

Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

Neutrino i ich oscylacje

Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki

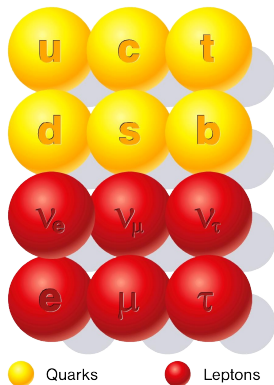


22 stycznia 2019

- 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):

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

(dozwolony wierzchołek)

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

Cząstki fundamentalne Modelu Standardowego

Rodziny/generacje fermionów - 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 procesów z wymianą W^\pm ,
 tzw. wymiana prądów naładowanych, Charged Current - CC

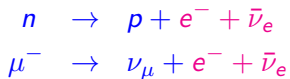
W **pierwszym przybliżeniu**, wymiana W^\pm jest przejściem w ramach jednego dubletu:

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

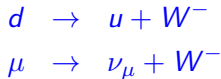
Kąt Cabibbo

Zakładając, że przejścia zachodzą zawsze w ramach danego dubletu, rozpady leptonów i hadronów powinny być ze sobą powiązane:

Na poziomie cząstek:



Na poziomie fundamentalnym:

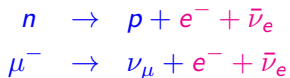


Jednak rozpady hadronów zdawały się zachodzić **odrobinę za wolno** w porównaniu do μ^\pm . Mniejsze sprzężenie kwarków do W^\pm !?

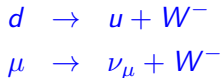
Kąt Cabibbo

Zakładając, że przejścia zachodzą zawsze w ramach danego dubletu, 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 !?

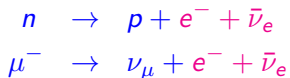
Z drugiej strony rozpady np. cząstek "dziwnych" są dużo wolniejsze, wymagają przejścia nie mieszczącego się w jednym dublecie:



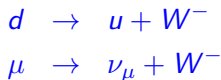
Kąt Cabibbo

Zakładając, że przejścia zachodzą zawsze w ramach danego dubletu, 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 **mieszką zapachów**:

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

Teoria Cabibbo (1963)

Pozwalała wyjaśnić wszystkie znane wówczas rozpady

Rozpady n i Λ tłumione w porównaniu do rozpadów μ^-
o czynniki odpowiednio proporcjonalne do $\cos^2 \theta_C$ i $\sin^2 \theta_C$ ~ 0.95 i ~ 0.05

Tłumaczy dlaczego cząstki dziwne mają “dziwnie długie” czasy życia...

Teoria Cabibbo (1963)

Pozwalała wyjaśnić wszystkie znane wówczas rozpady

Rozpady n i Λ tłumione w porównaniu do rozpadów μ^-
o czynniki odpowiednio proporcjonalne do $\cos^2 \theta_C$ i $\sin^2 \theta_C \sim 0.95$ i ~ 0.05

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

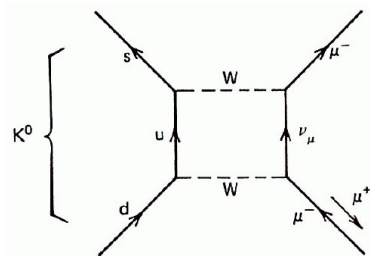
Jednak założone mieszanie kwarków
dopuszczało też istnienie procesów z
niezachowaniem zapachu (typu FCNC).

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

Rozpady n i Λ tłumione w porównaniu do rozpadów μ^-
o czynniki odpowiednio proporcjonalne do $\cos^2 \theta_C$ i $\sin^2 \theta_C \sim 0.95$ i ~ 0.05

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

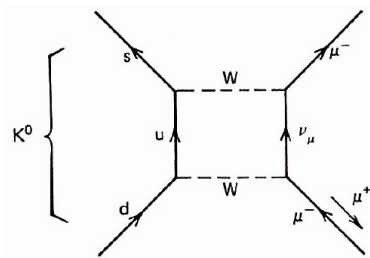
Jednak założone mieszanie kwarków
dopuszczało też istnienie procesów z
niezachowaniem zapachu (typu FCNC).

Oczekiwany kanał rozpadu:

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

Na poziomie kwarkowym:

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



Ale takich rozpadów nie obserwujemy?!...

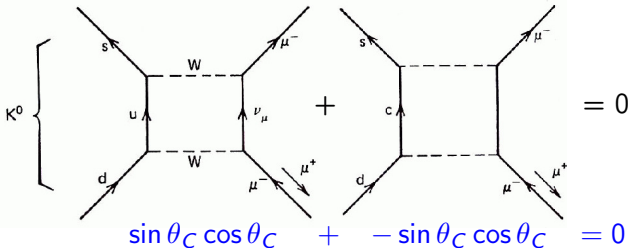
Kwark c

W roku 1970 Glashow, Iliopoulos i Maiani (GIM), aby wytłumaczyć brak procesów typu FCNC, zapostulowali istnienie **czwartego kwarku c** .

W modelu GIM 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:

u c t d s b

(pomijając fakt, że każdy kwark występuje w trzech kolorach)

Te stany kwarkowe podlegają oddz. silnym i elektromagnetycznym

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:

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

(pomijając fakt, że każdy kwark występuje w trzech kolorach)

Te stany kwarkowe podlegają oddz. silnym i elektromagnetycznym

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 $\bar{K}^0 (s\bar{d})$

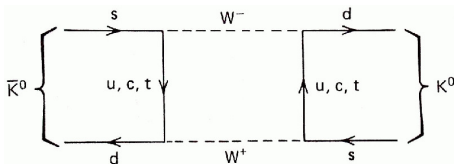
Te dwa stany różnią się tylko **dziwnością**, która **nie jest zachowana** w oddziaływaniach słabych. W szczególności stan $d'\bar{s}'$ zawiera domieszkę $s\bar{d}$

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 $d's'$ zawiera domieszkę $s\bar{d}$**

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

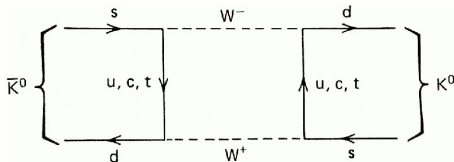


Mieszanie cząstka-antycząstka

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:

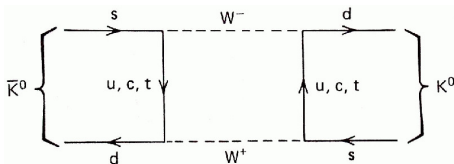
produkcja: $K^0 \rightarrow K^0$ detekcja blisko punktu produkcji

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:

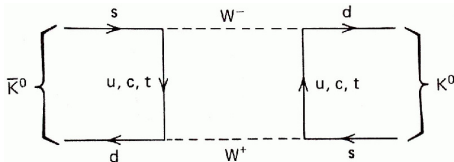
produkcja: $K^0 \rightarrow$ \bar{K}^0 detekcja w jakiejś odległości ΔL

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:

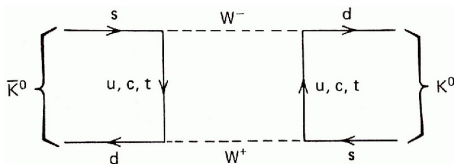
$$\text{produkcja: } K^0 \rightarrow K^0 + 2\Delta L$$

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: $K^0 \rightarrow$

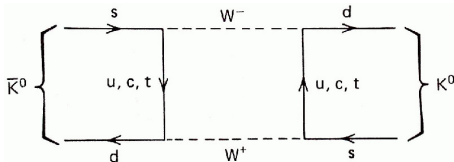
\bar{K}^0 $3\Delta L$

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: $K^0 \rightarrow$

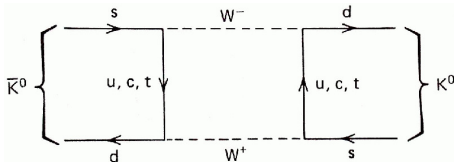
K^0 $4\Delta L$

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 $5\Delta L$

- 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**

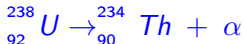
Promieniotwórczość

Odkrycie promieniotwórczości uranu: **Henri Becquerel, 1896.**

1903 - nagroda Nobla, wraz z **M.Skłodowską i P.Curie**

E.Rutherford i F.Soddy opublikowali pracę tłumaczącą promieniotwórczość jako wynik **przemiany pierwiastków**: jeden rodzaj atomu emituje promieniowanie przemieniając się w atom innego pierwiastka.

- promieniowanie α



jądra helu: $2p2n$

- promieniowanie β



elektrony (β^+ - pozytony)

- promieniowanie γ



wysokoenergetyczne fotony

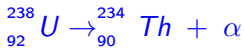
Promieniotwórczość

Odkrycie promieniotwórczości uranu: **Henri Becquerel, 1896.**

1903 - nagroda Nobla, wraz z **M.Skłodowską i P.Curie**

E.Rutherford i F.Soddy opublikowali pracę tłumaczącą promieniotwórczość jako wynik **przemiany pierwiastków**: jeden rodzaj atomu emituje promieniowanie przemieniając się w atom innego pierwiastka.

- promieniowanie α



jądra helu: $2p2n$

- promieniowanie β



elektrony (β^+ - pozytony)

- promieniowanie γ

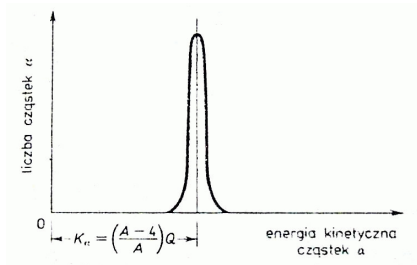


wysokoenergetyczne fotony

Oczekiwano, że cząstki promieniowania powinny nieść **energię E_0** odpowiadającą różnicy mas izotopów...

Rozpady α i γ

Dyskretne widmo energii:

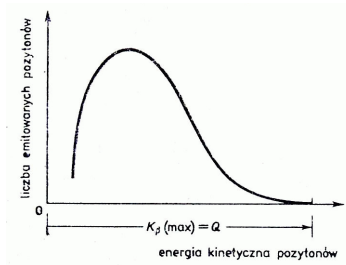


Energia emitowanej cząstki

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

Rozpad β

Ciągłe widmo energii:



Naruszenie zasady zachowania energii !?

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) ani grawitacyjnie (ma 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) ani grawitacyjnie (ma 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...

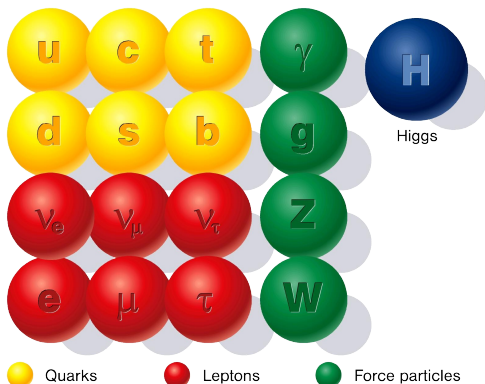
Model Standardowy

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

⇒ trzy zapachy neutrin

Do końca XX wieku wierzyliśmy, że

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



Ale zachowanie liczby leptonowej nie wynika z teorii. 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)



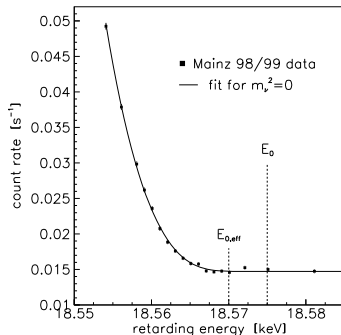
$$m_\nu^2 = -1.6 \pm 2.5_{(stat)} \pm 2.1_{(sys)} \text{ eV}^2$$

⇒ ograniczenie na masę
neutrina elektronowego:

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

Ograniczenia kosmologiczne

$$\sum m_\nu < 0.23 \text{ eV (95\% CL)}$$



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

Strumień 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:

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

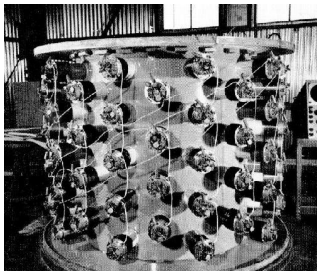
W odległości rzędu 100 km zaczynają przeważać neutrina z Ziemi...

Doświadczenia Reinesa i Cowana (1953-1959)

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

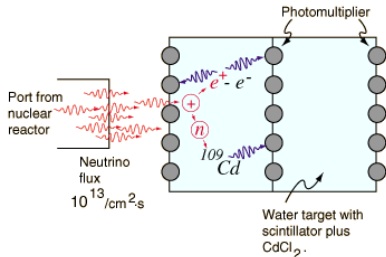


Detektor:



A.F. Żarnecki

Zaobserwowano reakcję



- pozytrony anihilują emitując **fotony**.
 - kadm zawarty w wodzie wychwytuje neutrony \Rightarrow emisja **fotonów**.
- \Rightarrow **koincydencja** dwóch sygnałów pozwala na wyeliminowanie tła

Oddziaływania

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

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

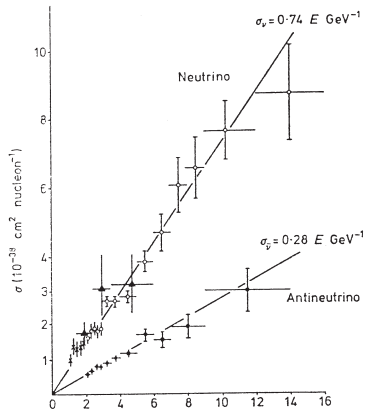
$$\sigma_{\nu N} \sim 10^{-43} \text{ cm}^2$$

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**, ale tylko liniowo...

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

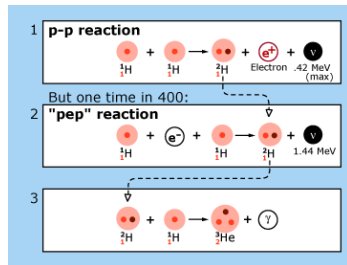


Słońce

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



Trochę wyższe energie z procesu **"pep"**:



Słońce

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



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

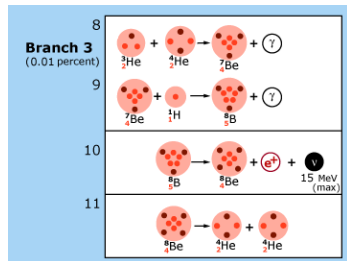


Najwyższe energie dostępne w rozpadach ${}^8\text{B}$



gdzie neutrino może osiągnąć **15 MeV**

Wyższe energie łatwiej obserwować w detektorach fizyki cząstek...



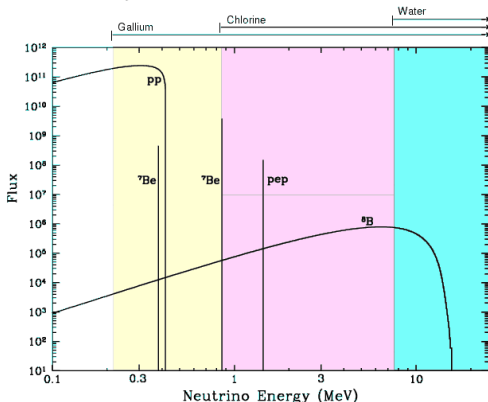
Słońce

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** z reakcji jądrowych na słońcu



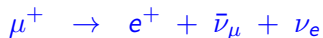
Neutrino atmosferyczne

Pierwotne promieniowanie kosmiczne

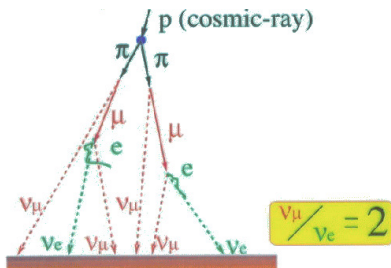
składa się głównie z **protonów** i lekkich jąder o energiach od pojedynczych GeV do $\sim 10^{12}$ GeV (10^{21} eV).

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

Neutrino powstają głównie w rozpadach:



Analogiczne rozpady zachodzą dla π^- i μ^-



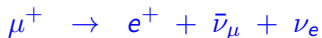
Neutrina atmosferyczne

Pierwotne promieniowanie kosmiczne

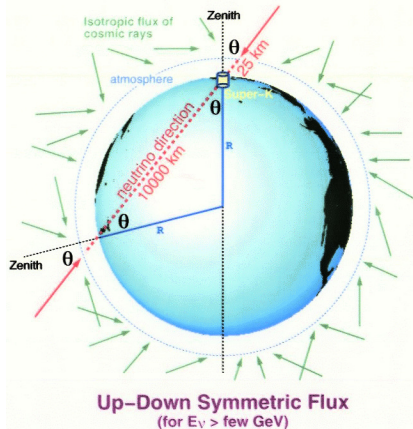
składa się głównie z **protonów** i lekkich jąder o energiach od pojedynczych GeV do $\sim 10^{12}$ GeV (10^{21} eV).

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

Neutrino powstają głównie w rozpadach:



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



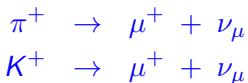
Neutrina akceleratorowe

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

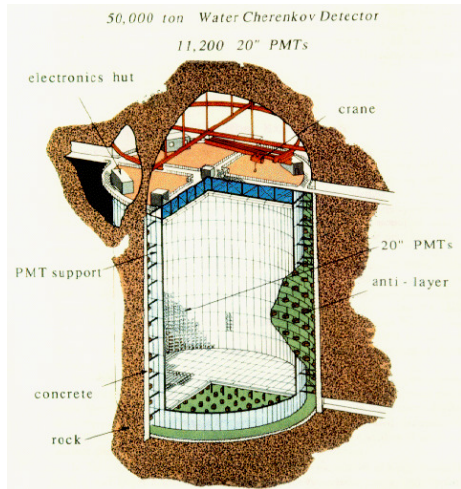
Japonia

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

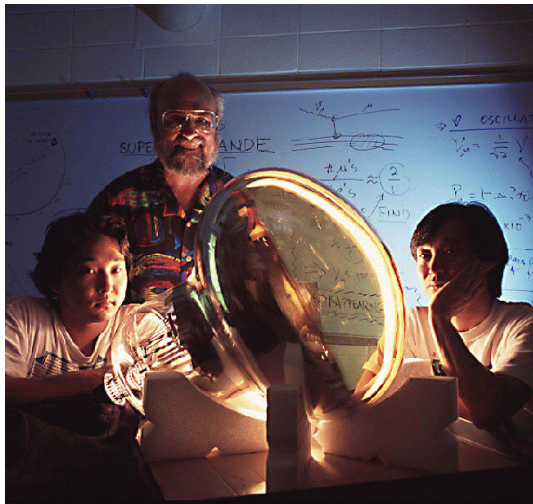
11'000 fotopowielaczy ($\phi \sim 50$ cm!) rejestruje przechodzące cząstki

rejestrowane jest **promieniowanie Czerenkowa**

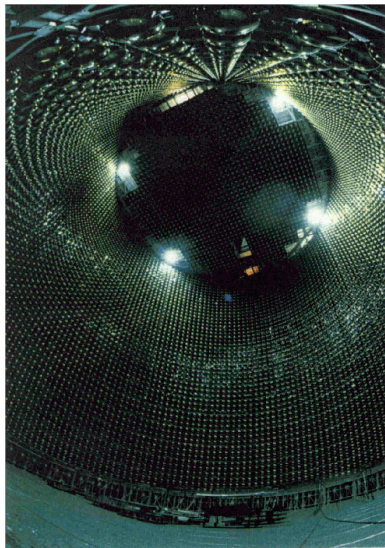
emitowane gdy cząstka naładowana (produkt oddziaływania neutrina) porusza się w ośrodku z prędkością większą od prędkości światła

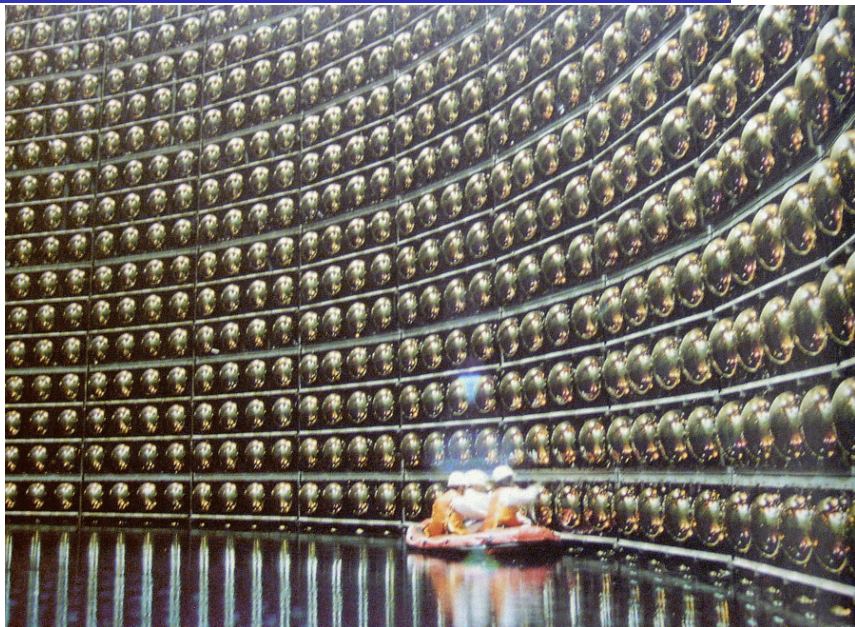


Fotopowielacz



Detektor

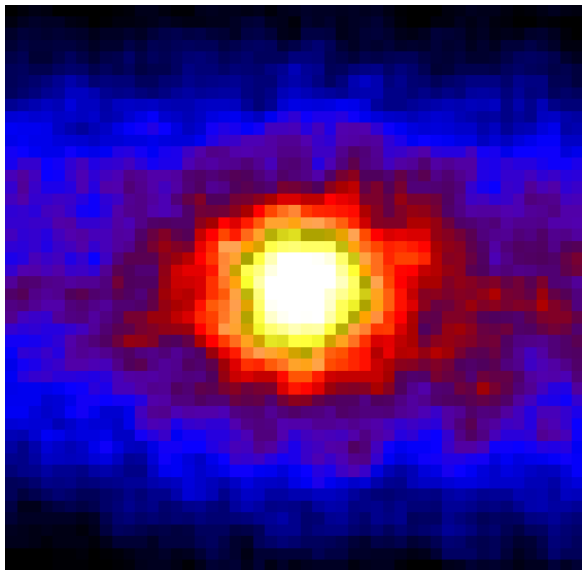




Obraz Słońca

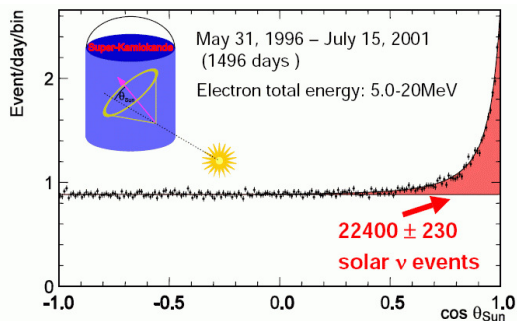
rekonstruowany przez
Super-Kamiokande na
podstawie obserwacji
neutrin

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**

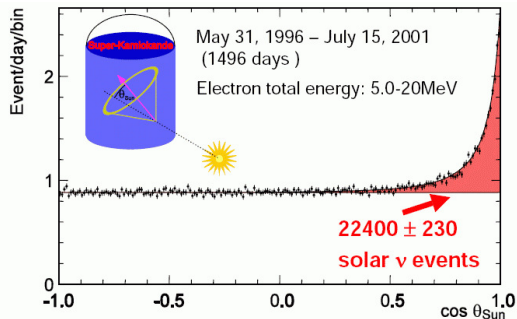


Przewidywania teorii:

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

Obserwacja neutrin słonecznych

Oddziaływania **neutrin słonecznych** możemy odróżnić od oddziaływań innych neutrin mierząc **kąt emisji** elektronu względem **kierunku od słońca**



Przewidywania teorii:

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

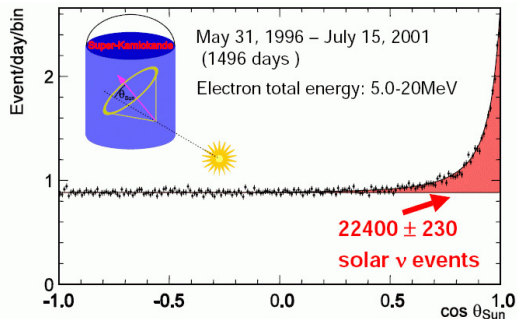
Mierzony strumień:

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

Widzimy mniej niż połowę
oczekiwanej liczby neutrin...

Obserwacja neutrin słonecznych

Oddziaływania **neutrin słonecznych** możemy odróżnić od oddziaływań innych neutrin mierząc **kąt emisji** elektronu względem **kierunku od słońca**



Przewidywania teorii:

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

Mierzony strumień:

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

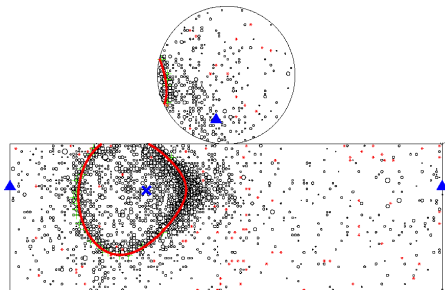
Widzimy mniej niż połowę
oczekiwanej liczby neutrin...

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

Neutrino elektronowe

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



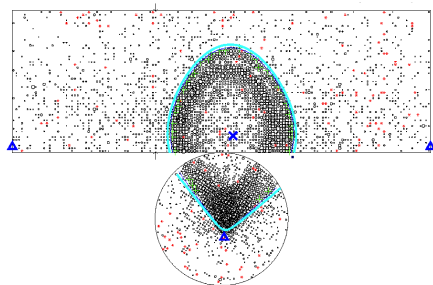
Krótki zasięg elektronu

“cienki” pierścień

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

Neutrino mionowe

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



Długa droga mionu w wodzie

“gruby” pierścień.

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

Neutrina atmosferyczne

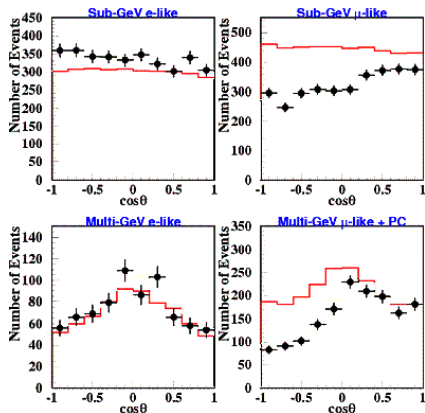
Zależność liczby neutrin **elektronowych** i **mionowych** od kierunku ($\cos \theta = 1$ gdy lecą do dołu, -1 gdy do góry) \Rightarrow

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



Neutrino atmosferyczne

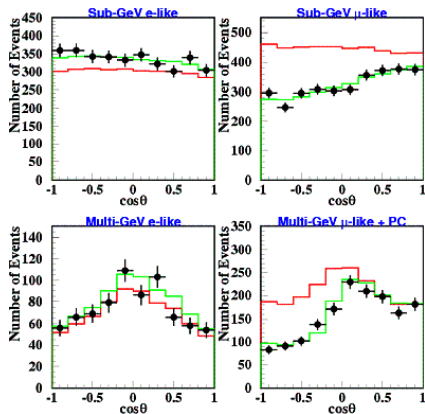
Zależność liczby neutrin **elektronowych** i **mionowych** od kierunku ($\cos \theta = 1$ gdy lecą do dołu, -1 gdy do góry) \Rightarrow

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

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

Czy neutrino mionowe mogą "znikać" przechodząc przez Ziemię ?

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



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

Obserwacje

Wyniki doświadczalne wykazały ponad wszelką wątpliwość, że

- neutrino elektronowe ze słońca “znikają” w drodze do Ziemi
- atmosferyczne neutrino mionowe “znikają” przechodząc przez Ziemię choć praktycznie nie oddziałują z materią

Obserwacje

Wyniki doświadczalne wykazały ponad wszelką wątpliwość, że

- neutrina elektronowe ze słońca “znikają” w drodze do Ziemi
- atmosferyczne neutrina mionowe “znikają” przechodząc przez Ziemię choć praktycznie nie oddziałują z materią

Wyjaśnienie

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

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

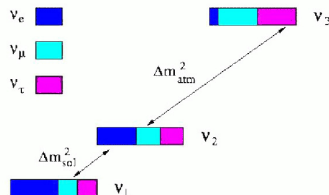
Lecące neutрино może zmienić zapach!

A detektory są czułe głównie na ν_e .

Pełny opis wymaga mechaniki kwantowej.

Wymaga też, żeby neutrina miały masę!

Widmo mas (przykład):

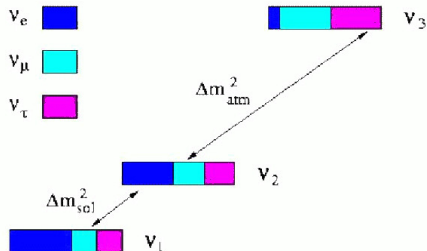


W oddziaływaniu określonego leptonu (np. elektronu) produkowane jest "słabe" neutrino, które jest **złożeniem** kilku stanów swobodnych (ν_1, ν_2, ν_3).

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 masę to każdy stan porusza się z inną prędkością.

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

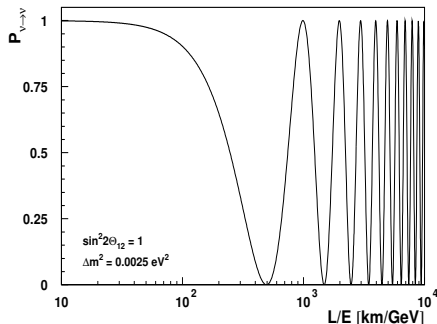
Prawdopodobieństwo “przetrwania”

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

θ - tzw. kąt mieszania

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

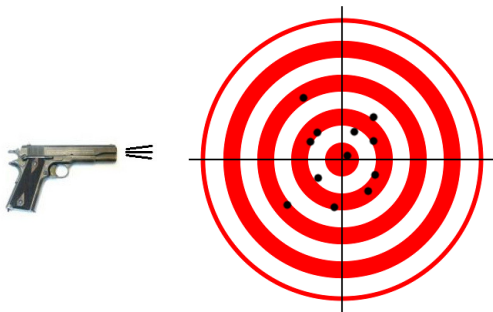
Model

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



Model

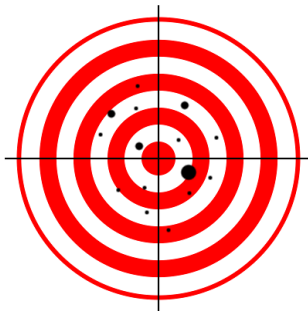
Wyobraźmy sobie, że są trzy kalibry broni, z której możemy strzelać do tarczy, i trzy rodzaje pocisków:



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

Model

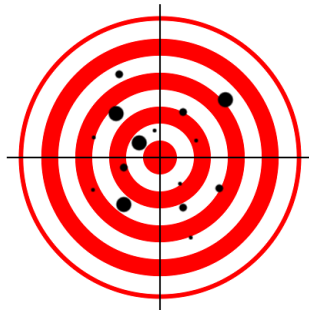
Wyobraźmy sobie, że są trzy kalibry broni, z której możemy strzelać do tarczy, i trzy rodzaje pocisków:



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

Model

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



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

Neutrino atmosferyczne

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

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

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

Neutrino atmosferyczne

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

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

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

Neutrino słoneczne

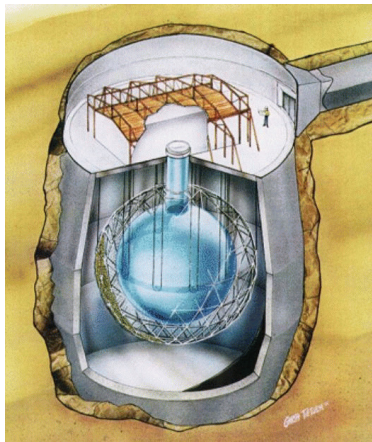
Deficyt neutrin słonecznych można z kolei wytłumaczyć oscylacjami $\nu_e \leftrightarrow \nu_\tau$

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

dużo słabsze oscylacje \Rightarrow dopiero na odległościach Ziemia-Słońce \Rightarrow **neutrino 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)

Promieniowanie Czerenkowa mierzone
przez ok. 9500 fotopowielaczy.

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

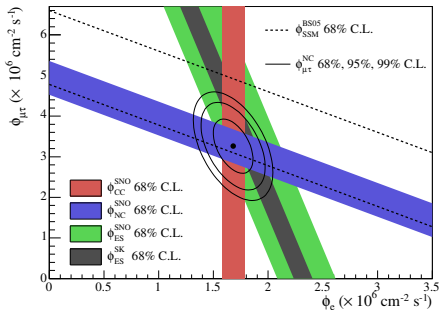
Reakcja “ślepa” na zapach neutrin (NC):



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

Eksperyment SNO

Zmierzone strumienie neutrin słonecznych:



Zmierzony całkowity strumień neutrin (pasek niebieski):

$$\phi_{\text{tot}}^{\text{SNO}} = 5.1 \pm 0.5 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{s} \cdot \text{cm}^2}$$

bardzo dobrze zgodny z przewidywaniami (przerwane linie).

Niezależnie zmierzony strumień ν_e (pasek czerwony):

$$\phi_e^{\text{SNO}} = 1.7 \pm 0.1 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{s} \cdot \text{cm}^2}$$

Neutrina docierające ze Słońca tylko w $\frac{1}{3}$ pozostają neutrinami elektronowymi \Rightarrow Idealne mieszanie 3 zapachów!

Eksperyment Kamland



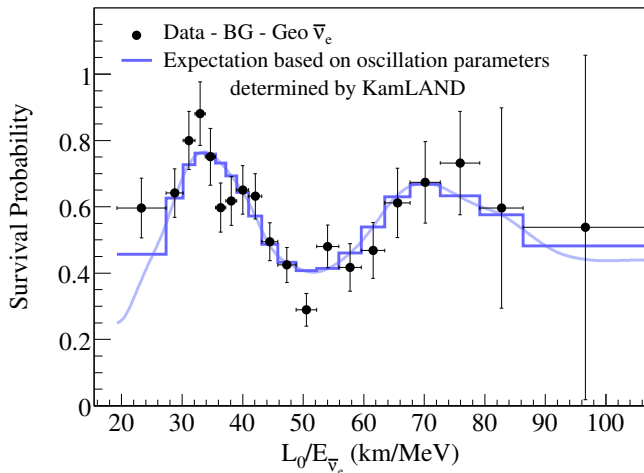
Japonia - “mocarstwo” energetyki atomowej. Eksperyment **Kamland** został zbudowany w miejscu starego eksperymentu **Kamiokande**, poprzednika **Super-Kamiokande**.

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

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

Wyraźne oscylacje!

"regeneracja" $\bar{\nu}_e$
powyżej 50 km/MeV

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! (patrz wykład 11)

W ciągu ostatnich kilkunastu lat 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 poznaliśmy ostatni brakujący parametr mieszania

Planuje się już budowę kolejnej generacji detektorów neutrin.
Mamy nadzieję, na kolejne przełomowe wyniki...