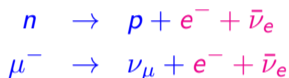
Z drugiej strony rozpady np. cząstek "dziwnych" są dużo wolniejsze, wymagają przejścia nie mieszczącego się w jednym dublecie:



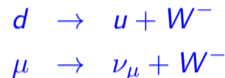
Kąt Cabibbo

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 μ^\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 **mieszkanką 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

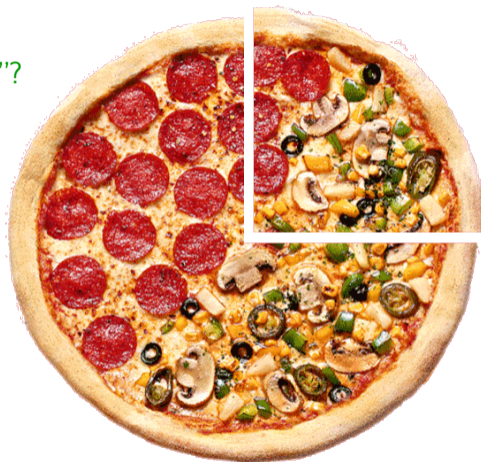
Jak może opisać "mieszanie"?



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 Λ tłumione w porównaniu do rozpadów μ^- o czynniki odpowiednio proporcjonalne do $\cos^2 \theta_C$ (~ 0.95 ; niewielka poprawka) i $\sin^2 \theta_C$ (~ 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 Λ tłumione w porównaniu do rozpadów μ^- o czynniki odpowiednio proporcjonalne do $\cos^2 \theta_C$ (~ 0.95 ; niewielka poprawka) i $\sin^2 \theta_C$ (~ 0.05 ; duże tłumienie, "dziwne" rozpady)

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

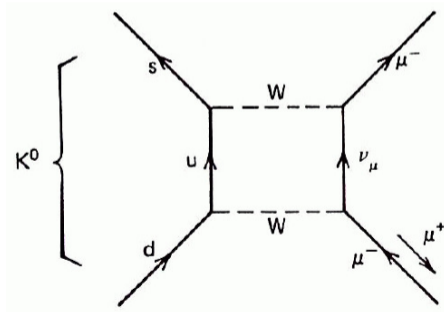
Jednak założone mieszanie kwarków dopuszczało też istnienie procesów z niezachowaniem zapachu (typu FCNC).

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 Λ tłumione w porównaniu do rozpadów μ^- o czynniki odpowiednio proporcjonalne do $\cos^2 \theta_C$ (~ 0.95 ; niewielka poprawka) i $\sin^2 \theta_C$ (~ 0.05 ; duże tłumienie, "dziwne" rozpady)

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

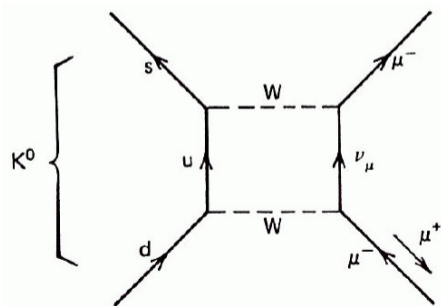
Jednak założone mieszanie kwarków dopuszczało też istnienie procesów z niezachowaniem zapachu (typu FCNC).

Oczekiwany kanał rozpadu:

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

Na poziomie kwarkowym:

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



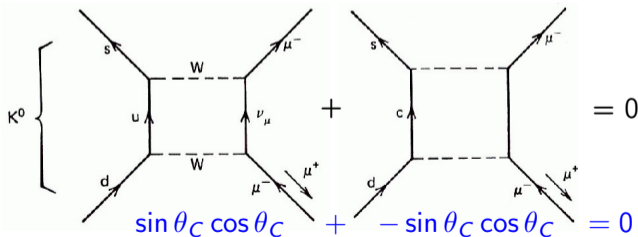
Ale takich rozpadów nie obserwujemy?!...

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”):

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

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

Te stany kwarkowe uczestniczą w oddziaływaniach silnych i elektromagnetycznych

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 ($s\bar{d}$)

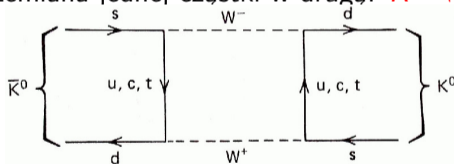
Te dwa stany różnią się tylko **dziwnością**, która **nie jest zachowana** w oddziaływaniach słabych. W szczególności stan $d'\bar{s}'$ zawiera domieszkę $s\bar{d}$

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: $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$

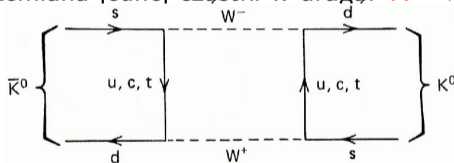


Mieszanie cząstka-antycząstka

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:

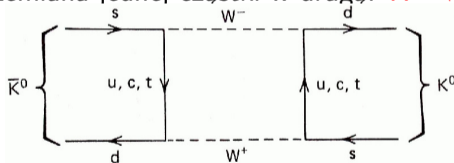
produkcja: $K^0 \rightarrow K^0$ detekcja blisko punktu produkcji

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:

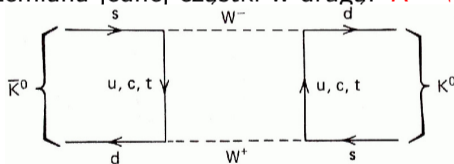
produkcja: $K^0 \rightarrow$ \bar{K}^0 detekcja w jakiejś odległości ΔL

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: $K^0 \rightarrow$

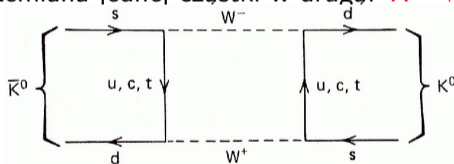
K^0 $2\Delta L$

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:

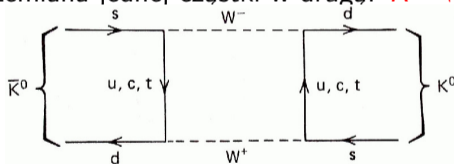
produkcja: $K^0 \rightarrow \bar{K}^0$ $3\Delta L$

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: $K^0 \rightarrow$

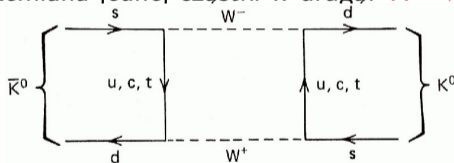
K^0 $4\Delta L$

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: $K^0 \rightarrow$

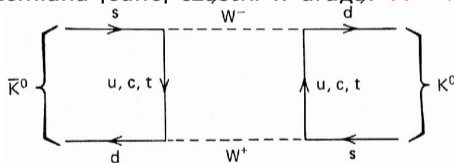
\bar{K}^0 $5\Delta L$

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: $K^0 \rightarrow$

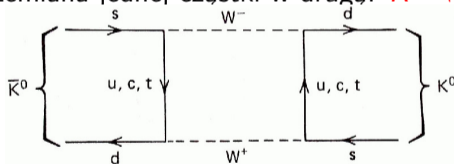
K^0 $6\Delta L$

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](#)

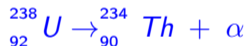
Promieniotwórczość

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 α



jądra helu: $2p2n$

- promieniowanie β



elektrony (β^+ - pozytony)

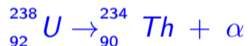
Promieniotwórczość

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 α



jądra helu: $2p2n$

- promieniowanie β



elektrony (β^+ - pozytony)

- promieniowanie γ



wysokoenergetyczne fotony

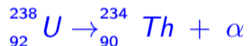
Promieniotwórczość

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 α



jądra helu: $2p2n$

- promieniowanie β



elektrony (β^+ - pozytony)

- promieniowanie γ

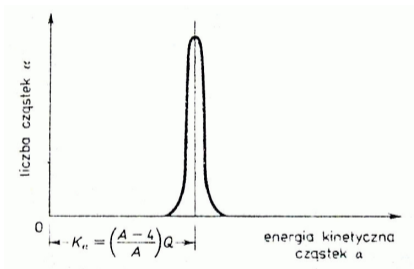


wysokoenergetyczne fotony

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

Rozpady α

Dyskretne widmo energii:



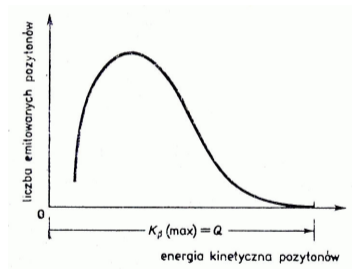
Energia emitowanej cząstki

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

Rozpad β

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 β :



Hipoteza Pauliego

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



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

Aby opisać rozpad β (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 β :



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

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

Na poziomie nukleonów rozpad β^- odpowiada przemianie:



rozpad ten zachodzi również dla swobodnego neutronu...

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

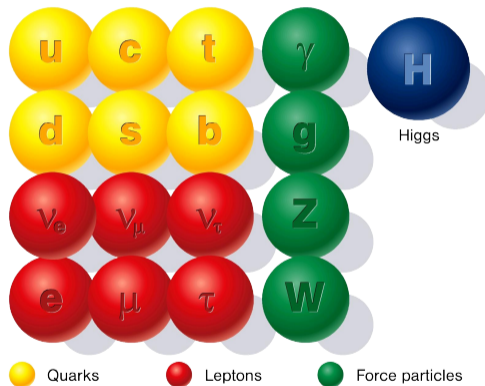
Model Standardowy

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**



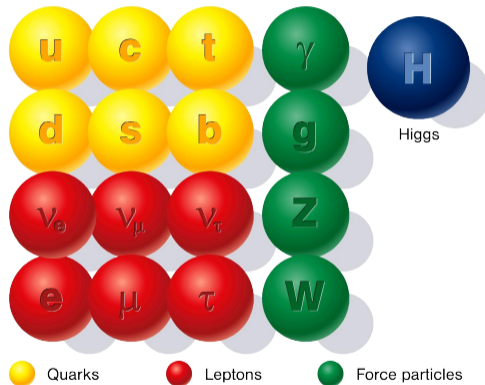
Model Standardowy

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 β pozwala wyznaczyć m_ν

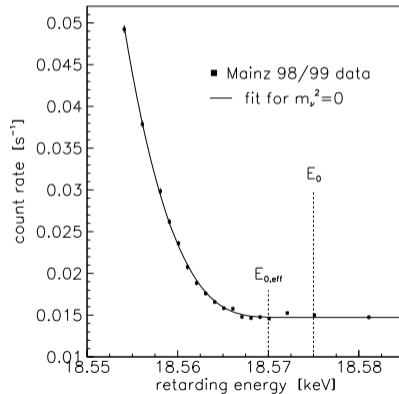
Wyniki eksperymentu w Mainz (2001)



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

⇒ ograniczenie na masę
neutrina elektronowego:

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



Pomiary masy

Dokładny pomiar końca widma elektronów β pozwala wyznaczyć m_ν

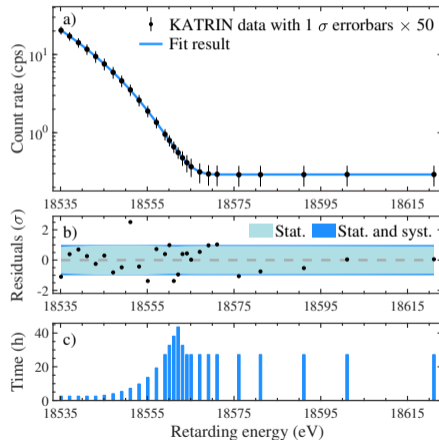
Najnowsze wyniki KATRIN (dane 2021)



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

⇒ ograniczenie na masę
neutrina elektronowego:

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



Pomiary masy

Dokładny pomiar końca widma elektronów β pozwala wyznaczyć m_ν

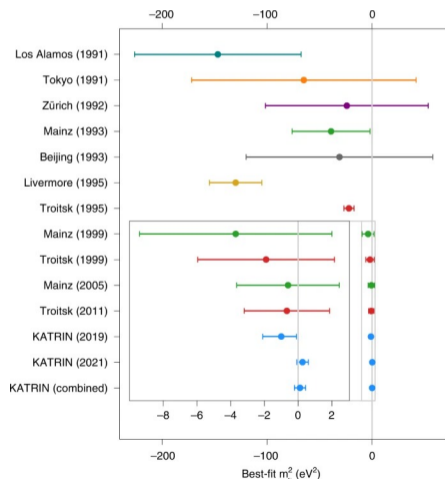
Najnowsze wyniki KATRIN (dane 2021)



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

⇒ ograniczenie na masę
neutrina elektronowego:

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



Pomiary masy

Dokładny pomiar końca widma elektronów β pozwala wyznaczyć m_ν

Najnowsze wyniki KATRIN (dane 2021)



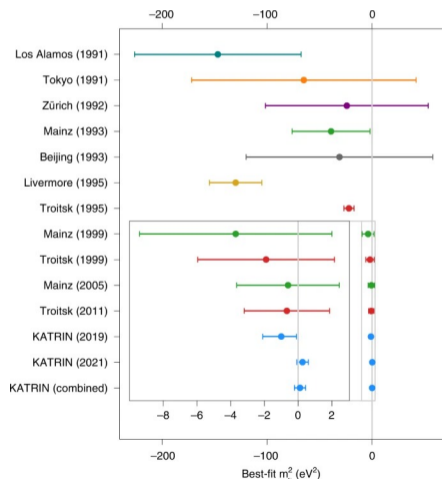
$$m_\nu^2 = 0.26 \pm 0.34 \text{ eV}^2$$

⇒ 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}U i 6g ^{232}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}U i 6g ^{232}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}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}U wyzwala się ~ 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:

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

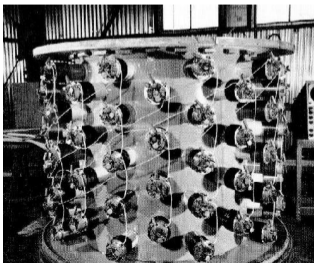
W odległości rzędu 100 km zaczynają przeważać neutrina z Ziemi...

Doświadczenia Reinesa i Cowana

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



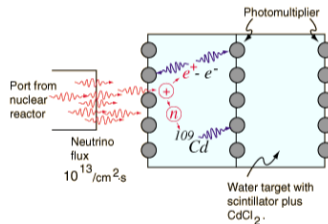
Detektor:



A. F. Żarnecki

Pierwsza obserwacja neutrino (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)

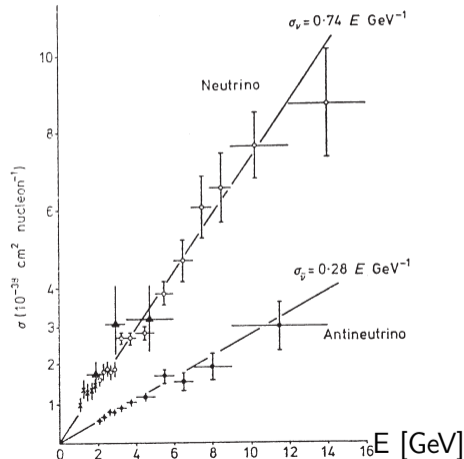
$$\sigma_{\nu N} \sim 10^{-43} \text{ cm}^2$$

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...**

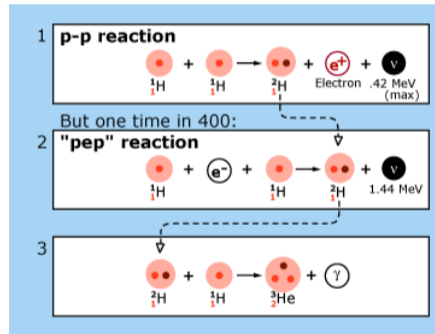
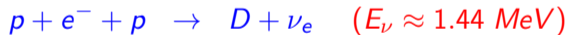


Słońce

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



Trochę wyższe energie z procesu "pep":

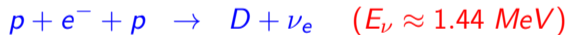


Słońce

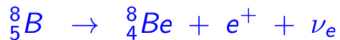
Słońce jest niezwykle silnym źródłem neutrin. Większość pochodzi z reakcji **p-p** produkcji deuteru:



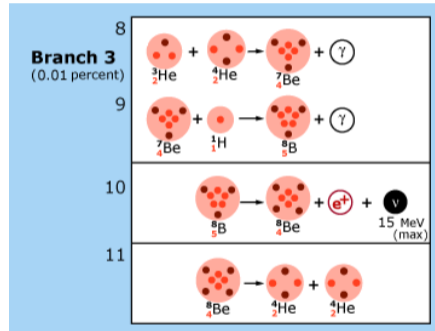
Trochę wyższe energie z procesu “**pep**”:



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



gdzie neutrino może osiągnąć **15 MeV**



Wyższe energie łatwiej obserwować w detektorach fizyki cząstek...

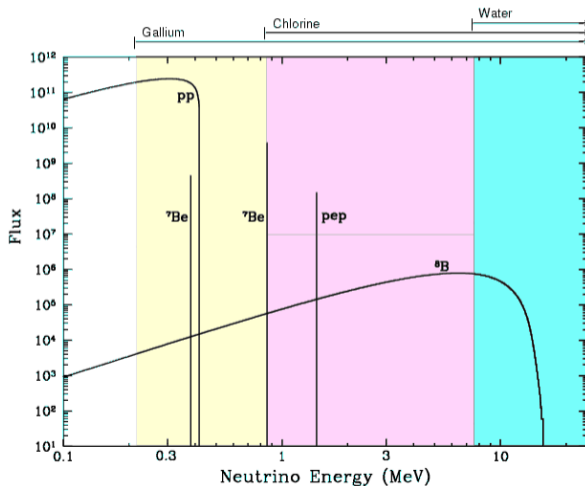
Słońce

Całkowity strumień neutrin docierających do Ziemi:

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

jak ~ 300 m od reaktora 1 GW jednak dominują niskie energie...

Widmo energii **neutrin elektronowych** ze Słońca

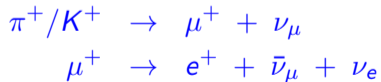


Neutrina atmosferyczne

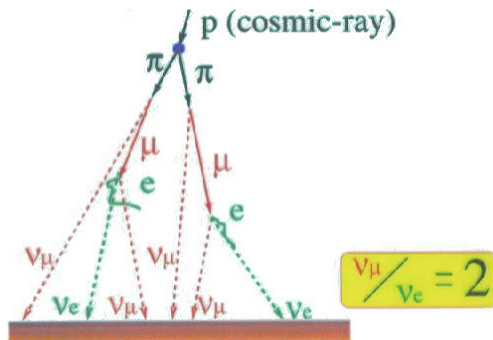
Pierwotne promieniowanie kosmiczne składa się głównie z protonów i lekkich jąder o energiach od pojedynczych GeV do $\sim 10^{12}$ GeV (10^{21} eV).

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

Neutrina powstają głównie w rozpadach:



Analogiczne rozpady zachodzą dla π^- , K^- i μ^-

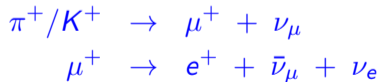


Neutrina atmosferyczne

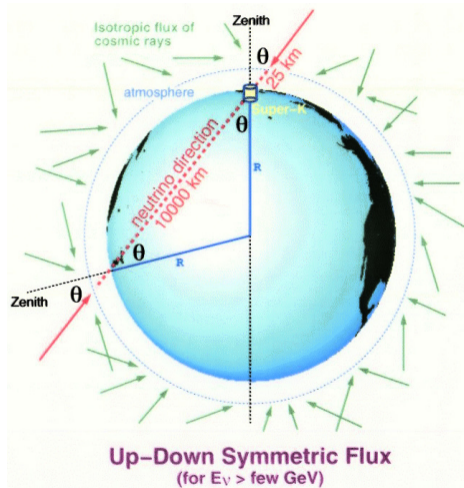
Pierwotne promieniowanie kosmiczne składa się głównie z protonów i lekkich jąder o energiach od pojedynczych GeV do $\sim 10^{12}$ GeV (10^{21} eV).

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

Neutrina powstają głównie w rozpadach:



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



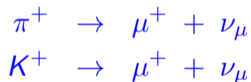
Neutrina akceleratorowe

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

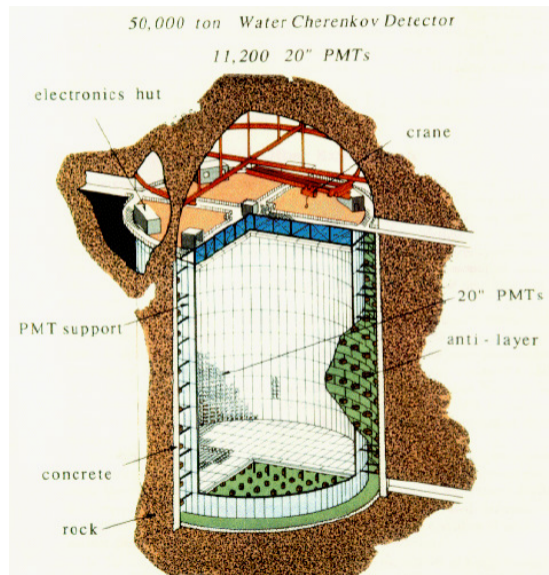
Detektor Super-Kamiokande Japonia

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

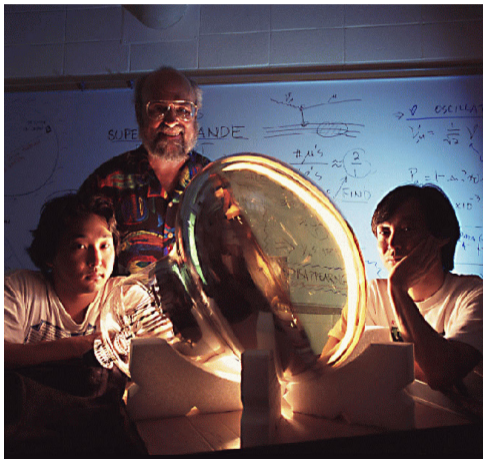
11'000 fotopowielaczy (średnica 50 cm!) rejestruje przechodzące cząstki

rejestrowane jest **promieniowanie Czerenkowa**

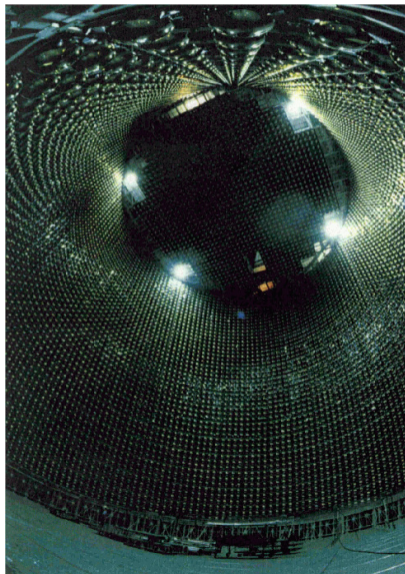
emitowane gdy cząstka naładowana (produkt oddziaływania neutrina) porusza się w ośrodku z prędkością większą od prędkości światła

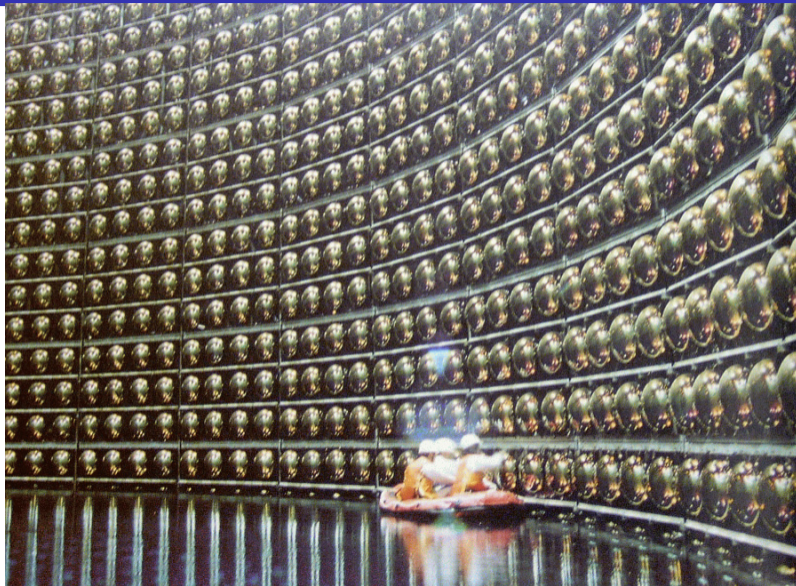


Fotopowielacz



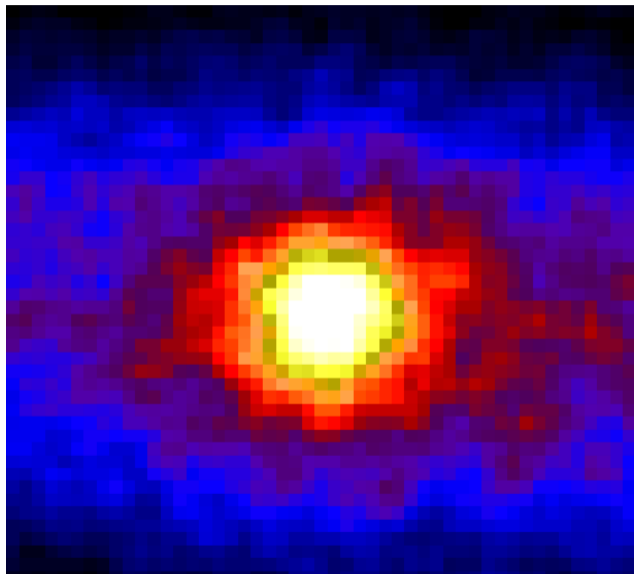
Detektor





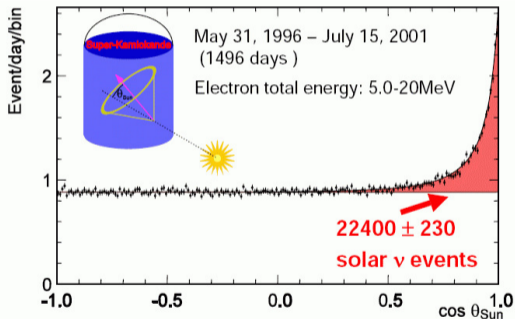
Obraz Słońca rekonstruowany przez Super-Kamiokande na podstawie obserwacji neutrin

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



Obserwacja neutrin słonecznych

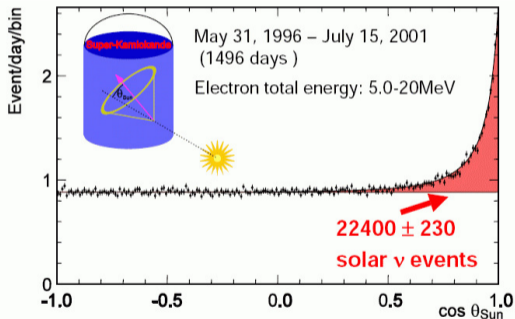
Oddziaływania **neutrin słonecznych** możemy odróżnić od oddziaływań innych neutrin mierząc **kąt emisji** elektronu względem **kierunku od Słońca**. Przewidywania teorii:



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

Obserwacja neutrin słonecznych

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



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

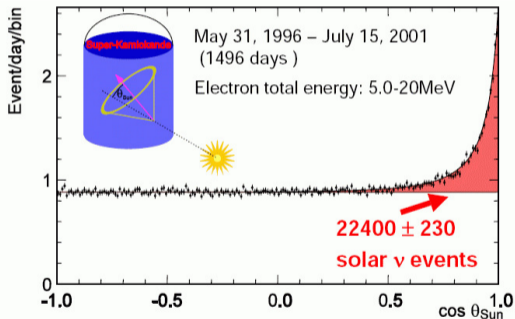
Strumień zmierzony przez S-K:

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

Widzimy mniej niż połowę oczekiwanego strumienia...

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. !

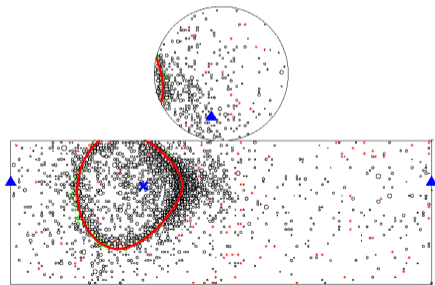
Ale zrozumieliśmy to dopiero w wieku XXI.

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

Neutrino elektronowe



Krótki zasięg elektronu, **rozmyty** pierścień

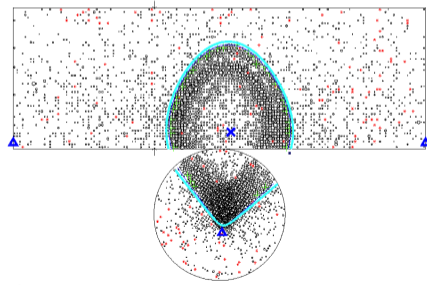


Próg (poziom tła): $E_\nu > 5 \text{ MeV} \dots$

Neutrino mionowe



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

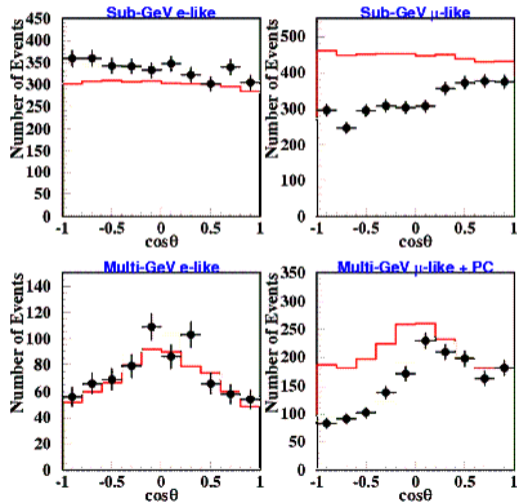


Próg: $E_\nu > m_\mu \sim 100 \text{ MeV} \dots$

Neutrina atmosferyczne

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

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



Neutrina atmosferyczne

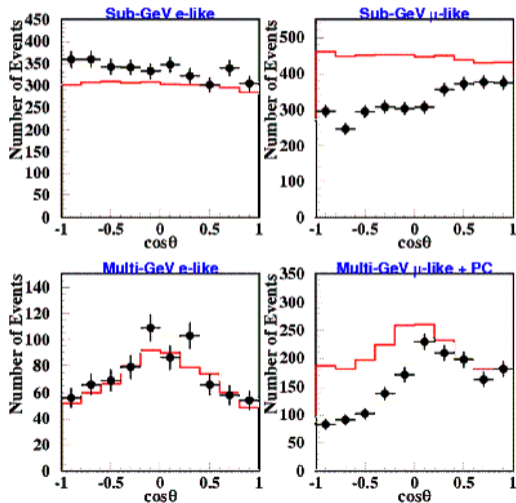
Zależność liczby neutrin **elektronowych** i **mionowych** od kierunku ($\cos\theta = 1$ gdy lecą do dołu) \Rightarrow

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

Wyraźnie **mniej** ν_μ 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

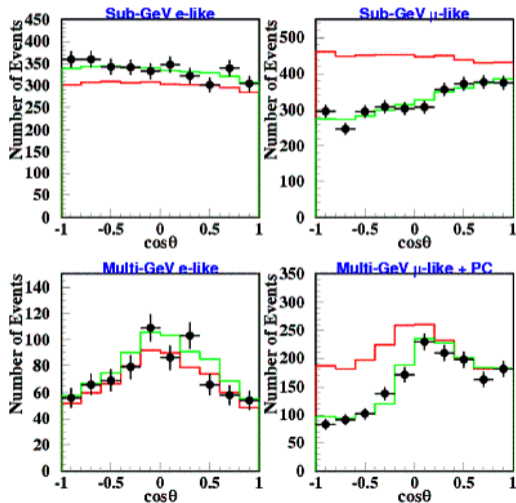
Zależność liczby neutrin **elektronowych** i **mionowych** od kierunku ($\cos\theta = 1$ gdy lecą do dołu) \Rightarrow

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

Wyraźnie **mniej** ν_μ 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.

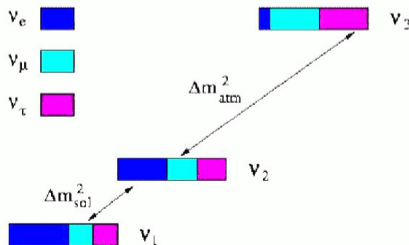
Lecące neutrimo może zmienić zapach!

A detektory są czułe głównie na ν_e .

Pełny opis wymaga mechaniki kwantowej.

Wymaga też, żeby neutrima miały masę!

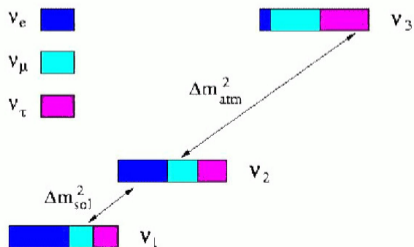
Widmo mas (przykład):



W oddziaływaniu określonego leptonu (np. elektronu) produkowane jest “słabe” neutrino, które jest **złożeniem** kilku stanów “fizycznych”, swobodnych neutrin (ν_1, ν_2, ν_3).
Każdy z tych stanów zawiera **mieszankę** różnych **zapachów** (ν_e, ν_μ, ν_τ).

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

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

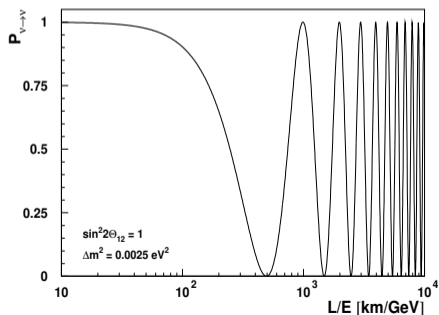
\Rightarrow zależą od przebytej odległości, zmieniają się w czasie.

Prawdopodobieństwo “przetrwania”

Mechanika kwantowa pozwala nam policzyć jakie jest prawdopodobieństwo, że po czasie t neutrino wyprodukowane jako ν_μ oddziała jako ν_μ .

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

Zakładając, że istotny jest tylko wkład od **dwóch stanów** ν_1 i ν_2 .
 $L = c \cdot t$ [km], $\Delta m^2 = m_1^2 - m_2^2$ [eV²], energia E [GeV].



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

Kluczowy parametr: θ - tzw. **kąt mieszania**

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

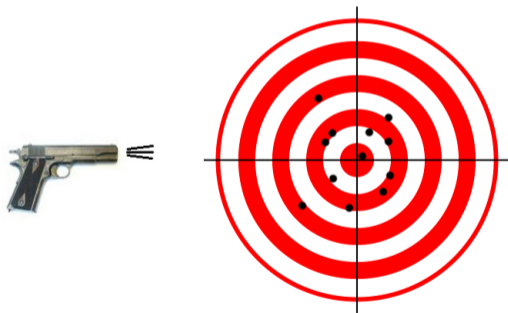
Model

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



Model

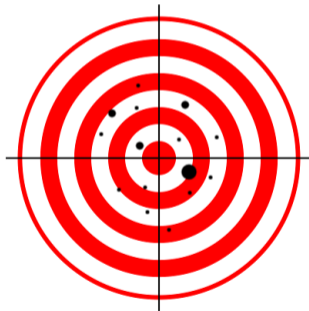
Wyobraźmy sobie, że są trzy kalibry broni, z której możemy strzelać i trzy rodzaje pocisków:



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

Model

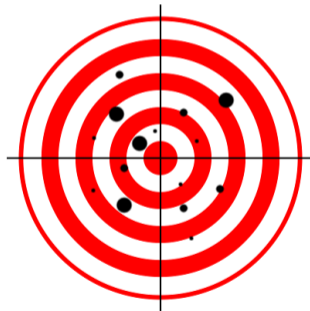
Wyobraźmy sobie, że są trzy kalibry broni, z której możemy strzelać i trzy rodzaje pocisków:



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

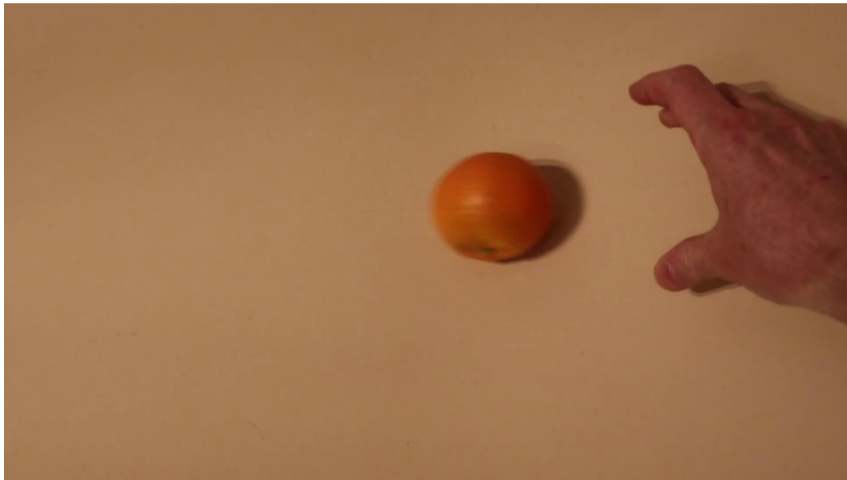
Model

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

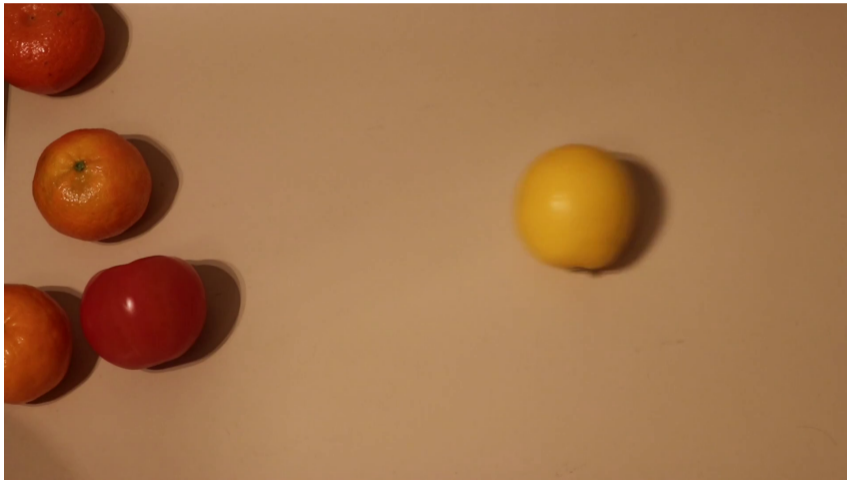


Na bardzo dużych odległościach wszystkie kalibry dokładnie się przemieszają...

Model oscylacji - film



Model oscylacji - film



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

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

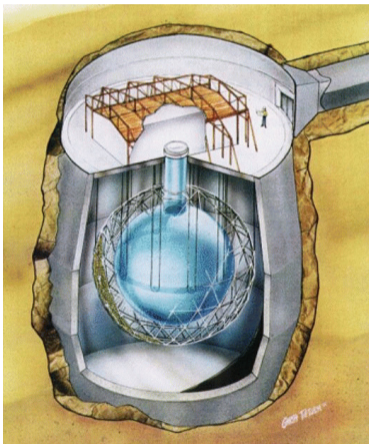
Neutrina słoneczne

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.

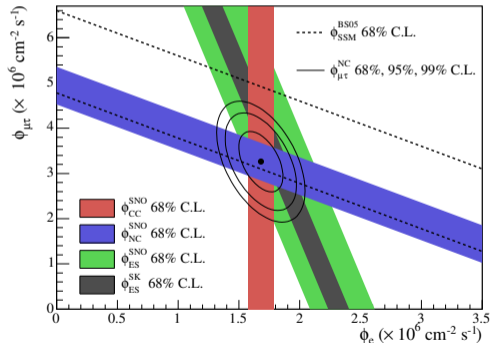
Reakcja “ślepa” na zapach neutrin (NC - wymiana Z^0):



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 ν_e w strumieniu (dla $E_\nu = 10 \text{ MeV}$):

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

⇒ Idealne mieszanie 3 zapachów!

Neutrino 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**.

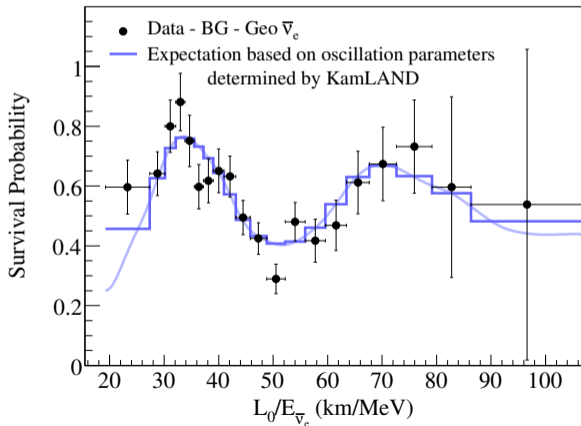
Duży strumień neutrin od licznych reaktorów znajdujących się w odległości **140–210 km**. Budowa podobna do SNO:

- 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...

Z powodu spotkania świątecznego organizowanego przez Zarząd Samorządu Studentów Wydziału Fizyki, i ogłoszonych w związku z tym godzin dziekańskich, wykład w dniu **19 grudnia** zostaje

odwołany !

Na kolejny wykład zapraszam już w Nowym Roku, **9 stycznia 2024**.

