

Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

Neutrino i ich oscylacje

Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki

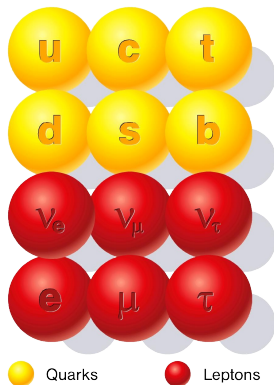


14 grudnia 2021

- 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

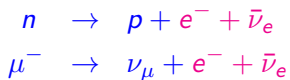
W **pierwszym przybliżeniu**, wymiana W^\pm jest przejściem w ramach jednego dubletu:

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

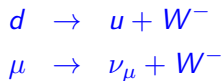
Kąt Cabibbo

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

Na poziomie cząstek:



Na poziomie fundamentalnym:

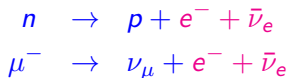


Jednak rozpady hadronów zdawały się zachodzić **odrobinę za wolno** w porównaniu do μ^\pm . Mniejsze sprzężenie kwarków do W^\pm !?

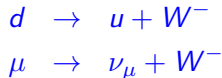
Kąt Cabibbo

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 !?

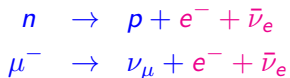
Z drugiej strony rozpady np. cząstek "dziwnych" są dużo wolniejsze, wymagają przejścia nie mieszczącego się w jednym dublecie:



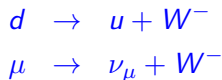
Kąt Cabibbo

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**:

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

Kął Cabibbo

Jak kął może opisać “mieszanie”?



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

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

Kął Cabibbo

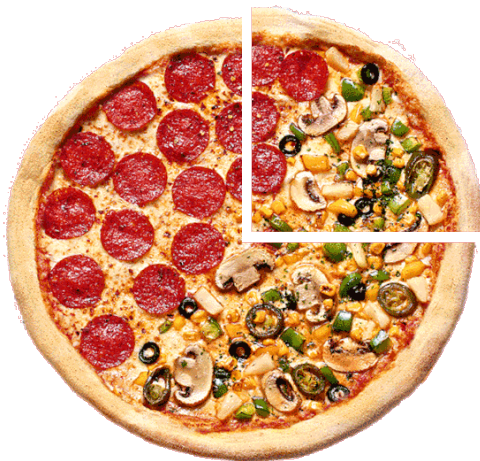
Jak kął może opisać "mieszanie"?



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

Kął Cabibbo

Jak kął może opisać "mieszanie"?



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

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...

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...

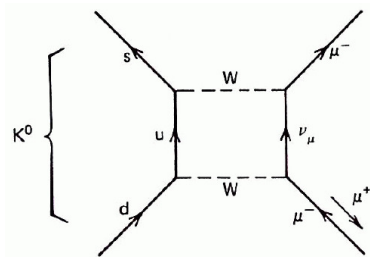
Jednak założone mieszanie kwarków
dopuszczało też istnienie procesów z
niezachowaniem zapachu (typu FCNC).

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...

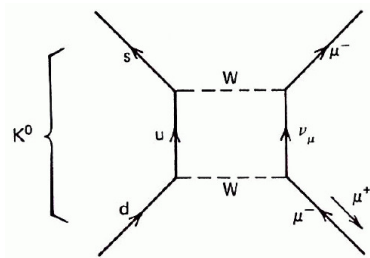
Jednak założone mieszanie kwarków
dopuszczało też istnienie procesów z
niezachowaniem zapachu (typu FCNC).

Oczekiwany kanał rozpadu:

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

Na poziomie kwarkowym:

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



Ale takich rozpadów nie obserwujemy?!...

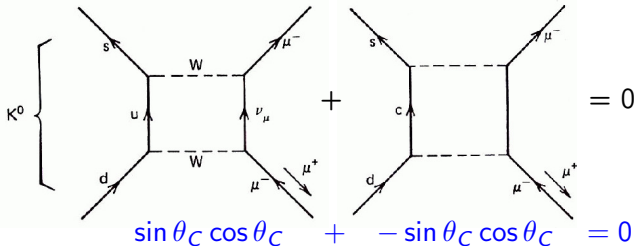
Kwark c

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

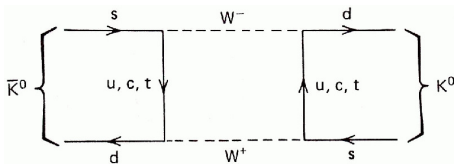
Te dwa stany różnią się tylko **dziwnością**, która **nie jest zachowana** w oddziaływaniach słabych. W szczególności stan $d'\bar{s}'$ zawiera domieszkę $s\bar{d}$

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

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

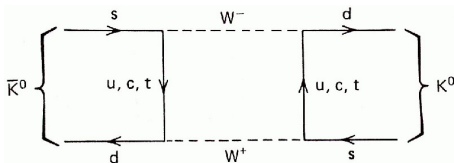


Mieszanie cząstka-antycząstka

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:

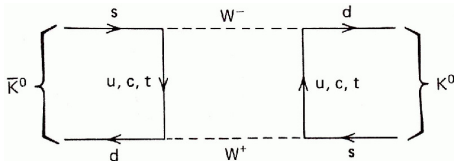
produkcja: $K^0 \rightarrow K^0$ detekcja blisko punktu produkcji

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:

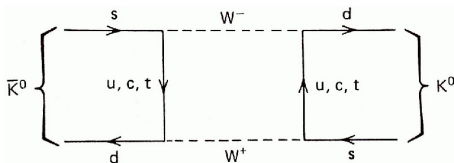
produkcja: $K^0 \rightarrow$ \bar{K}^0 detekcja w jakiejś odległości ΔL

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:

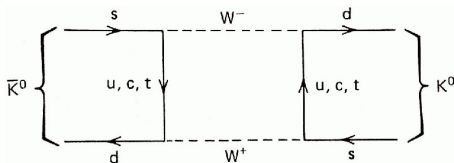
produkcja: $K^0 \rightarrow K^0 \pm 2\Delta L$

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:

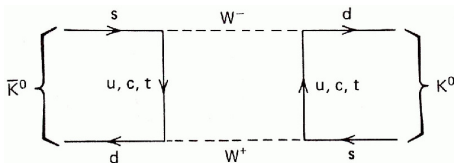
$$\text{produkcja: } K^0 \rightarrow \bar{K}^0 \quad 3\Delta L$$

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: $K^0 \rightarrow$

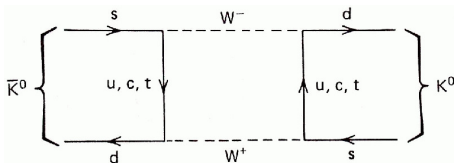
K^0 $4\Delta L$

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](#)

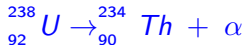
Promieniotwórczość

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

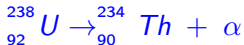
Promieniotwórczość

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

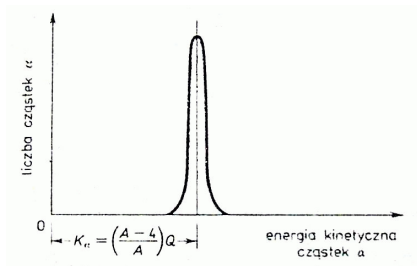


wysokoenergetyczne fotony

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

Rozpady α i γ

Dyskretne widmo energii:

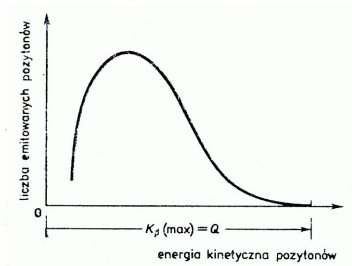


Energia emitowanej cząstki

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

Rozpad β

Ciągłe widmo energii:



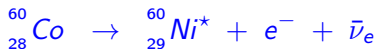
Naruszenie zasady zachowania energii !?

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 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.

Na poziomie nukleonów rozpad β^- odpowiada przemianie:



rozpad ten zachodzi również dla swobodnego neutronu...

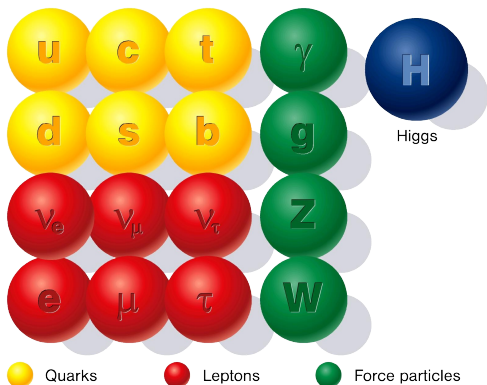
Model Standardowy

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

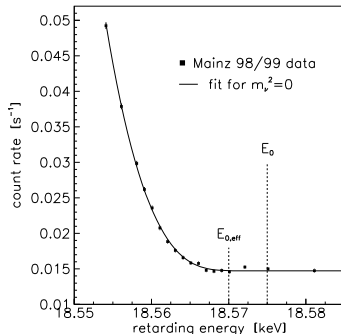
Wyniki eksperymentu w Mainz (2001)



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

⇒ ograniczenie na masę
neutrino elektronowego:

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



Pomiary masy

Dokładny pomiar końca widma elektronów β pozwala wyznaczyć m_ν

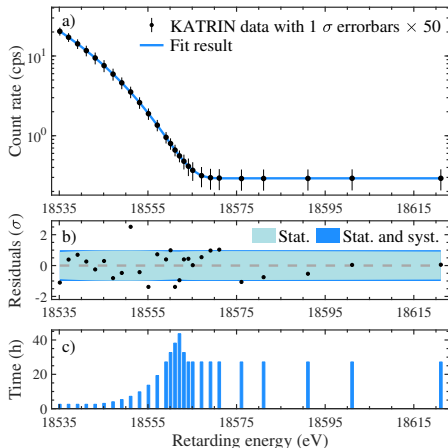
Wyniki KATRIN (2019)



$$m_\nu^2 = -1.0 \pm 1.0 \text{ eV}^2$$

⇒ ograniczenie na masę
neutrino elektronowego:

$$m_\nu < 1.1 \text{ eV (90\% CL)}$$



Pomiary masy

Dokładny pomiar końca widma elektronów β pozwala wyznaczyć m_ν

Wyniki KATRIN (2019)



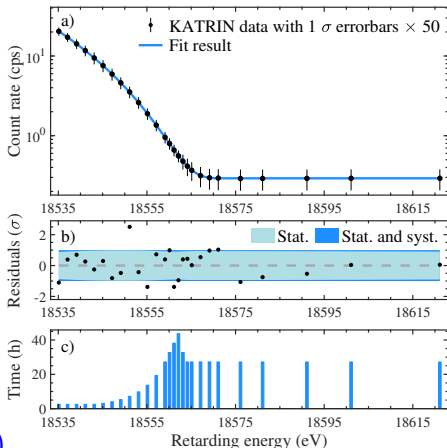
$$m_\nu^2 = -1.0 \pm 1.0 \text{ eV}^2$$

⇒ ograniczenie na masę
neutrino elektronowego:

$$m_\nu < 1.1 \text{ eV (90\% CL)}$$

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. \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 $\Rightarrow \sim 6 \cdot 10^{20}$ neutron/s

Strumień neutron **maleje z kwadratem odległości** od reaktora

W odległości **10 m od reaktora** strumień neutron:

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

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

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

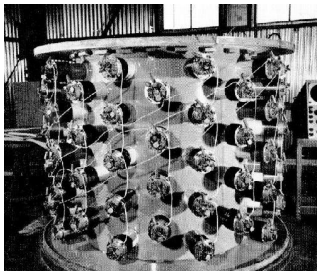
W odległości rzędu 100 km zaczynają przeważać neutrona z Ziemi...

Doświadczenia Reinesa i Cowana (1953-1959)

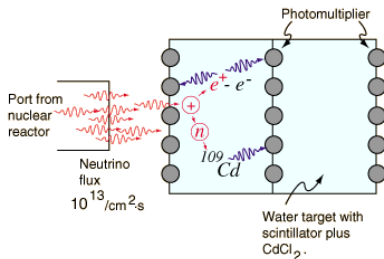
Oddziaływanie **neutrino** zaobserwowano po raz pierwszy wykorzystując jako źródło **reaktor jądrowy**. Produkcja neutrino m.in. w rozpadach neutronów:



Detektor:



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)

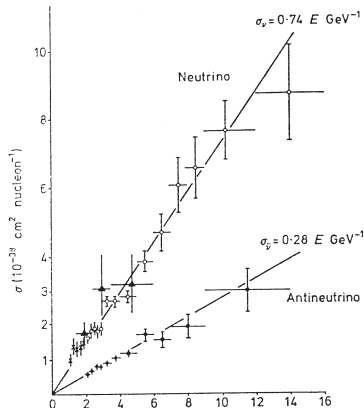
$$\sigma_{\nu N} \sim 10^{-43} \text{ cm}^2$$

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**...

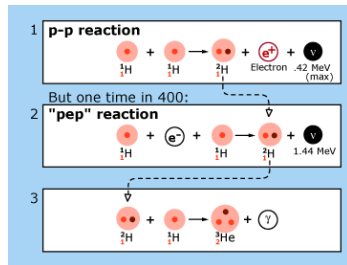


Słońce

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



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



Słońce

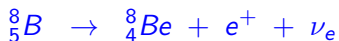
Słońce jest niezwykle silnym źródłem neutrin. Większość pochodzi z reakcji **p-p**:



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

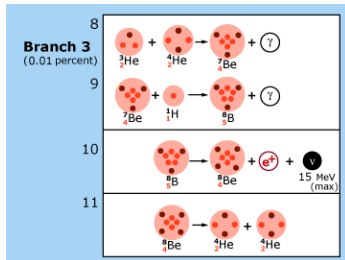


Najwyższe energie dostępne w rozpadach ${}^8\text{B}$



gdzie neutrino może osiągnąć **15 MeV**

Wyższe energie łatwiej obserwować w detektorach fizyki cząstek...



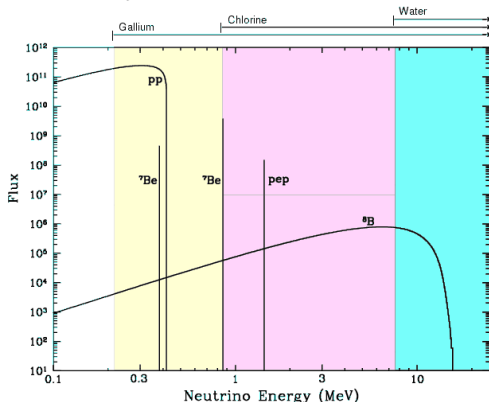
Słońce

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



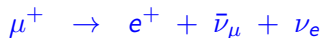
Neutrina atmosferyczne

Pierwotne promieniowanie kosmiczne

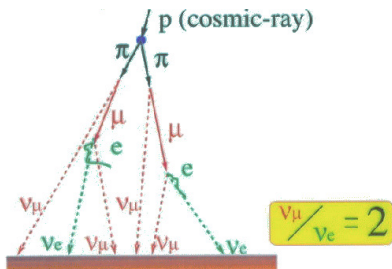
składa się głównie z **protonów** i lekkich jąder o energiach od pojedynczych GeV do $\sim 10^{12}$ GeV (10^{21} eV).

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

Neutrina powstają głównie w rozpadach:



Analogiczne rozpady zachodzą dla π^- i μ^-



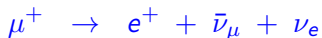
Neutrina atmosferyczne

Pierwotne promieniowanie kosmiczne

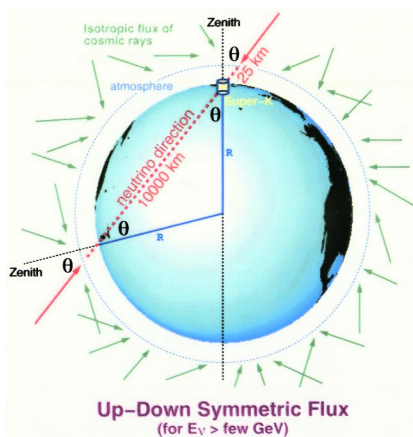
składa się głównie z **protonów** i lekkich jąder o energiach od pojedynczych GeV do $\sim 10^{12}$ GeV (10^{21} eV).

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

Neutrina powstają głównie w rozpadach:



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



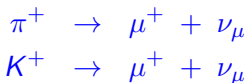
Neutrina akceleratorowe

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

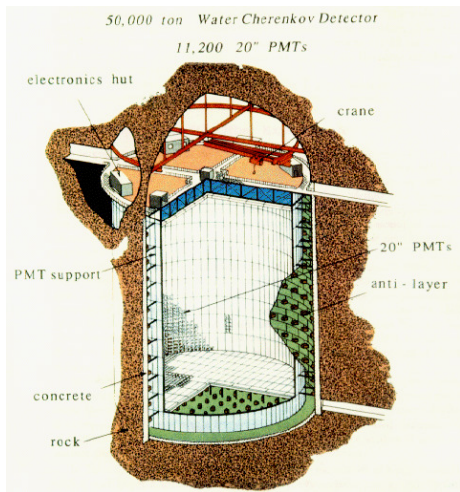
Japonia

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

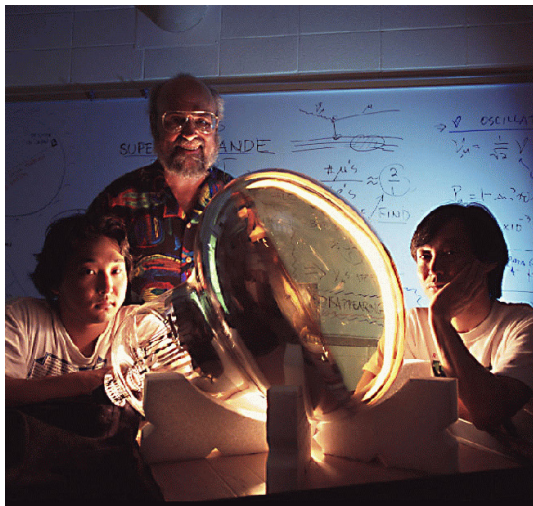
11'000 fotopowielaczy ($\phi \sim 50$ cm!) rejestruje przechodzące cząstki

rejestrowane jest **promieniowanie Czerenkowa**

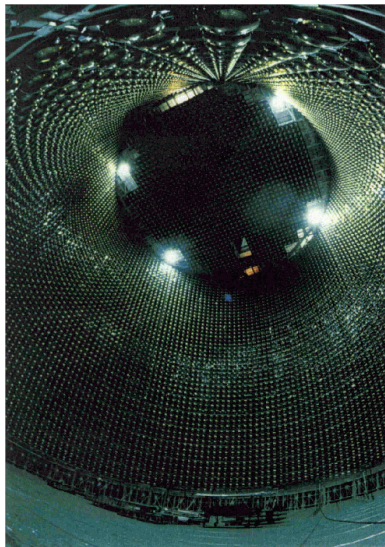
emitowane gdy cząstka naładowana (produkt oddziaływania neutrina) porusza się w ośrodku z prędkością większą od prędkości światła

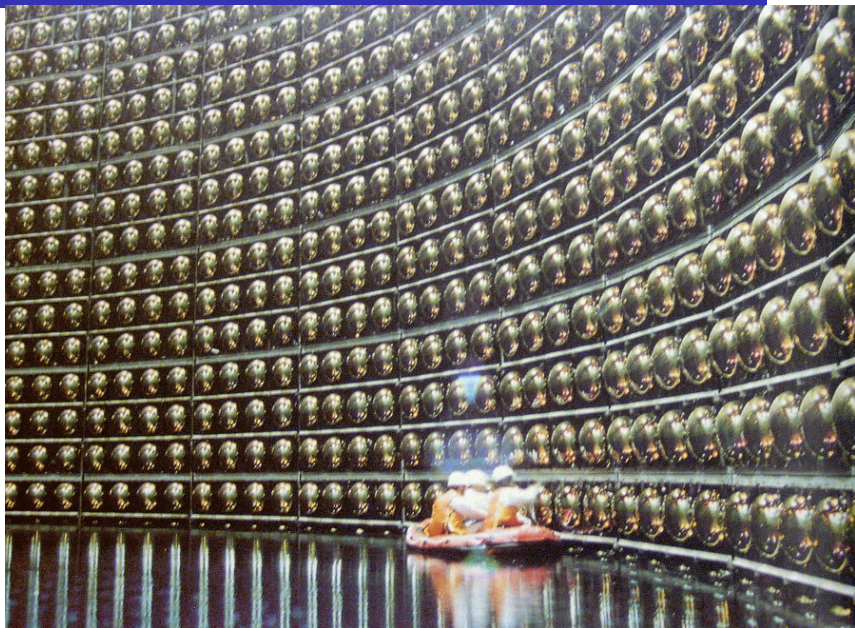


Fotopowielacz



Detektor

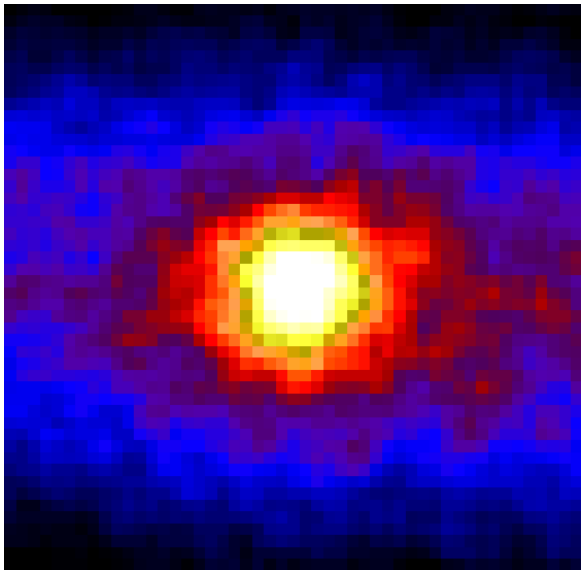




Obraz Słońca

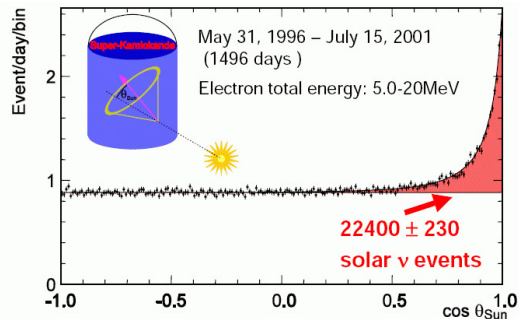
rekonstruowany przez
Super-Kamiokande na
podstawie obserwacji
neutrin

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**

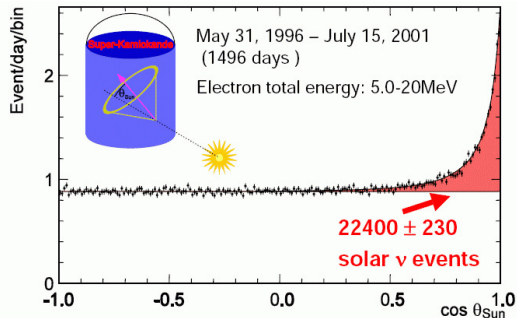


Przewidywania teorii:

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

Obserwacja neutrin słonecznych

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



Przewidywania teorii:

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

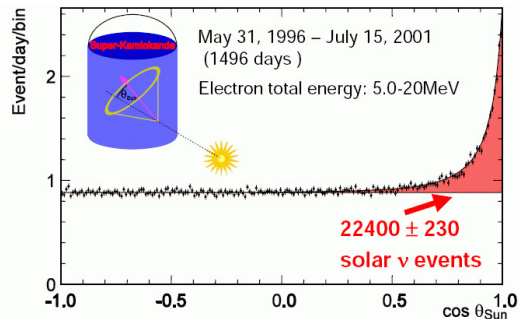
Mierzony strumień:

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

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:

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

Mierzony strumień:

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

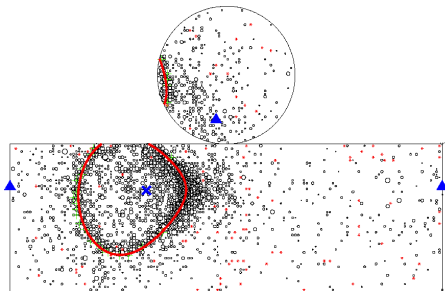
Widzimy mniej niż połowę oczekiwanej liczby neutrin...

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 $\nu_e n \rightarrow e^- p$

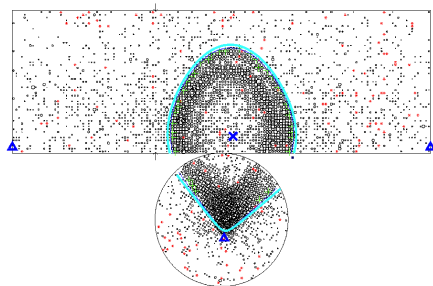


Krótki zasięg elektronu
“cienki” pierścień

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

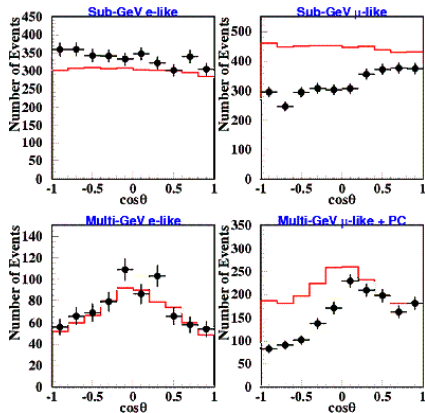
Zależność liczby neutrin **elektronowych** i **mionowych** od kierunku ($\cos \theta = 1$ gdy lecą do dołu, -1 gdy do góry) \Rightarrow

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.



Neutrina atmosferyczne

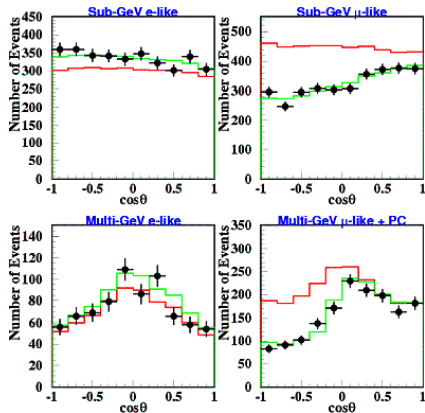
Zależność liczby neutrin **elektronowych** i **mionowych** od kierunku ($\cos\theta = 1$ gdy lecą do dołu, -1 gdy do góry) \Rightarrow

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 ?

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
- 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 **mieszkankami** stanów zapachowych.

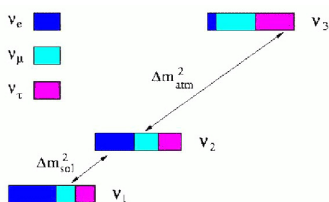
Leczące neutrimo może **zmienić zapach!**

A detektory są czułe **głównie na ν_e** .

Pełny opis wymaga mechaniki kwantowej.

Wymaga też, żeby neutrima miały masę!

Widmo mas (przykład):

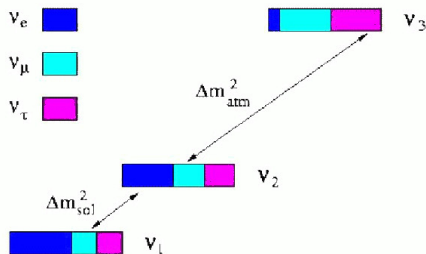


W oddziaływaniu określonego leptonu (np. elektronu) produkowane jest “słabe” neutrino, które jest **złożeniem** kilku stanów swobodnych (ν_1, ν_2, ν_3).

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.

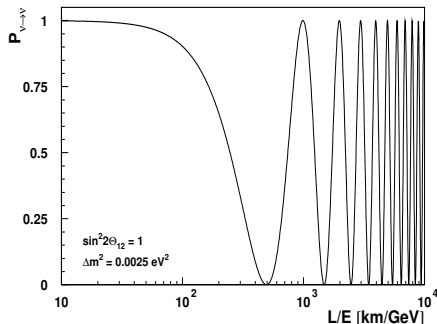
\Rightarrow własności obserwowanej kombinacji zależą od przebytej odległości, zmieniają się w czasie.

Prawdopodobieństwo “przetrwania”

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

θ - tzw. kąt mieszania

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

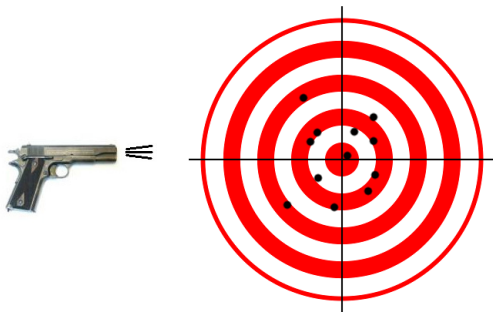
Model

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



Model

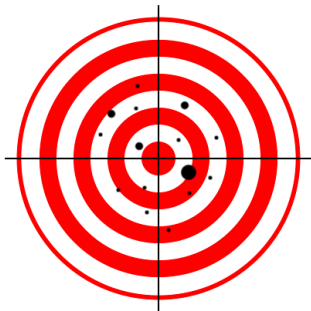
Wyobraźmy sobie, że są trzy kalibry broni, z której możemy strzelać do tarczy, i trzy rodzaje pocisków:



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

Model

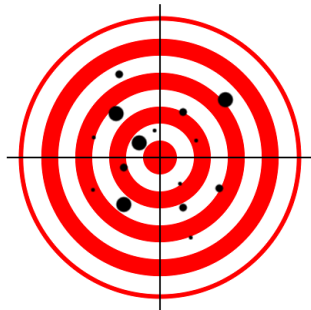
Wyobraźmy sobie, że są trzy kalibry broni, z której możemy strzelać do tarczy, i trzy rodzaje pocisków:



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

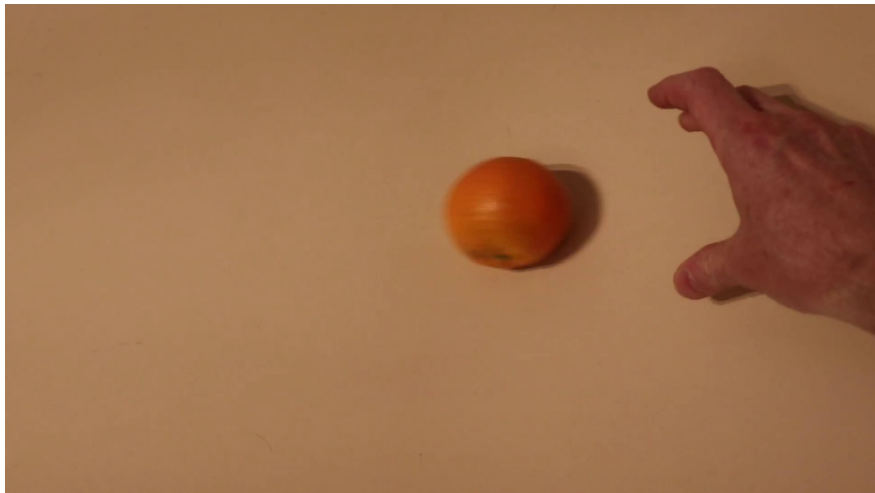
Model

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

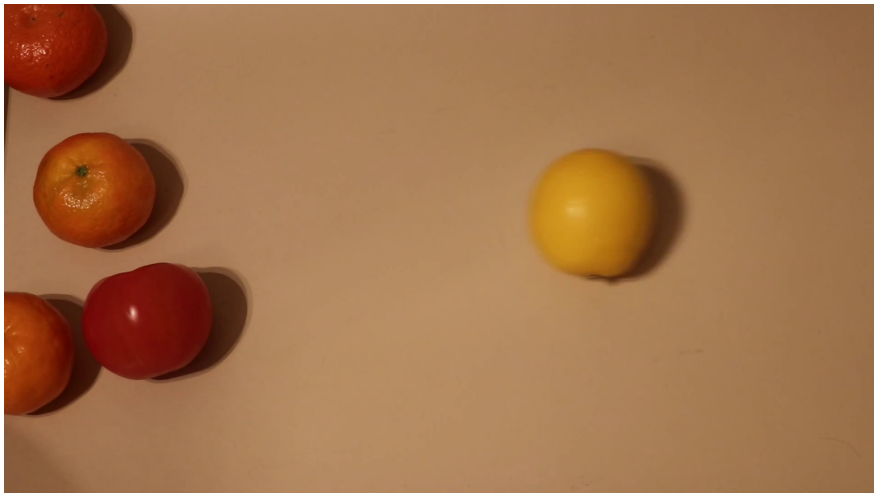


Na bardzo dużych odległościach wszystkie kalibry dokładnie się przemieszają...

Model oscylacji - pokaz



Model oscylacji - pokaz



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

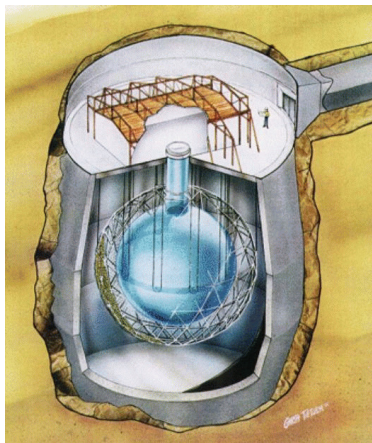
Deficyt neutrin słonecznych można z kolei wytłumaczyć oscylacjami $\nu_e \leftrightarrow \nu_\tau$

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

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.

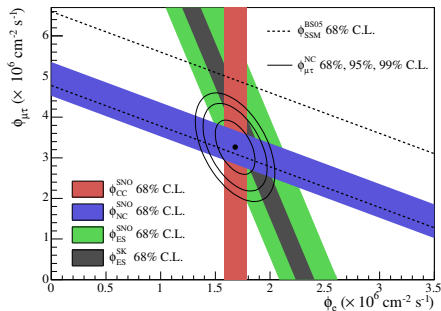
Reakcja “ślepa” na zapach neutrin (NC):



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

Eksperyment SNO

Zmierzone strumienie neutrin słonecznych:



Zmierzony całkowity strumień neutrin (pasek niebieski):

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

bardzo dobrze zgodny z przewidywaniami (przerywane linie).

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

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

Neutrino 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**.

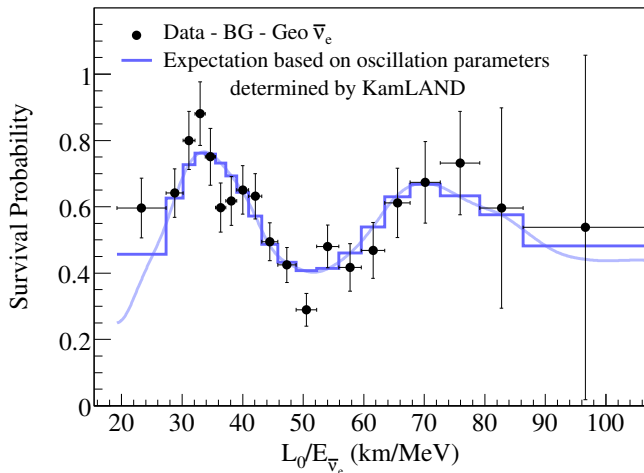
Duży strumień neutrin od licznych reaktorów znajdujących się w odległości **140–210 km**.

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 zaproponowane 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)

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...