

Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

Oddziaływania słabe

Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki



7 listopada 2023

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

- 1 Oddziaływania podstawowe (przypomnienie+zaległości)
- 2 Liczby kwantowe
- 3 Neutrina
- 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!

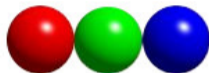
Decydują o mikroskopowej budowie materii: opisują strukturę atomów, wiązania chemiczne, własności fizyczne materiałów. Oddziaływania makroskopowe (tarcie, siły sprężystości itp.) są na poziomie mikroskopowym oddziaływaniami elektromagnetycznymi.

Ładunki dodatnie i ujemne równoważą się

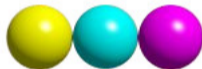
⇒ im większy układ tym mniej widoczne oddziaływania ładunków...

Oddziaływania silne Źródło: ładunek kolorowy

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

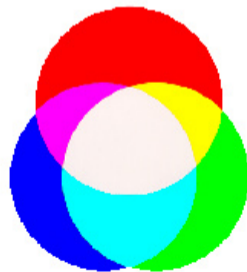


Anty-kwarki mają odpowiednie anty-kolory (kolory "ujemne"): \bar{B} , \bar{R} , \bar{G}



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. $R + \bar{R}$)



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, Λ ...): $B=+1$, 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, Λ ...): $B=+1$, 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.



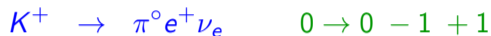
zaś nie występują procesy typu



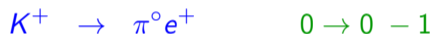
Można to wytłumaczyć wprowadzając **elektronową liczbę leptonową** L_e
 $L_e(e^-) = L_e(\nu_e) = +1$, $L_e(e^+) = L_e(\bar{\nu}_e) = -1$, pozostałe: $L_e = 0$

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_μ i **liczbę taonową** L_τ .
 Całkowita liczba leptonowa: $L = L_e + L_\mu + L_\tau$ ściśle zachowana !!!

Poszczególne liczby L_e , L_μ , L_τ 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](#)

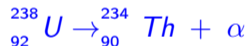
Promieniotwórczość

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 α



jądra helu: $2p2n$

- promieniowanie β



elektrony (β^+ - pozytony)

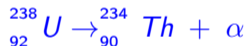
Promieniotwórczość

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

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

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

- promieniowanie α



jądra helu: $2p2n$

- promieniowanie β



elektrony (β^+ - pozytony)

- promieniowanie γ



wysokoenergetyczne fotony

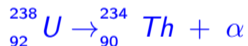
Promieniotwórczość

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

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

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

- promieniowanie α



jądra helu: $2p2n$

- promieniowanie β



elektrony (β^+ - pozytony)

- promieniowanie γ

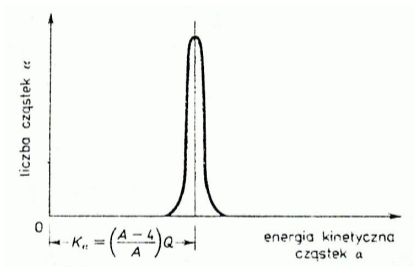


wysokoenergetyczne fotony

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

Rozpady α

Dyskretne widmo energii:



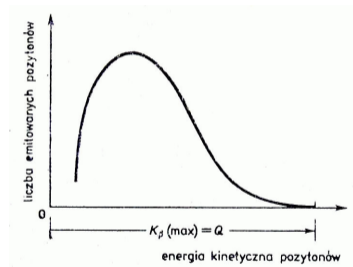
Energia emitowanej cząstki

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

Rozpad β

Ciągłe widmo energii:

Naruszenie zasady zachowania !?



Energia emitowanych elektronów

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

Hipoteza Pauliego

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



Hipoteza Pauliego

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

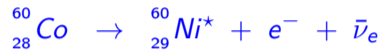


Neutrino nie oddziałuje silnie (nie ma koloru), elektromagnetycznie (nie ma ładunku). Oddziaływania grawitacyjne są pomijalne (ma praktycznie zerową, zaniedbywalną masę).

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

Hipoteza Pauliego

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



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

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

Na poziomie nukleonów rozpad β^- 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** (wspominaliśmy już tydzień temu) 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 połówkowym)
- 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: $s_z = \pm \frac{1}{2} \hbar$.

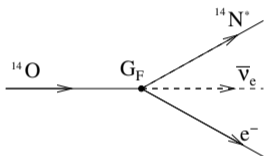
⇒ dlatego mówimy, że elektron ma **“spin połówkowy”** (jest fermionem).

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

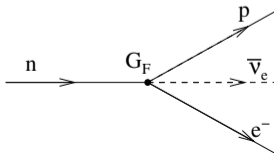
- **prawoskrętny**, jeśli spin jest **zgodny** z kierunkiem pędu (rzut $s_z = +\frac{1}{2} \hbar$),
- **lewoskrętny**, jeśli spin jest **przeciwny** do kierunku pędu (rzut $s_z = -\frac{1}{2} \hbar$).

- 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 β** :



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 jąder kobaltu ustawia się spinem wzdłuż kierunku pola magnetycznego. \Rightarrow Wu zaobserwowała nadwyżkę elektronów emitowanych w kierunku przeciwnym 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 **jąderek 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):

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

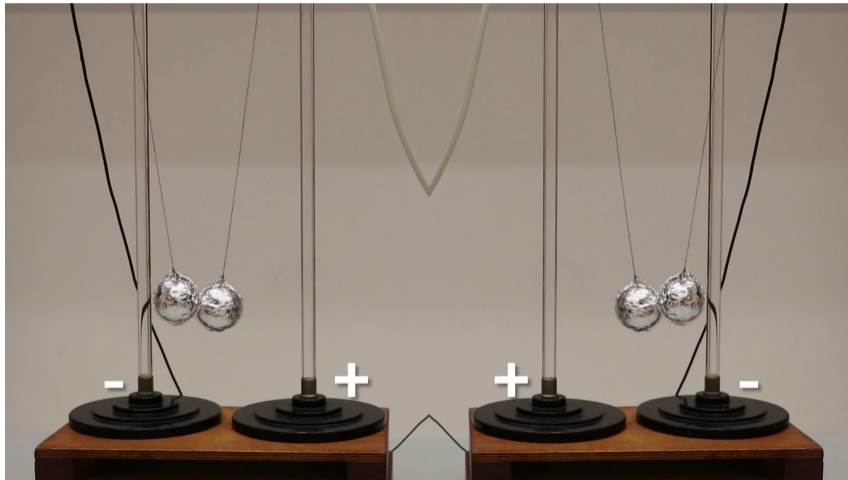
odwrócenie kierunku osi wszystkich współrzędnych przestrzennych.

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

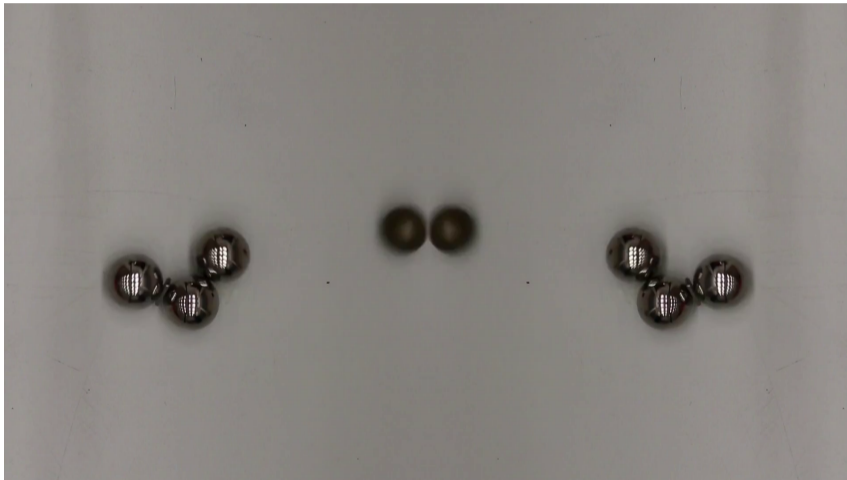
Opis oddziaływań elektromagnetycznych **nie zmienia się** przy odbiciu (**odwrócenie wszystkich współrzędnych przestrzennych**) Gdy obserwujemy w lustrze oddziaływania ładunków elektrycznych to zachodzą one według dokładnie tych samych praw, co w rzeczywistym (nie odbitym) świecie

⇒ 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 π^- : wynik doświadczeń O

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

Sprężenie ładunkowe

Transformacja zamiany cząstki na anty-cząstkę (C).

Rozpad π^- : 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 π^- : 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 π^- : **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 Neutrino
- 4 Teoria Fermiego
- 5 Model Weinberg'a-Salam'a

Nowy model oddziaływań słabych 1968

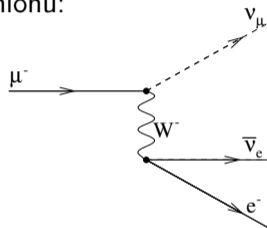
Weinberg i Salam zauważyli, że precyzyjny opis oddziaływań neutrin wymaga założenia, że zachodzą one przez wymianę **bardzo masywnego** bozonu W^\pm

“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

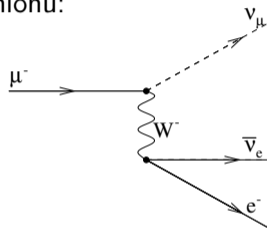
“Słabość” oddziaływania nie wynika ze stałej sprzężenia a z **dużej masy bozonu**:

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

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 m³ freonu (CF₃Br).

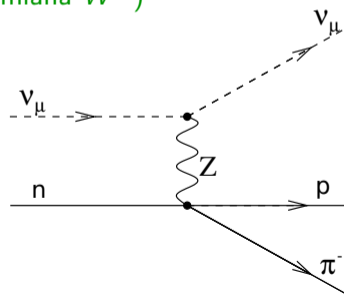
Oprócz reakcji oczekiwanych jako “odwrotne” procesy β (wymiana W^\pm)

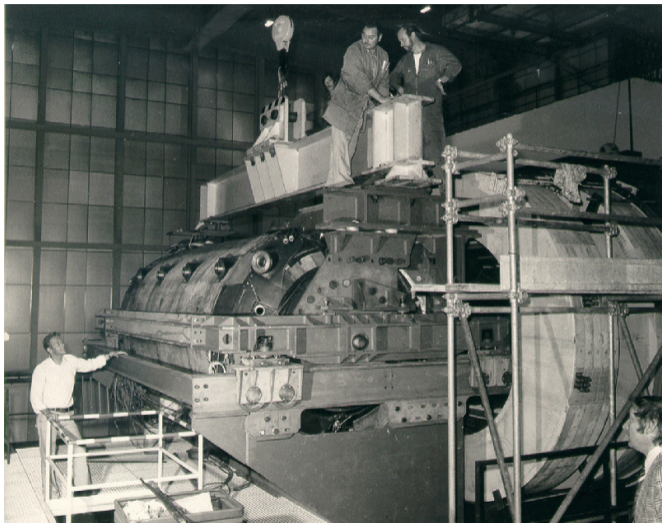


zaobserwowano także procesy bez przekazu ładunku
(tzw. prądy neutralne “Neutral Currents”; 1973):

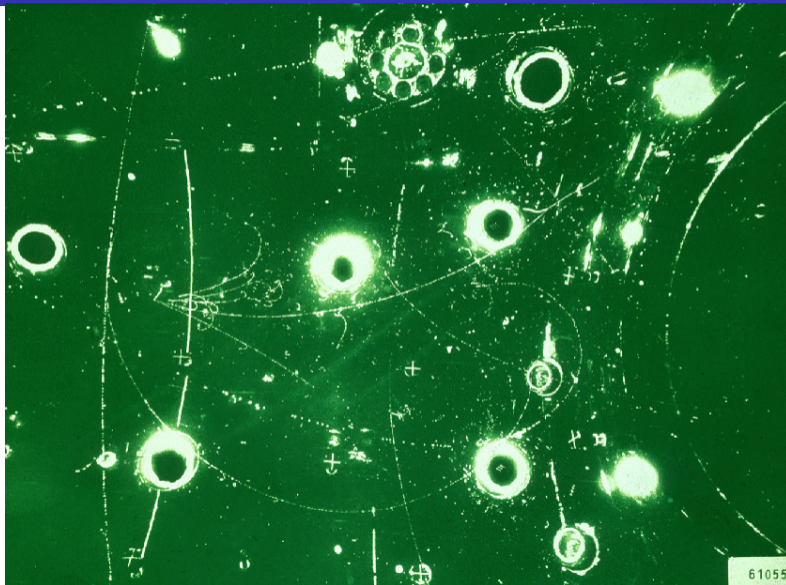


⇒ potwierdzenie przewidywań modelu





Pełen film na stronie CDS Videos



61055

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:

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

Dublety cząstek

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

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

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 “krecji” 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 wymianą 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/absorbpcja 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...

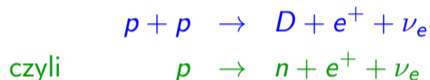
Wprost przeciwnie!

Oddziaływania słabe

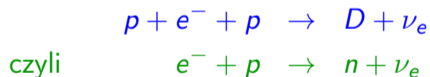
Mogłoby się wydawać, że są jednocześnie najmniej dla nas istotne...

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**”:

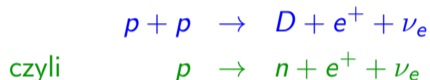


Oddziaływania słabe

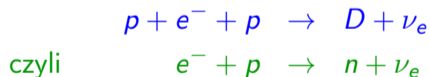
Mogłoby się wydawać, że są jednocześnie najmniej dla nas istotne...

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...