
Szanse na detekcję cząstek długożyjących w Wielkim Zderzaczu Hadronów

Streszczenie

Niniejsza rozprawa doktorska podsumowuje cztery lata badań naukowych nastawionych na określenie szans na detekcję cząstek długożyjących w Wielkim Zderzaczu Hadronów. Rozprawa zawiera wyniki czterech projektów naukowych, które zostały opublikowane w formie osobnych artykułów.

Pierwszy projekt dotyczył nie zbadanej wcześniej możliwości wykorzystania detektora MoEDAL do poszukiwań naładowanych elektrycznie cząstek długożyjących. MoEDAL to mały pasywny detektor pozbawiony tła od Modelu Standardowego, który jest zlokalizowany w pobliżu IP8 przy Wielkim Zderzaczu Hadronów. MoEDAL jest w stanie wykryć cząstkę o ładunku elektrycznym Q , jeżeli jej czas życia jest na tyle długi, że jest w stanie przebyć odległość rzędu $\mathcal{O}(1 \text{ m})$, oraz jej szybkość β spełnia warunek $\beta \lesssim 0.15 \cdot |Q/e|$. Dzięki temu poszukiwania nowej fizyki w doświadczeniu MoEDAL uzupełniają badania w eksperymentach ATLAS i CMS, które są czułe jedynie na cząstki o szybkościach $\beta \gtrsim 0.5$. W celu zademonstrowania możliwości detektora MoEDAL, rozważono pewien szczególnie model supersymetryczny, w którym dwa gluina ($\tilde{g}$) są produkowane, każde rozpada się natychmiastowo do 2 dżetów i długożyjącego neutralina ($\tilde{\chi}_1^0$), które następnie rozpada się na długożyjący staon i wirtualny taon. Schematycznie: $pp \rightarrow \tilde{g}\tilde{g} \rightarrow (\tilde{\chi}_1^0 jj) (\tilde{\chi}_1^0 jj) \rightarrow (\tilde{\tau}_1 \tau^* jj) (\tilde{\tau}_1 \tau^* jj)$. Dla rozważanego modelu wykazano, iż MoEDAL w trakcie Run 3 ($L = 30 \text{ fb}^{-1}$) jest w stanie zbadać wartości masy gluina $m_{\tilde{g}}$ i czasu życia neutralina ($\tau_{\tilde{\chi}_1^0}$), które są poza zasięgiem eksperymentu ATLAS. Ten interesujący wynik zainspirował całą serię badań.

W drugim projekcie rozważono różnego rodzaju długożyjące cząstki supersymetryczne: gluino $\tilde{g}$, stop $\tilde{t}$, 5 pozostałych skwarków $\tilde{q} = (\tilde{u}, \tilde{d}, \tilde{c}, \tilde{s}, \tilde{b})$, naładowane wino $\tilde{W}$ i higgsino $\tilde{h}$, oraz naładowane elektrycznie sleptony $\tilde{l}$. Dodatkowo zbadano podwójnie naładowane ($Q = \pm 2e$) cząstki skalarnie i fermiony o spinie $1/2$, transformujące się jak singlet lub triplet względem grupy cechowania $SU(2)_L$. Za wyjątkiem tripletu fermionów, MoEDAL przejawia niższą czułość na nowe cząstki niż ATLAS i CMS. Główną przyczyną jest mniejsza ilość danych zbieranych przez MoEDAL. Jednakże wyniki dostarczone przez doświadczenie MoEDAL są komplementarne względem rezultatu eksperymentów ATLAS i CMS, ze względu na całkowicie odmienną budowę detektora i nieskorelowane niepewności systematyczne.

W trzecim projekcie zbadano radiacyjny model generacji mas nautrin, który przewiduje istnienie naładowanych elektrycznie cząstek długożyjących. Rozważono dwie wersje modelu, w niekolorowej wersji wszystkie nowe cząstki są singletami względem grupy cechowania $SU(3)_C$, natomiast w wersji kolorowej zastępują je (anty)triplety. Długożyjące cząstki skalarnie w niekolorowej wersji modelu to: $S^{\pm 2}$, $S^{\pm 3}$, oraz $S^{\pm 4}$, z ładunkami $\pm 2e$, $\pm 3e$, oraz $\pm 4e$, odpowiednio. Model przewiduje również istnienie potrójnie naładowanych fermionów, $F^{\pm 3}$, jednakże cechują się one krótkim czasem życia. Kolorowa wersja modelu również zawiera długożyjące cząstki skalarnie: $S^{\pm 4/3}$, $S^{\pm 7/3}$, oraz $S^{\pm 10/3}$, z ładunkami $\pm 4/3e$, $\pm 7/3e$, oraz $\pm 10/3e$, odpowiednio. W projekcie zbadano szanse na detekcję cząstek długożyjących w trakcie Run 3 i HL-LHC w eksperymencie MoEDAL, które następnie porównano z dostępnymi wynikami z doświadczeń ATLAS i CMS. W pierwszej części analizy określono czułość detektora MoEDAL na wielokrotnie naładowane cząstki długożyjące w sposób niezależny od przyjętego modelu teoretycznego, tzn. traktując ich masy i czas życia jako wolne parametry. Odkryto, iż dla większości zakresu wartości parametrów, które MoEDAL może przetestować w trakcie Run 3, istnienie rozważanych cząstek zostało wykluczone przez duże eksperymenty przy LHC. Z drugiej strony, dla HL-LHC MoEDAL ma szansę odkryć wielokrotnie naładowane cząstki długożyjące, jednakże spodziewana

czułość doświadczenia ATLAS jest większa. Druga część analizy była poświęcona możliwości zbadania parametrów konkretnego modelu generacji mas neutrin. W szczególności zbadano znaczenie bezwymiarowej stałej sprzężenia λ_5 , odpowiedzialnej za złamanie zasady zachowania liczby leptonowej. Odkryto, iż dla wartości $\lambda_5 \sim 10^{-5}$, która z grubsza odpowiada najdłuższemu czasowi życia $S^{\pm 4}$ ($\tilde{S}^{10/3}$), MoEDAL osiąga największą czułość.

Celem czwartego projektu było przedstawienie wyczerpującego podsumowania perspektyw na detekcję cząstek długożyjących w Wielkim Zderzaczu Hadronów. Zbadano cztery rodzaje cząstek: skalary i fermiony o spinie $1/2$ transformujące się względem grupy cechowania $SU(3)_C$ jako singlety lub triplety. Założono, iż wszystkie cząstki są singletami względem $SU(2)_L$ oraz mają całkowite ładunki elektryczne, Q , z zakresu $1e \leq |Q| \leq 8e$. Zbadano trzy różne metody poszukiwań nowej fizyki: (i) poszukiwania stabilnych cząstek wysokojonizujących w eksperymentach ATLAS i CMS, (ii) poszukiwania długożyjących cząstek naładowanych w doświadczeniu MoEDAL, (iii) poszukiwania rezonansów rozpadających się na dwa fotony przez ATLASa i CMSa, które zastosowano dla układów związanych typu pozytronium/kwarkonium stworzonych przez nowe cząstki. Czułość doświadczenia MoEDAL określono zgodnie z procedurą wypracowaną w trakcie poprzednich trzech projektów, tzn. traktując masy i czasy życia nowych cząstek jako wolne parametry i estymując liczbę rejestrowanych przypadków w trakcie przyszłych faz zbierania danych: Run 3 ($L = 30 \text{ fb}^{-1}$) i HL-LHC ($L = 300 \text{ fb}^{-1}$). W przypadku doświadczeń ATLAS i CMS, najnowsze analizy zostały zreinterpretowane w celu uzyskania górnych limitów na przekroje czynne, które zostały porównane z wynikami obliczeń teoretycznych. Uzyskano również spodziewane limity dla Run 3 ($L = 300 \text{ fb}^{-1}$) i HL-LHC ($L = 3 \text{ ab}^{-1}$).

W trakcie czwartego projektu odkryto, iż poszukiwania cząstek wysokojonizujących są najlepszą metodą na odkrycie cząstek o niskich ładunkach, $|Q| \lesssim (3-4)e$, gdzie dokładna wartość górnej granicy zależy od rodzaju cząstki. Z kolei dla większych ładunków, $|Q| \gtrsim (4-5)e$, poszukiwania rezonansów rozpadających się na dwa fotony są najczulsze. Czułość eksperymentu MoEDAL w trakcie trzeciej tury zbierania danych w LHC (Run 3) okazuje się być pomiędzy czułością wymienionych dwóch typów analiz. Jednakże dla średnich wartości ładunków elektrycznych, $3e \lesssim |Q| \lesssim 7e$, HL-LHC MoEDAL wykazuje się lepszą czułością niż duże eksperymenty takie jak ATLAS i CMS. Jest to spowodowane pomijalnie małym tłem od procesów Modelu Standardowego w MoEDALu.

Czwarty projekt rozwinął również ważną dyskusję na temat znaczenia procesów z fotonami w stanie początkowym na produkcję i właściwości cząstek wielokrotnie naładowanych w Wielkim Zderzaczu Hadronów. Wykazano, iż dla cząstek o ładunku $|Q| \gtrsim 4e$ rprzekrój czynny dla fuzji dwóch fotonów (i fuzji fotonu z gluonem w przypadku cząstek kolorowych) jest porównywalny z przekrojem czynnym dla procesu typu Drell-Yan. Jest to istotne spostrzeżenie, gdyż jak dotąd doświadczenia ATLAS i CMS nie brały tego efektu pod uwagę, co skutkowało niedoszacowaniem limitów na masy nowych cząstek.