

## Model standardowy

Fizyka cząstek elementarnych jest jedną z gałęzi fizyki, która zajmuje się opisem podstawowych składników materii i oddziaływaniami pomiędzy nimi. Do tej pory znamy 18 cząstek elementarnych, które są opisywane teorią zwaną Modelem Standardowym. Dwanaście z nich to tzw. fermiony, są to cząstki budujące materię. Wśród nich występują kwarki (cząstki nie są obserwowane bezpośrednio, budują one cząstki złożone zwane hadronami, np. proton) oraz leptony (np. elektron). Bozony są cząstkami odpowiedzialnymi za oddziaływania pomiędzy fermionami. Do tej pory znamy cztery rodzaje oddziaływań fundamentalnych:

- oddziaływanie elektromagnetyczne (bozon pośredniczący: foton)
- oddziaływanie słabe (bozony pośredniczące:  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z$ )
- oddziaływanie silne (cząstki pośredniczące: gluony)
- oddziaływanie grawitacyjne (hipotetyczna cząstka pośrednicząca: grawiton)

Oddziaływania elektromagnetyczne, poza oczywistymi zastosowaniami, takimi jak elektronika, elektrotechnika, przesyłanie dźwięku i obrazu, odpowiadają za wiele różnych zjawisk, z którymi się codziennie spotykamy, takimi, jak tarcie czy istnienie różnych stanów skupienia. Oddziaływania słabe rządzą takimi procesami, jak np. rozpad  $\beta$ , np:  $^{11}\text{C} \rightarrow ^{11}\text{B} + e^+ + e^-$ . Oddziaływanie silne wiąże kwarki w cząstki złożone: mezony i bariony (np. proton, neutron), oraz odpowiada za formowanie się jąder atomowych. Model Standardowy unifikuje wszystkie rodzaje oddziaływań, poza oddziaływaniem grawitacyjnym.

### Model Standardowy

| Fermiony  |  | Bozony             |
|---|--|--------------------|
| Kwarki:   |  | foton              |
| <ul style="list-style-type: none"><li>• kwark u</li><li>• kwark c</li><li>• kwark t</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• kwark d</li><li>• kwark s</li><li>• kwark b</li></ul>                                | bozon W<br>bozon Z |
| Leptony:  |  | gluony             |
| <ul style="list-style-type: none"><li>• elektron</li><li>• mion</li><li>• taon</li></ul>      | <ul style="list-style-type: none"><li>• neutrino elektronowe</li><li>• neutrino mionowe</li><li>• neutrino taonowe</li></ul> | bozon Higgsa       |

Trzy lata temu w LHC potwierdzono do wiadczalnie istnienie ostatniej cząstki należącej do Modelu Standardowego - bozonu Higgsa. Rok później Peter Higgs, François Englert i Robert Brout otrzymali nagrodę Nobla za teoretyczne przewidzenie jej istnienia.

## Bozon Higgsa

Według obecnych danych, zarówno foton jak i gluony są cząstkami bezmasowymi. Bozony W i Z posiadają masę (odpowiednio około  $80 \text{ GeV}/c^2$  i  $91 \text{ GeV}/c^2$ , co jest równoważne około  $1,5 \times 10^{-34} \text{ kg}$  i  $1,7 \times 10^{-34} \text{ kg}$ ). Bezpośrednie wprowadzenie ich do teorii jest zabronione przez tzw. symetrię cechowania. W fizyce można nałożyć prawa zachowania w przyrodzie (takie, jak zasada zachowania energii, pędu, momentu pędu) z pewnymi symetriami matematycznymi (symetria względem przesunięcia w czasie i przestrzeni oraz względem obrotów). Symetria cechowania jest związana z zasadą zachowania ładunku. Długość spełnienia lokalnej symetrii cechowania pociąga za sobą bezmasowość wszystkich bozonów pośredniczących. Aby pogodzić symetrię z istnieniem masywnych bozonów W oraz Z, trzeba zrobić dwie rzeczy: zunifikować oddziaływania elektromagnetyczne i słabe oraz dodać do teorii nowe pole skalarne (czyli pole bez spinu), a co za tym idzie - nową cząstkę, bozon Higgsa.

## Fizyka poza Modelem Standardowym?

Model Standardowy zawiera tylko jedną cząstkę skalarną, czyli bozon Higgsa. Jej odkrycie potwierdziło mechanizm nadawania masy cząstkom, jaki znamy w Modelu Standardowym, jednak nie wyklucza to istnienia innego, szerszego modelu, który poza dotychczas znanymi cząstkami, będzie zawierał również inne, dodatkowe cząstki. Z punktu widzenia tematyki projektu, szczególnie interesujące będą cząstki skalarne, takie, jak bozon Higgsa. W ramach badań rozpatrywane różne modele będące rozszerzeniem Modelu Standardowego, w których występują dodatkowe cząstki skalarne, zarówno neutralne (jak bozon Higgsa), jak i pojedynczo i podwójnie naładowane.

Celem badań podjętych w ramach projektu było oszacowanie szans na dostrzeżenie obserwowalnych procesów tych cząstek. Analizowane były konkretne procesy, z udziałem tych niestandardowych skalarów. Rozważano dwa sposoby poszukiwania nowych cząstek.

#### 1. Procesy z możliwym udziałem niestandardowych cząstek skalarnych w trakcie zderzeń w akceleratorach cząstek.

Celem badań było dotychczasowe analizy procesów z udziałem cząstek skalarnych w zderzeniach cząstek przy dużych energiach. W tym roku akcelerator LHC rozpoczął pracę z energią 13 TeV. Jest to znacznie wyższa energia zderzenia, niż ta, która była dostępna do tej pory. Zgodnie z zasadą równowagi masy i energii, im większa energia zderzenia, tym masywniejsze cząstki mogą zostać wyprodukowane. Daje to nowe szanse na obserwację cząstek spoza Modelu Standardowego, również nieznanymi dotychczas cząstek skalarnych. Akcelerator LHC jest akceleratorem hadronowym. Jednak badania były również eksperymentów planowanych w przyszłości. Następnie LHC ma być FCC (Future Circular Collider), również zlokalizowany w ośrodku CERN pod Genewą, w którym osiągnie energię rzędu 100 TeV. Rozważane są różne opcje przyszłych akceleratorów: zderzenia hadron-hadron (FCC-hh), hadron-lepton (FCC-he) oraz lepton-lepton (FCC-ee). Istnieją także niezależne plany stworzenia takich akceleratorów w Chinach (CEPC - Circular Electron-Positron Collider) oraz akceleratorów liniowych  $e^+e^-$  w Japonii (ILC - International Linear Collider) i Szwajcarii (CLIC - Compact Linear Collider). Dlatego również procesy typu hadron-lepton i lepton-lepton były w niniejszym projekcie rozważane.

#### 2. Procesy niskoenergetyczne łamiące rodzinną liczbę leptonów.

Jak dotychczas wszystkie eksperymenty wskazują na to, że liczba leptonowa (czyli całkowita ilość leptonów biorących udział w danym procesie) jest zachowana. Przykładem procesu, który łamałby liczbę leptonów, jest poszukiwany przez fizyków podwójny bezneutrinowy rozpad beta. Jednak obserwacje oscylacji neutrin pokazują, że tzw. rodzinna liczba leptonowa nie musi być zachowana. Następuje konwersja między różnymi zapachami neutrin (elektronowe, mionowe, taonowe). Jak dotychczas nie zaobserwowano reakcji, w której mion rozpada się do elektronu (z równoczesną emisją fotonu), ani konwersji mionu w elektron w obecności jądra atomowego. Planowane eksperymenty, jak Mu2e w Fermilabie, MEG w Szwajcarii czy też COMET (COherent Muon to Electron Transition) w Japonii znacznie zwiększają szanse zaobserwowania tych procesów. W trakcie prac zostanie przeanalizowany również udział cząstek skalarnych w tego typu procesach.