



dr hab. Kamila Kowalska, prof. NCBJ
Narodowe Centrum Badań Jądrowych
ul. Pasteura 7
02-093 Warszawa

Warszawa 10.05.2023

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Rafała Masełka pt. "Prospects for detecting long-lived particles at the Large Hadron Collider"

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska, wykonana przez mgr. Rafała Masełka na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego pod kierunkiem dr. hab. Kazukiego Sakurai, opiera się na czterech artykułach naukowych opublikowanych w wiodących czasopismach w dziedzinie fizyki cząstek elementarnych. Tematyka pracy związana jest z egzotycznymi cząstkami długożyjącymi (LLP) oraz możliwością ich detekcji w Wielkim Zderzaczu Hadronów (LHC). Cząstki takie obecne są w wielu scenariuszach fizyki poza Modelem Standardowym (BSM). Ze względu na makroskopowe czasy życia, przed rozpadem mogą one przebyć w detektorze odległości rzędu nawet kilku metrów. Należy się zatem spodziewać, że ich sygnatury eksperymentalne będą różniły się od sygnatur typowych dla cząstek krótkożyjących, rozpadających się niemal natychmiast w punkcie zderzenia wiązek protonów. Poszukiwanie LLP jest obecnie jedną z głównych aktywności grup eksperymentalnych w LHC, wyniki przedstawione w rozprawie są więc bardzo aktualne i wpisują się w główny nurt badań fizyki cząstek elementarnych.

Praca doktorska mgr. Masełka napisana jest w języku angielskim, liczy 134 strony i składa się z pięciu rozdziałów oraz obszernej bibliografii.

Pierwsze trzy rozdziały stanowią wprowadzenie do tematyki rozprawy i dostarczają czytelnikom zestaw informacji niezbędnych do zrozumienia pracy oraz umieszczenia prezentowanych wyników w odpowiednim kontekście. Rozdział pierwszy ("*Particle Physics*") to krótkie wprowadzenie do fizyki cząstek elementarnych. Autor rozpoczyna je omówieniem historycznej ewolucji naszego rozumienia podstawowych składników materii, wychodząc od antycznej koncepcji atomów, poprzez odkrycie teorii kwantowej, by wreszcie wprowadzić Model

Standardowy (MS) fizyki cząstek elementarnych. Przedstawia też pokrótce argumenty przemawiające za tym, że MS nie może być uznany za teorię ostateczną, wyjaśnia też, w jaki sposób możemy poszukiwać fizyki BSM w eksperymentach akceleratorowych, w szczególności w LHC. Rozdział drugi (*“Beyond the Standard Model Physics”*) poświęcony jest omówieniu konkretnych scenariuszy fizyki poza MS, które przewidują istnienie cząstek LLP i które zostały przeanalizowane w publikacjach składających się na rozprawę. Są to supersymetria oraz dwa modele mas neutrin: model oparty na mechanizmie huśtawki oraz model generowania mas poprzez poprawki pętlowe. W rozdziale trzecim (*“Searching for long-lived BSM particles”*) Autor opisuje budowę trzech detektorów zainstalowanych w LHC: detektorów ogólnego zastosowania ATLAS i CMS oraz pasywnego detektora MoEDAL. Wyjaśnia też, w jaki sposób mogą one zostać wykorzystane do poszukiwania cząstek LLP.

Rozdział czwarty (*“Research results”*) zawiera opis wyników uzyskanych przez Autora w trakcie studiów doktoranckich. Każda publikacja omówiona jest w osobnym podrozdziale. Pierwszy z nich (*“Prospects for discovering long-lived particles with MoEDAL”*) dyskutuje możliwość wykorzystania detektora MoEDAL do detekcji cząstek LLP o niezerowym ładunku elektrycznym. Jest to zupełnie nowa idea, zaprezentowana na przykładzie modelu supersymetrycznego, w którym rolę cząstki długożyjącej pełni staon (supersymetryczny partner skalarny fermionu tau). W pracy wykazano, że detektor pasywny, jakim jest MoEDAL, może wykryć taką cząstkę, jeśli jej prędkość jest relatywnie mała ($\beta = v/c \lesssim 0.15|Q/e|$) oraz jeśli pokonuje ona w detektorze odległości rzędu metra. Rezultaty analizy przedstawiono dla różnych konfiguracji paneli NTD (Nuclear Track Detector), wskazując na konfigurację idealną (wszystkie panele NTD umieszczone sferycznie wokół punktu zderzenia), która prowadzi do najsilniejszych ograniczeń eksperymentalnych na masy cząstek LLP. Warto podkreślić, że wynik ten skłonił kolaborację MoEDAL do zmiany planowanej geometrii detektora i dostosowania jej do zaproponowanej w pracy mgr. Maselka konfiguracji idealnej.

Druga publikacja omówiona w rozdziale wyników (*“Prospects of searches for long-lived charged particles with MoEDAL”*) to kontynuacja pierwszego projektu, czyli uogólnienie przeprowadzonej w nim analizy na inne supersymetryczne cząstki LLP, a także na egzotyczne skalary i fermiony o ładunku $Q = \pm 2e$. Czulość detektora MoEDAL porównano tutaj z czulością detektorów ogólnego zastosowania ATLAS i CMS, stwierdzając, że jest ona nieco niższa, głównie z powodu mniejszej ilości danych zbieranych przez MoEDAL. Autorzy wskazali jednak, że ze względu na zupełnie odmienną budowę i działanie detektora pasywnego może on testować te części przestrzeni parametrów modeli BSM, które są niedostępne dla ATLAS-a i CMS-a. A zatem wyniki uzyskane przez te dwa rodzaje detektorów uzupełniają się wzajemnie.

W podrozdziale trzecim (*“Detecting long-lived multi-charged particles in neutrino mass models with MoEDAL”*) metodologię i narzędzia numeryczne opracowane w trakcie dwóch poprzednich projektów wykorzystano do analizy radiacyjnego modelu generacji mas neutrin. Model ten przewiduje istnienie skalarnych cząstek LLP o ładunkach $Q = \pm 2, 3, 4e$ (w wersji niekolorowej) lub $Q = \pm 4/3, 7/3, 10/3e$ (w wersji kolorowej). Głównym wynikiem było nałożenie ograniczeń eksperymentalnych na parametry modelu, w szczególności na skalarną stałą sprzężenia między dubletami bozonu Higgsa a egzotycznymi skalarami oraz na masę

tych skalarów, przy czym MoEDAL osiąga największą czułość dla sprzężeń rzędu 10^{-5} . Ważnym rezultatem pracy jest też pokazanie, że fuzja fotonów to istotny kanał produkcji cząstek wielokrotnie naładowanych, którego analizy eksperymentalne nie brały do tej pory pod uwagę. Mogło to prowadzić do niedoszacowania przekrojów czynnych, a co za tym idzie do zbyt słabych ograniczeń na masy wielokrotnie naładowanych cząstek BSM. Z punktu widzenia detektora MoEDAL istotne jest też to, że cząstki wyprodukowane przez fuzję fotonów mają na ogół małe prędkości, co wpływa na zwiększenie jego czułości.

Ostatni podrozdział sekcji wyników ("*Discovery prospects for long-lived multiply charged particles at the LHC*") to systematyczne podsumowanie obecnego statusu poszukiwań cząstek LLP w LHC oraz perspektyw ich detekcji w przyszłości. W celu uzyskania jak najbardziej ogólnych i wyczerpujących rezultatów przeanalizowano skalary i fermiony o ładunkach elektrycznych w zakresie $\pm 1e$ do $\pm 8e$, transformujące się jako singlety lub tryplety względem grupy cechowania symetrii kolorowej $SU(3)$. Podobnie jak w poprzednich projektach, porównano szansę odkrycia nowych cząstek w detektorach ogólnego zastosowania oraz w pasywnym detektorze MoEDAL. W przypadku ATLAS-a i CMS-a zbadano dodatkowo możliwość tworzenia przez nowe cząstki stanów związanych, które następnie rozpadają się na dwa fotony. Jednym z głównych rezultatów pracy było wykazanie, że ten ostatni proces daje największe szanse na odkrycie cząstek LLP o ładunku $|Q| \gtrsim 4e$. Pokazano również, że w przyszłym eksperymencie HI-LHC czułość detektora MoEDAL może przewyższyć czułość detektorów ogólnego zastosowania dla cząstek o ładunku $3e \lesssim |Q| \lesssim 7e$. Rozwinięto też dyskusję znaczenia fuzji fotonów przy produkcji cząstek naładowanych, która staje się kluczowa dla cząstek o ładunkach większych niż $4e$. Warto zauważyć, że pod wpływem tych rezultatów kolaboracja ATLAS zaczęła uwzględniać ten mechanizm produkcji w swoich analizach.

Piąty i ostatni rozdział rozprawy ("*Summary*") stanowi podsumowanie zaprezentowanych wcześniej wyników. Podsumowanie jest obszerne i szczegółowe, trochę brakuje mi tu jednak szerszego spojrzenia na znaczenie zrealizowanych projektów dla rozwoju dziedziny oraz zarysowania przyszłych kierunków badań.

Zaprezentowana rozprawa doktorska porusza temat ciekawy i aktualny. Prezentacja wyników jest profesjonalna. Autor dobrze motywuje podejmowane tematy badawcze, a następnie prezentuje wyniki w sposób jasny i klarowny. Tu i ówdzie wkradły się literówki i drobne błędy gramatyczne. Gdzieś tam rzucają się też w oczy niedociągnięcia edytorskie, w szczególności podpisy niektórych rysunków wykonane są inną czcionką niż pozostałe (jest to widoczne, na przykład, przy porównaniu Fig.4.11 i Fig.4.12). Te drobne mankamenty nie wpływają jednak w żaden sposób na pozytywny odbiór rozprawy.

Pewnym mankamentem pracy jest natomiast jej dość wąska tematyka. Trudno oprzeć się wrażeniu, że od strony koncepcyjnej najwięcej pracy włożono w pierwszy projekt. Opracowana w jego trakcie metodologia oraz narzędzia numeryczne zostały potem wykorzystane w kolejnych analizach, które jednak miały charakter nieco odtwórczy. Należy jednak podkreślić, że pojawiło się w nich też kilka elementów nowatorskich, przede wszystkim zwrócenie uwagi na konieczność uwzględnienia fuzji fotonów przy produkcji cząstek o dużym ładunku elek-

trycznym oraz wskazanie preferowanej geometrii detektora MoEDAL, która może znacząco zwiększyć jego czułość. Wnioski przedstawione w publikacjach zostały uwzględnione przez kolaboracje eksperymentalne.

Na zakończenie warto też dodać, że mgr Masełek jest współautorem w sumie siedmiu prac naukowych opublikowanych w wiodących czasopismach w dziedzinie cząstek elementarnych. To znaczący dorobek dla naukowca na tym etapie kariery.

Podsumowując, mogę stwierdzić, że rozprawa “Prospects for detecting long-lived particles at the Large Hadron Collider” **spełnia warunki stawiane pracom doktorskim** przez ustawę o stopniach naukowych i wnoszę o dopuszczenie mgr. Rafała Masełka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Kamila Kowalska