

Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

Oddziaływania słabe

Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki



19 lipca 2021

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

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

Oddziaływanie grawitacyjne Źródło: masa

Choć jest najsłabsze 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.

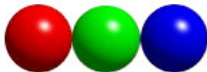
Oddziaływania makroskopowe (tarcie, siły sprężystości itp.) są na poziomie mikroskopowym oddziaływaniami elektromagnetycznymi.

Ładunki dodatnie i ujemne równoważą się

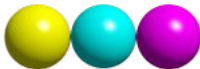
⇒ im większy układ tym mniej widoczne oddziaływania ładunków...

Oddziaływania silne Źródło: ładunek kolorowy

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

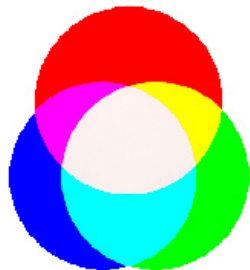


Anty-kwarki mają odpowiednie anty-kolory (kolory "ujemne"): \bar{B} , \bar{R} , \bar{G}



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)
- 2 Liczby kwantowe
- 3 Neutrina
- 4 Teoria Fermiego
- 5 Model Weinberg'a-Salam'a

Obserwacje rozpadów cząstek były (i wciąż są) podstawowym 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 masą produktów rozpadu jest **największa**.

Im większa różnica mas tym szybciej też powinien zachodzić dany rozpad.

Obserwacje rozpadów cząstek były (i wciąż są) podstawowym 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 masą produktów rozpadu jest **największa**.

Im większa różnica mas tym 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 były (i wciąż są) podstawowym 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 masą produktów rozpadu jest **największa**.

Im większa różnica mas tym 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 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 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 nie łamie zasad zachowania ładunku ani energii, np.



Ale rozpad taki nie zachowuje liczby barionowej ($1 \rightarrow 0$)! **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 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 nie łamie zasad zachowania ładunku ani energii, np.



Ale rozpad taki nie zachowuje liczby barionowej ($1 \rightarrow 0$)! **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 **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 **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 obdarzone dziwnością mogą być tylko **produkowane w parach (cząstka + antycząstka)**.

Dziwność

Wśród cząstek odkrywanych w latach 30 i 40 XX w. wyróżniała się klasa cząstek o **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 obdarzone dziwnością 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 w wyniku **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 **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 obdarzone dziwnością 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 w wyniku **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 ...

- 1 Oddziaływania podstawowe (przypomnienie)
- 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](#)

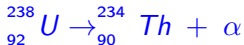
Promieniotwórczość

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**: 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

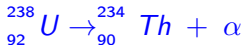
Promieniotwórczość

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

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

E.Rutherford and 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

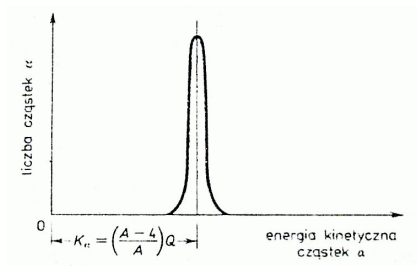


wysokoenergetyczne fotony

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

Rozpady α i γ

Dyskretne widmo energii:

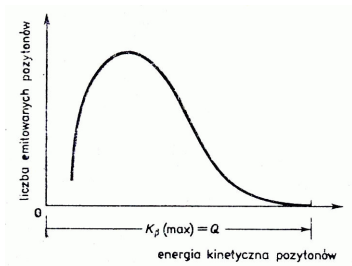


Energia emitowanej cząstki

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

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 neutrina: dodatkowej cząstki unoszącej część energii w rozpadzie β :



Neutrino nie oddziałuje silnie (nie ma koloru), elektromagnetycznie (nie ma ładunku) ani grawitacyjnie (ma zaniedbywalną masę).

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

Hipoteza Pauliego

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



Neutrino nie oddziałuje silnie (nie ma koloru), elektromagnetycznie (nie ma ładunku) ani grawitacyjnie (ma zaniedbywalną masę).

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

Na poziomie nukleonów rozpad β^- odpowiada przemianie:



rozpad ten zachodzi również dla swobodnego neutronu...

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.

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.

Krążący wokół jądra ładunek wytwarza też moment magnetyczny!

Tak jak pętla z drutu w której płynie prąd...

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.

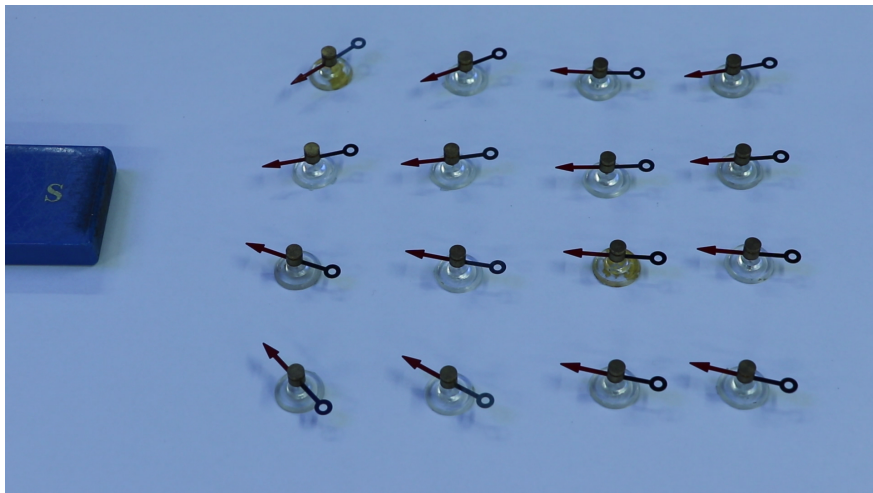
Krążący wokół jądra ładunek wytwarza też moment magnetyczny!
Tak jak pętla z drutu w której płynie prąd...

Jeśli atom/jądro/cząstka ma niezerowy moment magnetyczny to w silnym polu magnetycznym stara się ustawić momentem magnetycznym wzdłuż kierunku pola.

Ośrodek złożony z atomów o niezerowym momencie magnetycznym może ulec polaryzacji w silnym polu magnetycznym

Dla pojedynczej cząstki posiadającej moment magnetyczny, tor jej ruchu może być zakrzywiany w niejednorodnym polu magnetycznym
⇒ w ten sposób możemy badać orientację momentu pędu cząstki

Polaryzacja ośrodka - pokaz



Spinowy moment pędu “spin”

W 1925 roku **Wolfgang Pauli** zapostulował, że dwa elektrony w atomie nie mogą być w 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** być w 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** być w 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 być w 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** być w 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: $s_z = \pm \frac{1}{2} \hbar$.

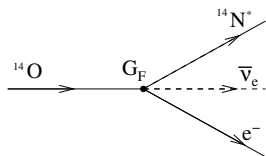
⇒ dlatego mówimy, że elektron ma “**spin połówkowy**” (jest fermionem).

W przypadku poruszającego się elektronu mówimy, że jest

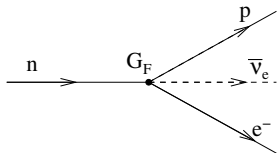
- **prawoskrętny**, jeśli spin jest **zgodny** z kierunkiem pędu (rzut $+\frac{1}{2}\hbar$),
- **lewoskrętny**, jeśli spin jest **przeciwny** do kierunku pędu (rzut $-\frac{1}{2}\hbar$).

- 1 Oddziaływania podstawowe (przypomnienie)
- 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 **jąderek 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 **przeciwnym 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):

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

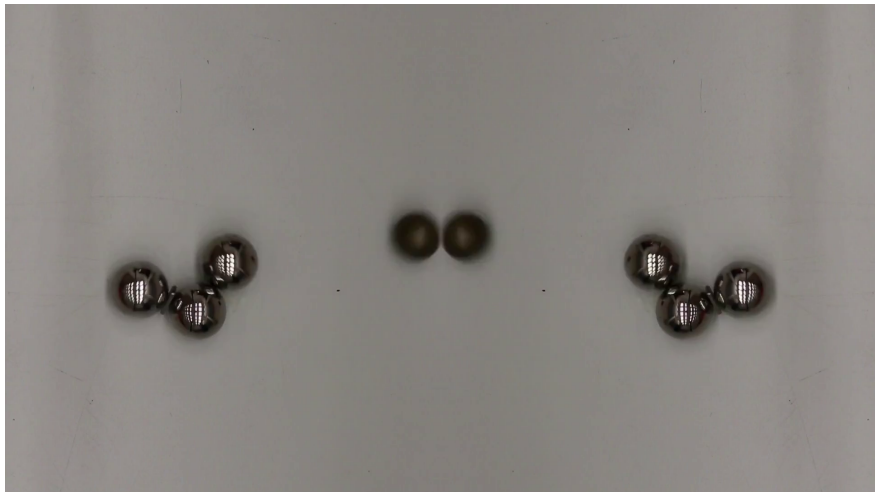
odwrócenie kierunku osi wszystkich współrzędnych przestrzennych.
Jest to równoważne operacji odbicia względem płaszczyzny ("w lustrze").

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



Łamanie parzystości

Spin cząstki nie zmienia się przy odbiciu (!) (tak jak moment pędu), ale zmienia się kierunek jej pędu \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 zmienia się kierunek jej pędu \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 w lustrze...

Łamanie parzystości - pokaz



Sprężenie ładunkowe

Transformacja zamiany cząstki na anty-cząstkę (C).

Rozpad π^- : wynik doświadczeń

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

Sprężenie ładunkowe

Transformacja zamiany cząstki na anty-cząstkę (C).

Rozpad π^- : wynik doświadczeń

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

Po odwróceniu współrzędnych (P):

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

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**

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

Po odwróceniu współrzędnych (P): **Nie obserwujemy !**

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

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

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

Po odwróceniu współrzędnych (P): Nie obserwujemy !

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

Po zamianie cząstek na antycząstki (C): Nie obserwujemy !

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

Złożenie obu transformacji (CP): Obserwujemy !!!

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

Oddziaływania słabe zachowują CP !!!

Podczas gdy zarówno C jak i P jest w oddz. słabych łamane

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

Nowy model oddziaływań słabych 1968

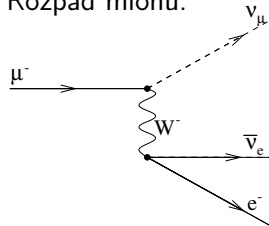
Weinberg i Salam zauważyli, że precyzyjny opis oddziaływań neutrin wymaga założenia, że zachodzą one przez wymianę **bardzo masywnego** bozonu W^\pm

“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

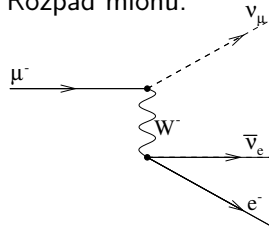
“Słabość” oddziaływania nie wynika ze stałej sprzężenia a z **dużej masy bozonu**:

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

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 **ciężkiego neutralnego bozonu** Z^0 , którego masę oszacowali na $m_Z \sim 90 \text{ GeV} \Rightarrow$ **nowy typ reakcji !!!**

Rozpad mionu:



Potwierdzenie doświadczalne

W roku 1963 uruchomiona została pierwsza wiązka neutrin 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).

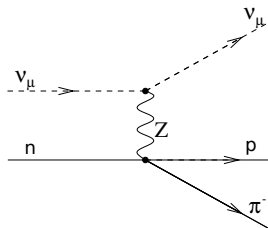
Oprócz reakcji oczekiwanych jako “odwrotne” procesy β (wymiana W^\pm)

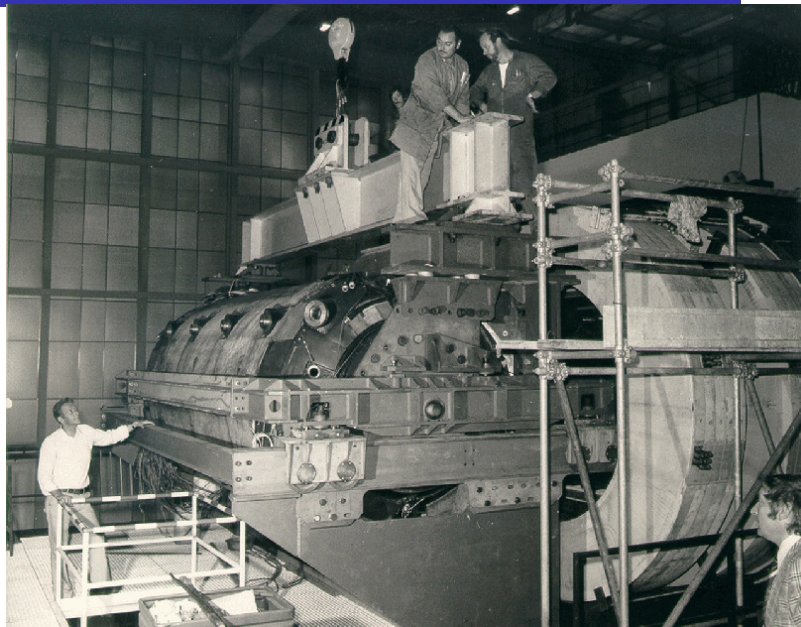


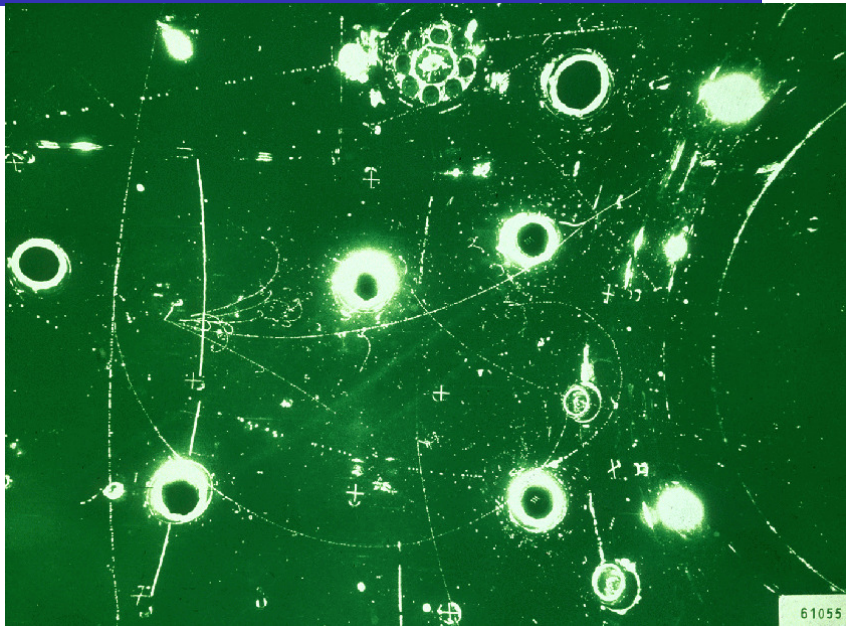
zaobserwowano także procesy bez przekazu ładunku (tzw. prądy neutralne “**Neutral Currents**”; 1973):



⇒ potwierdzenie przewidywań modelu







Duplety cząstek

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

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

Duplety cząstek

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

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

Fermiony tworzące dublet mogą **przechodzić jeden w drugi** poprzez emisję (lub absorbcję) 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 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 **przechodzić jeden w drugi** poprzez emisję (lub absorbcję) 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 **wymiana prądów neutralnych** (Neutral Current - NC).

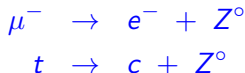
Oddziaływania zachodzące poprzez wymianę W^\pm nazywane są (historycznie) procesami z wymianą prądów naładowanych (Charged Current - CC).

Oddziaływania z wymianą Z^0

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

Emisja lub absorbcja bozonu Z^0 nie zmienia zapachu cząstki!
Podobnie jak emisja/absorbcja fotonu w oddziaływaniach EM.

Nie są możliwe procesy typu:



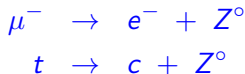
Oddziaływania zachodzące poprzez **wymianę W^\pm** nazywane są (historycznie) procesami z **wymianą prądów naładowanych** (Charged Current - CC).

Oddziaływania z wymianą Z^0

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

Emisja lub absorbcja bozonu Z^0 nie zmienia zapachu cząstki!
Podobnie jak emisja/absorbcja fotonu w oddziaływaniach EM.

Nie są możliwe procesy typu:



Oddziaływaniom słabym, zarówno oddziaływaniom NC jak i CC, podlegają **WSZYSTKIE** cząstki materii (kwarki i leptony oraz ich antycząstki)!
Są to jedyne oddziaływania 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 (za pośrednictwem fal radiowych), będziemy mogli sprawdzić, czy są zbudowani z materii czy z antymaterii...

Oddziaływania słabe

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

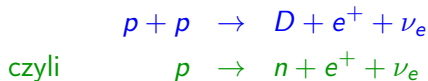
Wprost przeciwnie!

Oddziaływania słabe

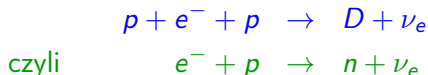
Mogłoby się wydawać, że są jednocześnie najmniej dla nas istotne...

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**”:

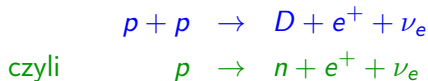


Oddziaływania słabe

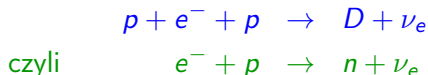
Mogłoby się wydawać, że są jednocześnie najmniej dla nas istotne...

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...