

# Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

## Oddziaływania słabe

Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki



22 listopada 2022

- 1 Oddziaływania podstawowe (przypomnienie+zaległości)
- 2 Liczby kwantowe
- 3 Neutrina
- 4 Teoria Fermiego
- 5 Model Weinberg'a-Salam'a

- 1 Oddziaływania podstawowe (przypomnienie+zaległości)
- 2 Liczby kwantowe
- 3 Neutrino
- 4 Teoria Fermiego
- 5 Model Weinberg'a-Salam'a

## Oddziaływanie grawitacyjne    Źródło: masa

Choć jest najłabsze ze wszystkich znanych oddziaływań, **dominuje na największych odległościach!** Rządzi ewolucją Wszechświata, rotacją galaktyk, ruchami planet, utrzymuje nas na powierzchni Ziemi...

Wszystkie masy przyciągają się (**nie ma “ujemnej” masy**)

⇒ im większy układ tym większe oddziaływanie...

## Oddziaływanie grawitacyjne    Źródło: masa

Choć jest najłabsze ze wszystkich znanych oddziaływań, **dominuje na największych odległościach!** Rządzi ewolucją Wszechświata, rotacją galaktyk, ruchami planet, utrzymuje nas na powierzchni Ziemi...

Wszystkie masy przyciągają się (**nie ma "ujemnej" masy**)

⇒ im większy układ tym większe oddziaływanie...

## Oddziaływania elektromagnetyczne    Źródło: ładunek elektryczny

**Dominuje w naszym życiu codziennym!**

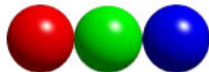
Decydują o mikroskopowej budowie materii: opisują strukturę atomów, wiązania chemiczne, własności fizyczne materiałów. Oddziaływania makroskopowe (tarcie, siły sprężystości itp.) są na poziomie mikroskopowym oddziaływaniami elektromagnetycznymi.

Ładunki dodatnie i ujemne równoważą się

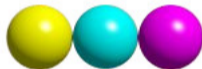
⇒ im większy układ tym mniej widoczne oddziaływania ładunków...

## Oddziaływania silne Źródło: ładunek kolorowy

Każdy z kwarków obdarzony jest ładunkiem kolorowym:  $R$ ,  $G$  lub  $B$ .

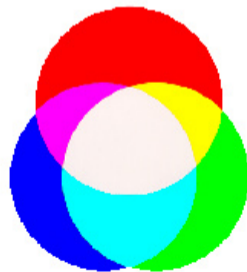


Anty-kwarki mają odpowiednie anty-kolory (kolory "ujemne"):  $\bar{B}$ ,  $\bar{R}$ ,  $\bar{G}$



Jako swobodne mogą istnieć tylko cząstki nie niosące netto ładunku kolorowego (cząstki "białe"):

- bariony (3 kwarki:  $R + G + B$ )
- antybariony (3 antykwarki:  $\bar{R} + \bar{G} + \bar{B}$ )
- mezony (kwark+antykwark, np.  $R + \bar{R}$ )



## Kolor

Szczególną cechą oddziaływań silnych jest to, że bezmasowe nośniki oddziaływań, **gluony**, też niosą **ładunek kolorowy** (odpowiadający kombinacji kolor+antykolor).

Oddziaływania między gluonami prowadzą do “odwrotnej” zależności sprzężenia od odległości między ładunkami:

- na małych odległościach oddziaływanie jest słabe
- na dużych odległościach oddziaływanie szybko rośnie

## Kolor

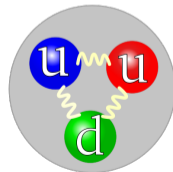
Szczególną cechą oddziaływań silnych jest to, że bezmasowe nośniki oddziaływań, **gluony**, też niosą **ładunek kolorowy** (odpowiadający kombinacji kolor+antykolor).

Oddziaływania między gluonami prowadzą do “odwrotnej” zależności sprzężenia od odległości między ładunkami:

- na małych odległościach oddziaływanie jest słabe
- na dużych odległościach oddziaływanie szybko rośnie

Oddziaływanie silne wiążące kwarki **przypomina** sprężynki łączące kulki:

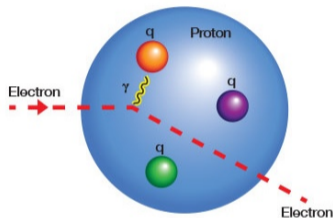
- gdy sprężynki są luźne, kulki “nie czują” swojej obecności
- gdy jednak chcemy jedną z kulek odsunąć, sprężyny się naciągają i starają się nas powstrzymać





## Asymptotyczna swoboda

Jeśli cząstka wiązki ("pocisk") mając dużą energię rozprasza się na protonie to z dużym prawdopodobieństwem będzie to rozproszenie na pojedynczym kwarku:



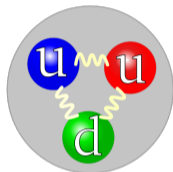
Przez **bardzo krótki czas zderzenia** kwark zachowuje się jakby był swobodny, wpływ pozostałych kwarków (i gluonów) w protonie można zaniedbać.

Obrazek ten działa tym lepiej im wyższy jest przekaz czteropędu  $Q^2$

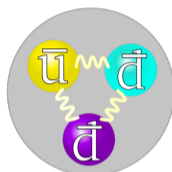
Oddziaływania silne wciąż pozostają bardzo istotne, ale na kolejnym etapie. Gdy z rozbitego protonu powstaje lawina nowych cząstek...

## Uwięzienie kwarków

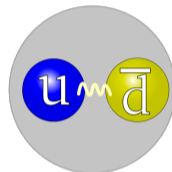
Gdy oddziaływania są “miękkie” (małe  $Q^2$ ) to siły kolorowe zmuszają kwarki do łączenia się w “białe” układy.



barion



antybarion

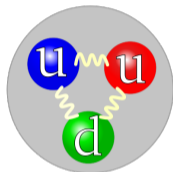


mezon

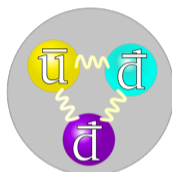
Tylko takie układy kwarków mogą się dodać od siebie na duże odległości.

## Uwięzienie kwarków

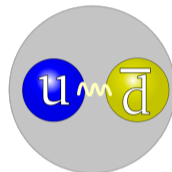
Gdy oddziaływania są “miękkie” (małe  $Q^2$ ) to siły kolorowe zmuszają kwarki do łączenia się w “białe” układy.



barion



antybarion



mezon

Tylko takie układy kwarków mogą się dodać od siebie na duże odległości.

Co się dzieje gdy próbujemy wyrwać kwark z protonu?

Koszt dostarczonej energii wyprodukowane zostają **dodatkowe pary kwark-antykwar** tak, żeby każdy “swobodny” kwark został otoczony dodatkowymi kwarkami (lub antykwarkami) “neutralizującymi” jego kolor.

Nigdy nie obserwujemy swobodnego kwarku!

## Oddziaływania silne    Źródło: ładunek kolorowy

Nośniki oddziaływań silnych, **gluony**, też niosą **ładunek kolorowy** i mogą ze sobą oddziaływać. Prowadzi to do “odwrotnej” zależności od odległości:

- na małych odległościach oddziaływanie jest słabe  
⇒ **asymptotyczna swoboda**
- na dużych odległościach oddziaływanie szybko rośnie  
⇒ **uwięzienie kwarków**

## Oddziaływania silne Źródło: ładunek kolorowy

Nośniki oddziaływań silnych, gluony, też niosą ładunek kolorowy i mogą ze sobą oddziaływać. Prowadzi to do “odwrotnej” zależności od odległości:

- na małych odległościach oddziaływanie jest słabe  
⇒ asymptotyczna swoboda
- na dużych odległościach oddziaływanie szybko rośnie  
⇒ uwięzienie kwarków

Oddziaływania silne spajają kwarki w protony i neutrony. (oddziaływanie silne kolorowe)

Mimo, że nukleony są “białe” to oddziaływania ich składników powodują efektywne przyciąganie krótkozasięgowe ⇒ powstają jądra atomowe (oddziaływanie silne jądrowe)

## Oddziaływania silne Źródło: ładunek kolorowy

Nośniki oddziaływań silnych, gluony, też niosą ładunek kolorowy i mogą ze sobą oddziaływać. Prowadzi to do “odwrotnej” zależności od odległości:

- na małych odległościach oddziaływanie jest słabe  
⇒ asymptotyczna swoboda
- na dużych odległościach oddziaływanie szybko rośnie  
⇒ uwięzienie kwarków

Oddziaływania silne spajają kwarki w protony i neutrony. (oddziaływanie silne kolorowe)

Mimo, że nukleony są “białe” to oddziaływania ich składników powodują efektywne przyciąganie krótkozasięgowe ⇒ powstają jądra atomowe (oddziaływanie silne jądrowe)

Dzisiaj poznamy ostatni rodzaj oddziaływania fundamentalnego

## Oddziaływania słabe

- 1 Oddziaływania podstawowe (przypomnienie+zaległości)
- 2 Liczby kwantowe**
- 3 Neutrina
- 4 Teoria Fermiego
- 5 Model Weinberg'a-Salam'a

Obserwacje rozpadów cząstek są ważnym źródłem informacji o ich własnościach.

Głównym czynnikiem decydującym o kanałach rozpadu jest **masa cząstki!**

**Najczęściej** powinny zachodzić rozpady, dla których różnica między masą cząstki początkowej i sumą mas cząstek powstających w rozpadzie jest **największa**.

**Im większa różnica mas tym “więcej swobody”**  $\Rightarrow$  **szybciej też powinien zachodzić dany rozpad.**



Obserwacje rozpadów cząstek są ważnym źródłem informacji o ich własnościach.

Głównym czynnikiem decydującym o kanałach rozpadu jest **masa cząstki!**

**Najczęściej** powinny zachodzić rozpady, dla których różnica między masą cząstki początkowej i sumą mas cząstek powstających w rozpadzie jest **największa**.

Im **większa różnica mas** tym **“więcej swobody”**  $\Rightarrow$  **szybciej też powinien zachodzić dany rozpad**.

**Ale nie zawsze to działa!** Przy porównywalnych masach: (patrz wykład 2)

$$\Lambda \rightarrow p + \pi^- \quad \tau \approx 3 \cdot 10^{-10} \text{ s}$$

$$\Delta \rightarrow p + \pi^- \quad \tau \sim 10^{-23} \text{ s}$$

Obserwacje rozpadów cząstek są ważnym źródłem informacji o ich własnościach.

Głównym czynnikiem decydującym o kanałach rozpadu jest **masa cząstki!**

**Najczęściej** powinny zachodzić rozpady, dla których różnica między masą cząstki początkowej i sumą mas cząstek powstających w rozpadzie jest **największa**.

Im **większa różnica mas** tym **“więcej swobody”**  $\Rightarrow$  **szybciej też powinien zachodzić dany rozpad**.

**Ale nie zawsze to działa!** Przy porównywalnych masach: (patrz wykład 2)

$$\Lambda \rightarrow p + \pi^- \quad \tau \approx 3 \cdot 10^{-10} \text{ s}$$

$$\Delta \rightarrow p + \pi^- \quad \tau \sim 10^{-23} \text{ s}$$

**Wiele obserwacji nie zgadzało się z oczekiwaniami.** Zmuszało do zastanowienia:

- dlaczego jedne cząstki rozpadają się szybciej, a inne wolniej?
- dlaczego jedne kanały rozpadu wybierane są częściej niż inne?
- dlaczego niektóre (dostępne energetycznie) rozpady nie zachodzą?

Aby wyjaśnić obserwowane kanały produkcji i rozpadów cząstek, a także mierzone czasy życia, trzeba było założyć, że oprócz **zasad zachowania energii i pędu** obowiązują też inne zasady zachowania związane z **własnościami samych cząstek!**

Aby wyjaśnić obserwowane kanały produkcji i rozpadów cząstek, a także mierzone czasy życia, trzeba było założyć, że oprócz **zasad zachowania energii i pędu** obowiązują też inne zasady zachowania związane z **własnościami samych cząstek!**

## Zachowanie ładunku elektrycznego

Ściśle przestrzegane w przyrodzie.

Dodatkowo ładunek cząstek elementarnych jest skwantowany - występuje tylko jako wielokrotność ładunku elementarnego (**ładunku elektronu**)

Aby wyjaśnić obserwowane kanały produkcji i rozpadów cząstek, a także mierzone czasy życia, trzeba było założyć, że oprócz **zasad zachowania energii i pędu** obowiązują też inne zasady zachowania związane z **własnościami samych cząstek!**

## Zachowanie ładunku elektrycznego

Ściśle przestrzegane w przyrodzie.

Dodatkowo ładunek cząstek elementarnych jest skwantowany - występuje tylko jako wielokrotność ładunku elementarnego (**ładunku elektronu**)

## Zachowanie liczby barionowej

bariony: cząstki złożone z 3 kwarków

Zapostulowane (!) w 1938 roku, że wyjaśnić stabilność protonu.

Bariony (p, n,  $\Lambda$ ...):  $B=+1$ , antybariony:  $B=-1$ , pozostałe:  $B=0$ .

Rozpad protonu może nie łamać zasady zachowania ładunku ani energii, np.  $p \rightarrow e^+ \nu_e$ . Ale rozpad taki nie zachowuje liczby barionowej ( $1 \rightarrow 0$ )! Dlatego jest **ZABRONIONY!**

Aby wyjaśnić obserwowane kanały produkcji i rozpadów cząstek, a także mierzone czasy życia, trzeba było założyć, że oprócz **zasad zachowania energii i pędu** obowiązują też inne zasady zachowania związane z **własnościami samych cząstek!**

## Zachowanie ładunku elektrycznego

Ściśle przestrzegane w przyrodzie.

Dodatkowo ładunek cząstek elementarnych jest skwantowany - występuje tylko jako wielokrotność ładunku elementarnego (**ładunku elektronu**)

## Zachowanie liczby barionowej

bariony: cząstki złożone z 3 kwarków

Zapostulowane (!) w 1938 roku, że wyjaśnić stabilność protonu.

Bariony (p, n,  $\Lambda$ ...):  $B=+1$ , antybariony:  $B=-1$ , pozostałe:  $B=0$ .

Rozpad protonu może nie łamać zasady zachowania ładunku ani energii, np.  $p \rightarrow e^+ \nu_e$ . Ale rozpad taki nie zachowuje liczby barionowej ( $1 \rightarrow 0$ )! Dlatego jest **ZABRONIONY!**

Liczba barionowa  $\equiv$  (liczba kwarków - liczba antykwarków)  $\times \frac{1}{3}$

## Zachowanie liczby leptonowej

W wielu procesach elektronowi towarzyszy neutrino (lub antyneutrino), np.



zaś nie występują procesy typu



## Zachowanie liczby leptonowej

W wielu procesach elektronowi towarzyszy neutrino (lub antyneutrino), np.



zaś nie występują procesy typu



Można to wytłumaczyć wprowadzając **elektronową liczbę leptonową**  $L_e$   
 $L_e(e^-) = L_e(\nu_e) = +1$ ,  $L_e(e^+) = L_e(\bar{\nu}_e) = -1$ , pozostałe:  $L_e = 0$



## Zachowanie liczby leptonowej

W wielu procesach elektronowi towarzyszy neutrino (lub antyneutrino), np.



zaś nie występują procesy typu



Można to wytłumaczyć wprowadzając **elektronową liczbę leptonową**  $L_e$   
 $L_e(e^-) = L_e(\nu_e) = +1$ ,  $L_e(e^+) = L_e(\bar{\nu}_e) = -1$ , pozostałe:  $L_e = 0$   
 Suma  $L_e$  w stanie początkowym musi być równa sumie  $L_e$  na końcu.

## Zachowanie liczby leptonowej

W wielu procesach elektronowi towarzyszy neutrino (lub antyneutrino), np.



zaś nie występują procesy typu



Można to wytłumaczyć wprowadzając **elektronową liczbę leptonową**  $L_e$   
 $L_e(e^-) = L_e(\nu_e) = +1$ ,  $L_e(e^+) = L_e(\bar{\nu}_e) = -1$ , pozostałe:  $L_e = 0$   
 Suma  $L_e$  w stanie początkowym musi być równa sumie  $L_e$  na końcu.

Analogicznie do  $L_e$  wprowadzamy **liczbę mionową**  $L_\mu$  i **liczbę taonową**  $L_\tau$ .  
 Całkowita liczba leptonowa:  $L = L_e + L_\mu + L_\tau$  ściśle zachowana !!!

Poszczególne liczby  $L_e$ ,  $L_\mu$ ,  $L_\tau$  zachowane prawie zawsze,  
 odstępstwa zaobserwowano dotychczas tylko przy oscylacjach neutrino...

## Dziwność

Wśród cząstek odkrywanych w latach 30 i 40 XX w. wyróżniała się klasa cząstek o dużych masach, a **nieoczekiwanie długich czasach życia**. Było to “dziwne”...

Okazało się też, że cząstki te produkowane są zawsze w parach ?!...

## Dziwność

Wśród cząstek odkrywanych w latach 30 i 40 XX w. wyróżniała się klasa cząstek o dużych masach, a **nieoczekiwanie długich czasach życia**. Było to “dziwne”...

Okazało się też, że cząstki te **produkowane są zawsze w parach** ?!...

Dlatego zapostulowano wprowadzenie nowej liczby kwantowej: **dziwności S**.

Dziwność jest **zachowana w oddziaływaniach silnych i elektromagnetycznych**, dlatego w tych oddziaływaniach cząstki dziwne mogą być tylko **produkowane w parach** (cząstka+antycząstka).

## Dziwność

Wśród cząstek odkrywanych w latach 30 i 40 XX w. wyróżniała się klasa cząstek o dużych masach, a **nieoczekiwanie długich czasach życia**. Było to “dziwne”...

Okazało się też, że cząstki te produkowane są zawsze w parach ?!...

Dlatego zapostulowano wprowadzenie nowej liczby kwantowej: **dziwności S**.

Dziwność jest **zachowana w oddziaływaniach silnych i elektromagnetycznych**, dlatego w tych oddziaływaniach cząstki dziwne mogą być tylko **produkowane w parach** (cząstka+antycząstka).

**Gdyby dziwność była ściśle zachowana to cząstki dziwne byłyby stabilne!**

Dziwność **nie jest jednak zachowana w oddziaływaniach słabych**

⇒ cząstki dziwne rozpadają się za pośrednictwem **oddziaływań słabych**

⇒ to tłumaczy dużo **dłuższy czas życia** (w porównaniu do rozpadów “zwykłych” cząstek w oddz. silnych i elektromagnetycznych)

## Dziwność

Wśród cząstek odkrywanych w latach 30 i 40 XX w. wyróżniała się klasa cząstek o dużych masach, a **nieoczekiwanie długich czasach życia**. Było to “dziwne”...

Okazało się też, że cząstki te produkowane są zawsze w parach ?!...

Dlatego zapostulowano wprowadzenie nowej liczby kwantowej: **dziwności  $S$** .

Dziwność jest **zachowana w oddziaływaniach silnych i elektromagnetycznych**, dlatego w tych oddziaływaniach cząstki dziwne mogą być tylko **produkowane w parach** (cząstka+antycząstka).

**Gdyby dziwność była ściśle zachowana to cząstki dziwne byłyby stabilne!**

Dziwność **nie jest jednak zachowana w oddziaływaniach słabych**

⇒ cząstki dziwne rozpadają się za pośrednictwem **oddziaływań słabych**

⇒ to tłumaczy dużo **dłuższy czas życia** (w porównaniu do rozpadów “zwykłych” cząstek w oddz. silnych i elektromagnetycznych)

Dziś wiemy już, że dziwność cząstki odpowiada liczbie kwarków  $s$  w danej cząstce...

- 1 Oddziaływania podstawowe (przypomnienie+zaległości)
- 2 Liczby kwantowe
- 3 Neutrina**
- 4 Teoria Fermiego
- 5 Model Weinberg'a-Salam'a

## Promieniotwórczość

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

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



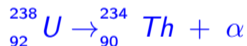
## Promieniotwórczość

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

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

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

- promieniowanie  $\alpha$



jądra helu:  $2p2n$

- promieniowanie  $\beta$



elektrony ( $\beta^+$  - pozytony)

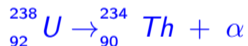
## Promieniotwórczość

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

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

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

- promieniowanie  $\alpha$



jądra helu:  $2p2n$

- promieniowanie  $\beta$



elektrony ( $\beta^+$  - pozytony)

- promieniowanie  $\gamma$



wysokoenergetyczne fotony

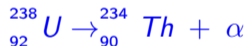
## Promieniotwórczość

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

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

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

- promieniowanie  $\alpha$



jądra helu:  $2p2n$

- promieniowanie  $\beta$



elektrony ( $\beta^+$  - pozytony)

- promieniowanie  $\gamma$

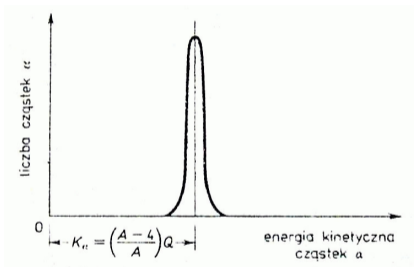


wysokoenergetyczne fotony

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

## Rozpady $\alpha$

Dyskretne widmo energii:



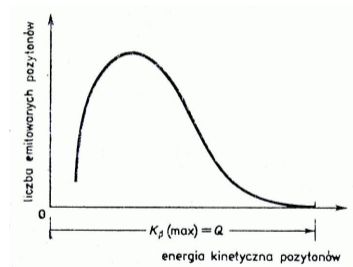
Energia emitowanej cząstki

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

## Rozpad $\beta$

Ciągłe widmo energii:

Naruszenie zasady zachowania !?



Energia emitowanych elektronów

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

## Hipoteza Pauliego

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



## Hipoteza Pauliego

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

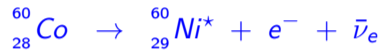


Neutrino nie oddziałuje silnie (nie ma koloru), elektromagnetycznie (nie ma ładunku). Oddziaływania grawitacyjne są pomijalne (ma praktycznie zerową, zaniedbywalną masę).

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

## Hipoteza Pauliego

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



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

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

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



rozpad ten zachodzi również dla swobodnego neutronu...

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

## Orbitalny moment pędu

Elektron krążący wokół jądra atomu ma związany z tym moment pędu.

Moment pędu jest tym dla ruchu obrotowego czym pęd dla ruchu postępowego.

W układach izolowanych jest ściśle zachowany - zasada zachowania momentu pędu.



## Orbitalny moment pędu

Elektron krążący wokół jądra atomu ma związany z tym moment pędu.

Moment pędu jest tym dla ruchu obrotowego czym pęd dla ruchu postępowego.

W układach izolowanych jest ściśle zachowany - zasada zachowania momentu pędu.

Ruch ładunku wytwarza też moment magnetyczny! Tak jak pętla z drutu w której płynie prąd...

Jeśli cząstka naładowana ma moment pędu to ma też moment magnetyczny!

## Orbitalny moment pędu

Elektron krążący wokół jądra atomu ma związany z tym moment pędu.

Moment pędu jest tym dla ruchu obrotowego czym pęd dla ruchu postępowego.

W układach izolowanych jest ściśle zachowany - zasada zachowania momentu pędu.

Ruch ładunku wytwarza też moment magnetyczny! Tak jak pętla z drutu w której płynie prąd...

Jeśli cząstka naładowana ma moment pędu to ma też moment magnetyczny!

Jeśli atom/jądro/cząstka ma niezerowy moment magnetyczny to w silnym polu magnetycznym stara się ustawić momentem magnetycznym wzdłuż kierunku pola. Ośrodek złożony z takich atomów może ulec polaryzacji...

## Orbitalny moment pędu

Elektron krążący wokół jądra atomu ma związany z tym **moment pędu**.

**Moment pędu jest tym dla ruchu obrotowego czym pęd dla ruchu postępowego.**

**W układach izolowanych jest ściśle zachowany - zasada zachowania momentu pędu.**

Ruch ładunku wytwarza też **moment magnetyczny!** Tak jak pętla z drutu w której płynie prąd...

**Jeśli cząstka naładowana ma moment pędu to ma też moment magnetyczny!**

Jeśli atom/jądro/cząstka ma niezerowy **moment magnetyczny** to w **silnym polu magnetycznym** stara się ustawić momentem magnetycznym wzdłuż kierunku pola. Ośrodek złożony z takich atomów może ulec **polaryzacji...**

Dla pojedynczej cząstki posiadającej moment magnetyczny, tor jej ruchu będzie **zakrzywiany** w **niejednorodnym polu magnetycznym**. W ten sposób możemy badać orientację momentu magnetycznego cząstki  $\Rightarrow$  **orientację jej momentu pędu**

## Polaryzacja ośrodka - pokaz



## Spinowy moment pędu “spin”

W 1925 roku **Wolfgang Pauli** zapostulował, że **dwa elektrony** w atomie **nie mogą** znajdować się jednocześnie w tym samym stanie, opisanym przez **ten sam zestaw liczb kwantowych**. Jednocześnie jednak musiał wprowadzić dodatkową “wewnętrzną” liczbę kwantową dla elektronu, która mogła przyjmować tylko dwie wartości.

Jest to tzw. **Zakaz Pauliego**

konieczny do wytłumaczenia obserwowanych doświadczalnie **widm atomów**.

**Co najwyżej dwa elektrony w atomie obsadzają stan podstawowy!**

Okazuje się, że zakaz Pauliego dotyczy wszystkich leptonów i kwarków.

## Spinowy moment pędu “spin”

W 1925 roku **Wolfgang Pauli** zapostulował, że **dwa elektrony** w atomie **nie mogą** znajdować się jednocześnie w tym samym stanie, opisanym przez **ten sam zestaw liczb kwantowych**. Jednocześnie jednak musiał wprowadzić dodatkową “wewnętrzną” liczbę kwantową dla elektronu, która mogła przyjmować tylko dwie wartości.

Wkrótce potem **George Uhlenbeck** i **Samuel Goudsmit**, doszedli do wniosku, że elektron ma swój własny moment pędu - spin. **Orientacja spinu elektronu stanowi właśnie dodatkową liczbę kwantową** potrzebną, aby zakaz Pauliego dobrze opisywał atomy.

## Spinowy moment pędu “spin”

W 1925 roku **Wolfgang Pauli** zapostulował, że **dwa elektrony** w atomie **nie mogą** znajdować się jednocześnie w tym samym stanie, opisanym przez **ten sam zestaw liczb kwantowych**. Jednocześnie jednak musiał wprowadzić dodatkową “wewnętrzną” liczbę kwantową dla elektronu, która mogła przyjmować tylko dwie wartości.

Wkrótce potem **George Uhlenbeck** i **Samuel Goudsmit**, doszedli do wniosku, że elektron ma swój własny moment pędu - spin. **Orientacja spinu elektronu stanowi właśnie dodatkową liczbę kwantową potrzebną, aby zakaz Pauliego dobrze opisywał atomy.**

Mechanika kwantowa przewiduje, że dla dowolnie wybranego kierunku  $Z$  rzut spinu  $s$  elektronu może przyjąć tylko dwie wartości:  $s_z = \pm \frac{1}{2} \hbar$ .

⇒ dlatego mówimy, że elektron ma **“spin połówkowy”** (jest fermionem).

## Spinowy moment pędu “spin”

W 1925 roku **Wolfgang Pauli** zapostulował, że **dwa elektrony** w atomie **nie mogą** znajdować się jednocześnie w tym samym stanie, opisanym przez **ten sam zestaw liczb kwantowych**. Jednocześnie jednak musiał wprowadzić dodatkową “wewnętrzną” liczbę kwantową dla elektronu, która mogła przyjmować tylko dwie wartości.

Wkrótce potem **George Uhlenbeck** i **Samuel Goudsmit**, doszedli do wniosku, że elektron ma swój własny moment pędu - spin. **Orientacja spinu elektronu stanowi właśnie dodatkową liczbę kwantową potrzebną, aby zakaz Pauliego dobrze opisywał atomy.**

Mechanika kwantowa przewiduje, że dla dowolnie wybranego kierunku  $Z$  rzut spinu  $s$  elektronu może przyjąć tylko dwie wartości:  $s_z = \pm \frac{1}{2} \hbar$ .

⇒ dlatego mówimy, że elektron ma **“spin połówkowy”** (jest fermionem).

## Dwa rodzaje cząstek:

- cząstki materii - fermiony (cząstki o spinie  $\frac{1}{2}$ )
- nośniki oddziaływań - bozony (cząstki o spinie całkowitym)



## Spinowy moment pędu “spin”

W 1925 roku **Wolfgang Pauli** zapostulował, że **dwa elektrony** w atomie **nie mogą** znajdować się jednocześnie w tym samym stanie, opisanym przez **ten sam zestaw liczb kwantowych**. Jednocześnie jednak musiał wprowadzić dodatkową “wewnętrzną” liczbę kwantową dla elektronu, która mogła przyjmować tylko dwie wartości.

Wkrótce potem **George Uhlenbeck** i **Samuel Goudsmit**, doszedli do wniosku, że elektron ma swój własny moment pędu - spin. **Orientacja spinu elektronu stanowi właśnie dodatkową liczbę kwantową potrzebną, aby zakaz Pauliego dobrze opisywał atomy.**

Mechanika kwantowa przewiduje, że dla dowolnie wybranego kierunku  $Z$  rzut spinu  $s$  elektronu może przyjąć tylko dwie wartości:  $s_z = \pm \frac{1}{2} \hbar$ .

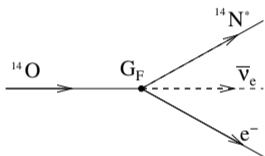
⇒ dlatego mówimy, że elektron ma “**spin połówkowy**” (jest fermionem).

W przypadku poruszającego się elektronu mówimy, że jest  $Z$  - kierunek ruchu

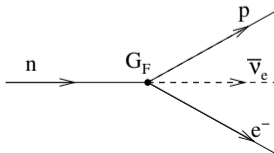
- **prawoskrętny**, jeśli spin jest **zgodny** z kierunkiem pędu (rzut  $s_z = +\frac{1}{2} \hbar$ ),
- **lewoskrętny**, jeśli spin jest **przeciwny** do kierunku pędu (rzut  $s_z = -\frac{1}{2} \hbar$ ).

- 1 Oddziaływania podstawowe (przypomnienie+zaległości)
- 2 Liczby kwantowe
- 3 Neutrina
- 4 Teoria Fermiego**
- 5 Model Weinberg'a-Salam'a

W 1933 roku **Enrico Fermi** zaproponował teorię **rozpadu  $\beta$** :



Na poziomie **nukleonów**:



Uniwersalne **sprężenie punktowe**  
 $\Rightarrow$  jeden wolny parametr:  $G_F$   
 (obecnie nazwany “stałą Fermiego”)

Czas życia izotopu zależy jedynie od energii rozpadu  $E_0$

$$\frac{1}{\tau} = \frac{G_F^2 E_0^5}{30 h \pi^3}$$

Stała Fermiego jest bardzo mała

$$G_F \approx 1.2 \cdot 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$$

$\Rightarrow$  długie czasy życia

Teoria Fermiego zakładała na początku, że oddziaływania słabe mają taką samą strukturę jak oddziaływania elektromagnetyczne. Model w tym kształcie przetrwał ponad 20 lat.

**Teoria Fermiego** zakładała na początku, że oddziaływania **słabe** mają taką samą strukturę jak oddziaływania **elektromagnetyczne**. **Model w tym kształcie przetrwał ponad 20 lat.**

## **Doświadczenie Wu** 1957

Pani **C.S.Wu** zaobserwowała **łamanie parzystości** w rozpadzie



W niskiej temperaturze większość **jąderek kobaltu** ustawia się **spinem** wzdłuż kierunku pola magnetycznego.  $\Rightarrow$  Wu zaobserwowała **nadwyżkę** elektronów emitowanych w kierunku **przeciwным do spinu jądra**.

Teoria Fermiego zakładała na początku, że oddziaływania **słabe** mają taką samą strukturę jak oddziaływania **elektromagnetyczne**. Model w tym kształcie przetrwał ponad 20 lat.

## Doświadczenie Wu 1957

Pani C.S.Wu zaobserwowała **łamanie parzystości** w rozpadzie



W niskiej temperaturze większość **jąder kobaltu** ustawia się **spinem** wzdłuż kierunku pola magnetycznego.  $\Rightarrow$  Wu zaobserwowała **nadwyżkę** elektronów emitowanych w kierunku **przeciwным do spinu jądra**.

Aby wytłumaczyć wynik doświadczenia trzeba było przyjąć, że:

- produkowane elektrony są zawsze **“lewoskrętne”** (spin przeciwny do pędu)
- produkowane anty-neutrino są zawsze **“prawoskrętne”** (spin zgodny z pędem)

## Parzystość

Transformacja przystości (P):

$$(x, y, z) \rightarrow (-x, -y, -z)$$

odwrócenie kierunku osi wszystkich współrzędnych przestrzennych.

Jest to równoważne operacji odbicia względem płaszczyzny ("w lustrze").

## Parzystość

Transformacja przystości (P):

$$(x, y, z) \rightarrow (-x, -y, -z)$$

odwrócenie kierunku osi wszystkich współrzędnych przestrzennych.

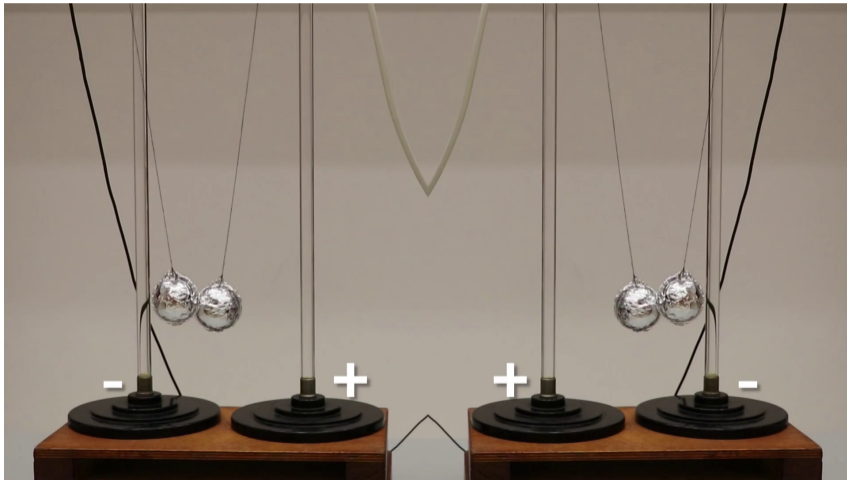
Jest to równoważne operacji odbicia względem płaszczyzny (“w lustrze”).

**Opis** oddziaływań elektromagnetycznych **nie zmienia się** przy odbiciu (**odwrócenie wszystkich współrzędnych przestrzennych**) Gdy obserwujemy w lustrze oddziaływania ładunków elektrycznych to zachodzą one według dokładnie tych samych praw, co w rzeczywistym (nie odbitym) świecie

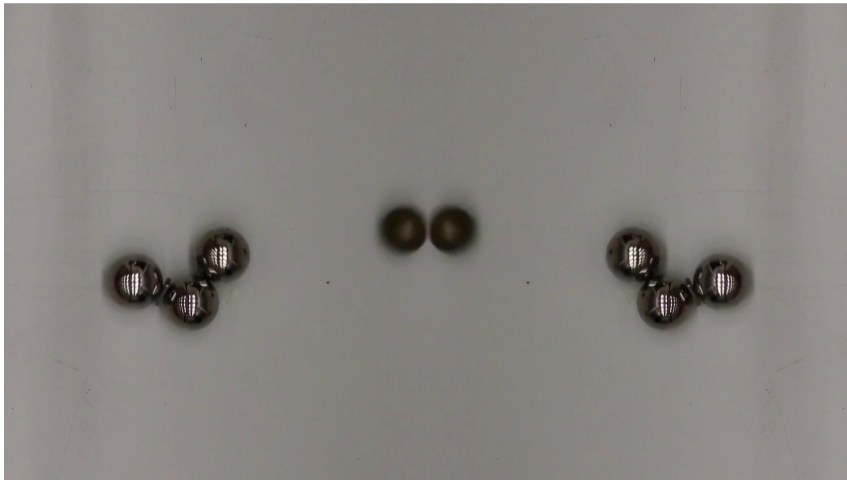
⇒ Mówimy, że **oddziaływania EM zachowują przystość**.



## Parzystość - pokaz



## Parzystość - pokaz



## Łamanie parzystości

Spin cząstki nie zmienia się przy odbiciu (!) (tak jak moment pędu), ale kierunek jej ruchu zmienia się na przeciwny  $\Rightarrow$  zmienia się skrętność cząstki:

- cząstka lewoskrętna zamienia się na prawoskrętną
- cząstka prawoskrętna zamienia się na lewoskrętną

## Łamanie parzystości

Spin cząstki nie zmienia się przy odbiciu (!) (tak jak moment pędu), ale kierunek jej ruchu zmienia się na przeciwny  $\Rightarrow$  zmienia się skrętność cząstki:

- cząstka lewoskrętna zamienia się na prawoskrętną
- cząstka prawoskrętna zamienia się na lewoskrętną

Doświadczenie Wu:



Po odwróceniu współrzędnych (transformacja parzystości P):



Ale okazuje się, że takiej konfiguracji nie obserwujemy !

$\Rightarrow$  oddziaływania słabe łamią parzystość

Patrząc na przebieg pomiaru możemy stwierdzić, czy patrzymy “wprost”, czy na odbicie...

## Łamanie parzystości - pokaz



## Sprężenie ładunkowe

Transformacja zamiany cząstki na anty-cząstkę (C).

Rozpad  $\pi^-$ :      wynik doświadczeń O

$$\pi^- \rightarrow \mu_L^- + \bar{\nu}_{\mu,R}$$

## Sprężenie ładunkowe

Transformacja zamiany cząstki na anty-cząstkę (C).

Rozpad  $\pi^-$ :      wynik doświadczeń O

$$\pi^- \rightarrow \mu_L^- + \bar{\nu}_{\mu,R}$$

O po odwróceniu współrzędnych (P):

$$\pi^- \rightarrow \mu_R^- + \bar{\nu}_{\mu,L}$$

O po zamianie cząstek na antycząstki (C):

$$\pi^+ \rightarrow \mu_L^+ + \nu_{\mu,R}$$

## Sprężenie ładunkowe

Transformacja zamiany cząstki na anty-cząstkę (C).

Rozpad  $\pi^-$ :      wynik doświadczeń O

$$\pi^- \rightarrow \mu_L^- + \bar{\nu}_{\mu,R}$$

O po odwróceniu współrzędnych (P):      Nie obserwujemy !

$$\pi^- \rightarrow \mu_R^- + \bar{\nu}_{\mu,L}$$

O po zamianie cząstek na antycząstki (C):      Nie obserwujemy !

$$\pi^+ \rightarrow \mu_L^+ + \nu_{\mu,R}$$



## Sprzężenie ładunkowe

Transformacja zamiany cząstki na anty-cząstkę (C).

Rozpad  $\pi^-$ :      **wynik doświadczeń**  $\bigcirc$

$$\pi^- \rightarrow \mu_L^- + \bar{\nu}_{\mu,R}$$

$\bigcirc$  po odwróceniu współrzędnych (P):      **Nie obserwujemy !**

$$\pi^- \rightarrow \mu_R^- + \bar{\nu}_{\mu,L}$$

$\bigcirc$  po zamianie cząstek na antycząstki (C):      **Nie obserwujemy !**

$$\pi^+ \rightarrow \mu_L^+ + \nu_{\mu,R}$$

$\bigcirc$  po zastosowaniu (złożenie) obu transformacji (CP):      **Obserwujemy !!!**

$$\pi^+ \rightarrow \mu_R^+ + \nu_{\mu,L}$$

**Oddziaływania słabe zachowują CP !!!**      **Zarówno C jak i P jest w oddz. słabych łamane**

- 1 Oddziaływania podstawowe (przypomnienie+zaległości)
- 2 Liczby kwantowe
- 3 Neutrina
- 4 Teoria Fermiego
- 5 Model Weinberg'a-Salam'a

## Nowy model oddziaływań słabych 1968

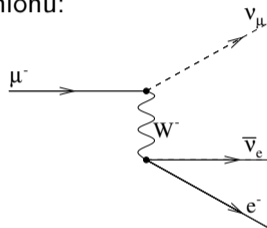
Weinberg i Salam zauważyli, że precyzyjny opis oddziaływań neutrin wymaga założenia, że zachodzą one przez wymianę **bardzo masywnego** bozonu  $W^\pm$

“Słabość” oddziaływania nie wynika ze stałej sprzężenia a z **dużej masy bozonu**:

$$G_F \sim \frac{g^2}{m_W^2}$$

Przyjmując, że **sprzężenie**  $g$  powinno być takie jak dla oddziaływań **EM**, **Weinberg i Salam** oszacowali masę  $m_W \sim 80 \text{ GeV}$ ...

Rozpad mionu:



## Nowy model oddziaływań słabych 1968

Weinberg i Salam zauważyli, że precyzyjny opis oddziaływań neutrin wymaga założenia, że zachodzą one przez wymianę **bardzo masywnego** bozonu  $W^\pm$

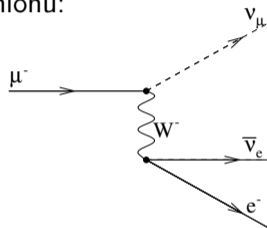
“Słabość” oddziaływania nie wynika ze stałej sprzężenia a z **dużej masy bozonu**:

$$G_F \sim \frac{g^2}{m_W^2}$$

Przyjmując, że **sprzężenie**  $g$  powinno być takie jak dla oddziaływań **EM**, **Weinberg i Salam** oszacowali masę  $m_W \sim 80 \text{ GeV}$ ...

Model przewidywał też istnienie dodatkowego, **ciężkiego neutralnego bozonu**  $Z^0$ , którego masę oszacowali na  $m_Z \sim 90 \text{ GeV}$   $\Rightarrow$  z jego udziałem oczekiwany **nowy typ reakcji !!!**

Rozpad mionu:



## Potwierdzenie doświadczalne

W roku 1963 uruchomiona została pierwsza **wiązka neutrin** mionowych w CERN  
⇒ początek precyzyjnych pomiarów oddziaływań neutrin

Do pomiarów tych oddziaływań zbudowano eksperyment **Gargamelle**  
komorę pęcherzykową o długości 4.8 m, około 12 m<sup>3</sup> freonu (CF<sub>3</sub>Br).

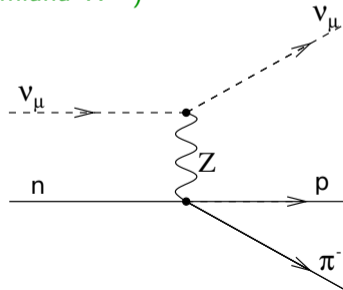
Oprócz reakcji oczekiwanych jako “odwrotne” procesy  $\beta$  (wymiana  $W^\pm$ )

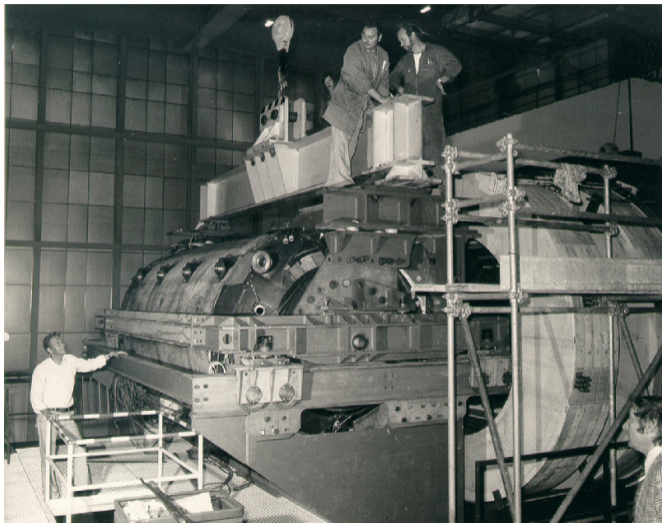


zaobserwowano także procesy **bez przekazu ładunku**  
(tzw. prądy neutralne “**Neutral Currents**”; 1973):

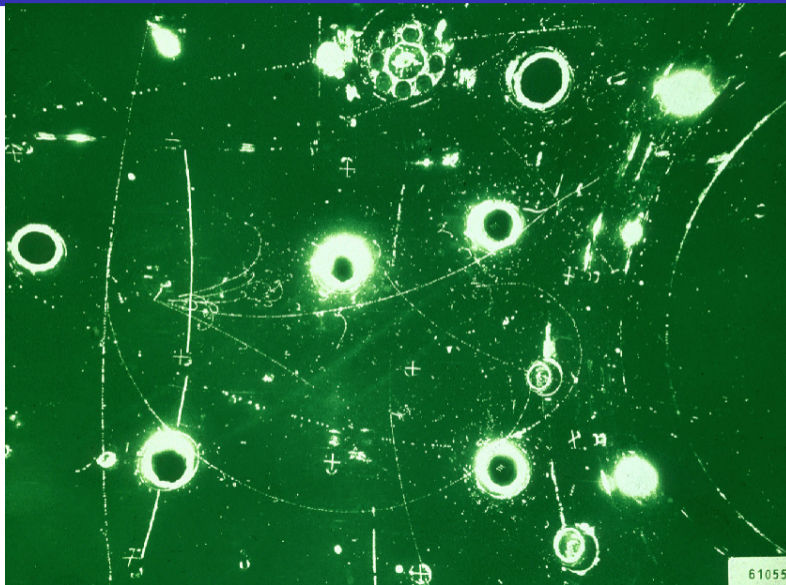


⇒ potwierdzenie przewidywań modelu





Pełen film na stronie CDS Videos



## Duplety cząstek

Aby móc wytłumaczyć obserwowane reakcje zachodzące poprzez wymianę  $W^\pm$  należało dodatkowo założyć, że cząstki występują w parach, tzw. dubletach:

$$\begin{array}{l}
 U \Rightarrow \left( \begin{array}{c} \nu_e \\ e^- \end{array} \right) \quad \left( \begin{array}{c} \nu_\mu \\ \mu^- \end{array} \right) \quad \left( \begin{array}{c} \nu_\tau \\ \tau^- \end{array} \right) \quad \left( \begin{array}{c} u \\ d \end{array} \right) \quad \left( \begin{array}{c} c \\ s \end{array} \right) \quad \left( \begin{array}{c} t \\ b \end{array} \right) \\
 D \Rightarrow
 \end{array}
 \quad Q_U = Q_D + 1e(!)$$



## Dublety cząstek

Aby móc wytłumaczyć obserwowane reakcje zachodzące poprzez wymianę  $W^\pm$  należało dodatkowo założyć, że cząstki występują w parach, tzw. dubletach:

$$\begin{array}{l}
 U \Rightarrow \left( \begin{array}{c} \nu_e \\ e^- \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} \nu_\mu \\ \mu^- \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} \nu_\tau \\ \tau^- \end{array} \right) \quad \left( \begin{array}{c} u \\ d \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} c \\ s \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} t \\ b \end{array} \right) \quad Q_U = Q_D + 1e(!) \\
 D \Rightarrow
 \end{array}$$

Fermiony tworzące dublet mogą **przebrać jeden w drugi** przez emisję (lub absorpcję)  $W^\pm$ .  
Przykładowo:

$$\begin{array}{ll}
 \mu^- \rightarrow \nu_\mu + W^- & \text{czyli } D \rightarrow U + W^- \\
 c \rightarrow s + W^+ & U \rightarrow D + W^+
 \end{array}$$

## Duplety cząstek

Aby móc wytłumaczyć obserwowane reakcje zachodzące poprzez wymianę  $W^\pm$  należało dodatkowo założyć, że cząstki występują w parach, tzw. dubletach:

$$\begin{array}{l} U \Rightarrow \\ D \Rightarrow \end{array} \left( \begin{array}{c} \nu_e \\ e^- \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} \nu_\mu \\ \mu^- \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} \nu_\tau \\ \tau^- \end{array} \right) \quad \left( \begin{array}{c} u \\ d \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} c \\ s \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} t \\ b \end{array} \right) \quad Q_U = Q_D + 1e(!)$$

Fermiony tworzące dublet mogą **przebrać jeden w drugi** przez emisję (lub absorpcję)  $W^\pm$ .  
Przykładowo:

$$\begin{array}{ll} \mu^- \rightarrow \nu_\mu + W^- & \text{czyli } D \rightarrow U + W^- \\ c \rightarrow s + W^+ & U \rightarrow D + W^+ \end{array}$$

Możliwe są też reakcje “kreacji” i “anihilacji”:

$$\begin{array}{ll} W^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu & \text{czyli } W^- \rightarrow D + \bar{U} \\ c + \bar{s} \rightarrow W^+ & U + \bar{D} \rightarrow W^+ \end{array}$$

Wszystkie te reakcje mogą też zachodzić w drugą stronę...

Oddziaływania zachodzące poprzez wymianę  $W^\pm$  nazywane są (historycznie) procesami z wymianą prądów naładowanych (Charged Current - CC).

Oddziaływania zachodzące poprzez wymianę  $W^\pm$  nazywane są (historycznie) procesami z wymianą prądów naładowanych (Charged Current - CC).

## Oddziaływania z wymianą $Z^0$

Historycznie nazywane procesami z wymiana prądów neutralnych (Neutral Current - NC).

Oddziaływania zachodzące poprzez wymianę  $W^\pm$  nazywane są (historycznie) procesami z wymianą prądów naładowanych (Charged Current - CC).

## Oddziaływania z wymianą $Z^0$

Historycznie nazywane procesami z wymiana prądów neutralnych (Neutral Current - NC).

Emisja lub absorbcja bozonu  $Z^0$  nie może zmienić zapachu cząstki!

Podobnie jak emisja/absorbpcja fotonu w oddziaływaniach EM.

Nie są możliwe procesy typu:

$$\mu^- \rightarrow e^- + Z^0$$

$$t \rightarrow c + Z^0$$

w ramach Modelu Standardowego

Oddziaływania zachodzące poprzez wymianę  $W^\pm$  nazywane są (historycznie) procesami z wymianą prądów naładowanych (Charged Current - CC).

## Oddziaływania z wymianą $Z^0$

Historycznie nazywane procesami z wymiana prądów neutralnych (Neutral Current - NC).

Emisja lub absorbcja bozonu  $Z^0$  nie może zmienić zapachu cząstki!

Podobnie jak emisja/absorbcja fotonu w oddziaływaniach EM.

Nie są możliwe procesy typu:

$$\mu^- \rightarrow e^- + Z^0$$

$$t \rightarrow c + Z^0$$

w ramach Modelu Standardowego

Oddziaływaniom słabym, zarówno oddziaływaniom NC jak i CC, podlegają WSZYSTKIE znane nam cząstki materii (kwarki i leptony oraz ich antycząstki)!

Są to jedyne oddziaływania (nie licząc grawitacji) w których biorą udział neutrina!

## Oddziaływania słabe

Są najłabsze, ale też z pewnością najbardziej skomplikowane z pośród wszystkich oddziaływań podstawowych:

- pośredniczą masywne nośniki  $W^{\pm}$  i  $Z^0$   
fotony i gluony są bezmasowe

## Oddziaływania słabe

Są najłabsze, ale też z pewnością najbardziej skomplikowane z pośród wszystkich oddziaływań podstawowych:

- pośredniczą masywne nośniki  $W^{\pm}$  i  $Z^0$   
fotony i gluony są bezmasowe
- mogą zmieniać zapach cząstki (w oddziaływaniach CC)  
w oddziaływaniach silnych i EM zapach jest zachowany



## Oddziaływania słabe

Są najłabsze, ale też z pewnością najbardziej skomplikowane z pośród wszystkich oddziaływań podstawowych:

- pośredniczą masywne nośniki  $W^{\pm}$  i  $Z^0$   
fotony i gluony są bezmasowe
- mogą zmieniać zapach cząstki (w oddziaływaniach CC)  
w oddziaływaniach silnych i EM zapach jest zachowany
- łamią symetrie parzystości: świat odbity wygląda “inaczej”  
parzystość zachowana w oddziaływaniach silnych i EM

## Oddziaływania słabe

Są najłabsze, ale też z pewnością najbardziej skomplikowane z pośród wszystkich oddziaływań podstawowych:

- pośredniczą masywne nośniki  $W^{\pm}$  i  $Z^0$   
fotony i gluony są bezmasowe
- mogą zmieniać zapach cząstki (w oddziaływaniach CC)  
w oddziaływaniach silnych i EM zapach jest zachowany
- łamią symetrie parzystości: świat odbity wygląda “inaczej”  
parzystość zachowana w oddziaływaniach silnych i EM
- łamią sprzężenie ładunkowe: antycząstki oddziałują inaczej niż cząstki  
oddziaływani silne i EM takie same

## Oddziaływania słabe

Są najłabsze, ale też z pewnością najbardziej skomplikowane z pośród wszystkich oddziaływań podstawowych:

- pośredniczą masywne nośniki  $W^{\pm}$  i  $Z^0$   
fotony i gluony są bezmasowe
- mogą zmieniać zapach cząstki (w oddziaływaniach CC)  
w oddziaływaniach silnych i EM zapach jest zachowany
- łamią symetrie parzystości: świat odbity wygląda “inaczej”  
parzystość zachowana w oddziaływaniach silnych i EM
- łamią sprzężenie ładunkowe: antycząstki oddziałują inaczej niż cząstki  
oddziaływani silne i EM takie same

Jeśli nawiążemy kontakt z kosmitami (np. za pośrednictwem fal radiowych), będziemy mogli sprawdzić, patrząc na wyniki ich eksperymentów, czy są zbudowani z materii czy z antymaterii...

## Oddziaływania słabe

Mogłoby się wydawać, że są jednocześnie najmniej dla nas istotne...

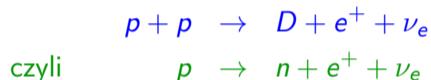
Wprost przeciwnie!

## Oddziaływania słabe

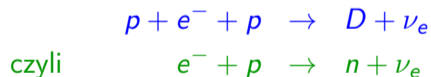
Mogłoby się wydawać, że są jednocześnie najmniej dla nas istotne...

Wprost przeciwnie!

Oddziaływania słabe są odpowiedzialne za przemiany termojądrowe w Słońcu. Proces spalania wodoru zaczyna się od procesu **p-p**:



deuter produkowany jest także w reakcji “**pep**”:

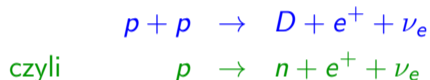


## Oddziaływania słabe

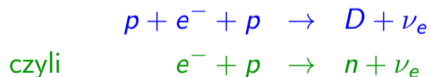
Mogłoby się wydawać, że są jednocześnie najmniej dla nas istotne...

Wprost przeciwnie!

Oddziaływania słabe są odpowiedzialne za przemiany termojądrowe w Słońcu. Proces spalania wodoru zaczyna się od procesu **p-p**:



deuter produkowany jest także w reakcji “**pep**”:



**Ponieważ są to oddziaływania słabe to reakcje te zachodzą bardzo powoli!**

Słońce świeci od ok. 5 mld. lat, dzięki temu mogło rozwinąć się życie na Ziemi.

Gdyby oddziaływania słabe były silniejsze, nie mielibyśmy szans...