

Katowice, 16 maj 2023 r.

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

Na pracę doktorską magistra Rafała Masełka liczącą 134 strony składa się pięć rozdziałów oraz odnośniki do 254 prac naukowych. Została ona napisana na podstawie czterech artykułów opublikowanych w latach 2020-2022 w czasopiśmie European Physical Journal C.

W dwóch pierwszych rozdziałach rozprawy w zwięzły sposób opisano podstawy teorii cząstek elementarnych zwanej Modelem Standardowym (SM) oraz przedstawiono argumenty przemawiające za potrzebą dalszego rozwinięcia tej teorii. Wśród problemów SM wymieniono tzw. problem hierarchii mas i skal cząstek, mnogość swobodnych parametrów modelu, brak wyjaśnienia problemu ciemnej materii, anomalie w pomiarze czynnika $g-2$ mionu, niektóre anomalie w pomiarach uniwersalności sprzężeń leptonów, rozbieżność w pomiarze masy bozonu W zderzeniach pp (Fermilab) w porównaniu z globalnymi fitami (LEP, LHC, ...). Opisano również parametry akceleratora LHC, który jest podstawą dalszej części badań w rozprawie doktorskiej. Scharakteryzowano główne cechy niestandardowych modeli opartych o ideę supersymetrii i rodzaje supersymetrycznych cząstek długożyjących LLP (ang. long-lived particles). W ramach modeli mass neutrino skupiono się na modelu generacji mas neutrino w oparciu o mechanizm huśtawki oraz specyficznej wersji modelu zaproponowanego w pracy Arbelaeza et al. (referencja [118]) w którym zawarte są niestandardowe cząstki skalarnie o zwielokrotnionych ładunkach elektrycznych elektronu ($\pm\{2, 3, 4\}e$, $\pm\{4/3, 7/3, 10/3\}e$).

Trzeci rozdział rozprawy poświęcony jest opisowi detektorów kolaboracji ATLAS oraz CMS zderzacza LHC. Zespoły te badają możliwość wykrycia cząstek LLP w mionowym spektrometrze po ich wcześniejszym, bezśladowym przejściu przez środkową, śledzącą część detektora (ang. tracker) oraz kalorymetr w detektorze ATLAS czy też CMS. Dlatego też zdefiniowano związane z tymi badaniami pojęcia znikających (ang. disappearing) oraz łamanych (ang. kink) ścieżek (ang. tracks) cząstek, przesuniętych wielociężkowych wierzchołków, bezśladowych oraz pojawiających się dżetów, niepunktowych fotonów. Główne wyniki rozprawy dotyczą możliwości wykrycia wielokrotnie naładowanych cząstek w detektorze MoEDAL i porównanie jego potencjału z detektorami ATLAS i CMS.

MoEDAL to detektor w pierwotnym zamyśle zbudowany w celu wykrycia monopoli i egzotycznych cząstek w LHC (stąd jego nazwa, pochodząca od frazy "Monopole and Exotics Detector at the LHC"). W porównaniu z pozostałymi detektorami LHC jest to mały eksperyment zlokalizowany około 2 metry od punktu zderzeń w IP8, na zewnątrz detektora VELO (Vertex Locator) przy stanowisku LHCb. Ponieważ MoEDAL miał służyć przede wszystkim do poszukiwania monopoli magnetycznych, jego konstrukcja opiera się na niekonwencjonalnych metodach detekcji pasywnej, co czyni go całkowicie różnym od eksperymentów ATLAS i CMS. Cztery główne podsystemy systemu MoEDAL to: Nuclear Track Detectors (NTD), Magnetic Monopole Trackers (MMT), TimePix (TPX) oraz część MoEDAL do badania cząstek penetrujących (MAPP). W rozprawie opisano te cztery poddetektory. Różnice pomiędzy detektorem MoEDAL oraz detektorami LHC w kontekście badań opisanych w rozprawie można podsumować w następujący sposób: MoEDAL może wykryć jonizujące powolne cząstki ($|Q| \geq 5\beta$) o długości rozpadu powyżej 2 m, akumulując dane w czasie. W nierówności powyższej Q to ładunek detektowanej cząstki a β określa szybkość cząstek, $\beta > 0.5$ wyznacza granicę dla szybkich cząstek w LHC. Ze względu na odległość od punktu zderzeń IP8, wadą MoEDAL jest jego mała świetność. Najważniejszą cechą metody pasywnej detekcji cząstek w przypadku MoEDAL jest małe tło na standardowe procesy i w praktyce jakakolwiek obserwacja charakterystycznego sygnału, w którym spełniona jest relacja $|Q| \geq 5\beta$ pochodziłaby od efektów wychodzących poza SM. Rozdział trzeci kończy opis symulacji detektora, biorąc pod uwagę jego parametry fizyczne wraz z zastosowanym oprogramowaniem. Z dokonanych symulacji wyciągnięto wnioski, iż aby wykryć wolno poruszającą się cząstkę, powinna ona uderzyć w panel NTD jądrowego detektora śladów praktycznie pod kątem prostym, co pozwala uściślić warunek na detekcję wielokrotnie naładowanych cząstek do relacji $\beta \leq 0.15|Q|$.

Główne wyniki rozprawy zawarte są w rozdziale czwartym i zostaną omówione poniżej. Ostatni rozdział to podsumowanie uzyskanych wyników.

Rozdział czwarty: wyniki badań.

Ogólnym celem badań była analiza możliwości detekcji masywnych cząstek o długim czasie życia w LHC oraz detektorze MoEDAL, w szczególności gdy cząstki te mają duże ładunki elektryczne (do 8-krotnej wartości ładunku elektronu). Badania takie dla eksperymentu LHC są prowadzone od dawna, nowością są pierwsze prognozy detekcji tych cząstek w eksperymencie MoEDAL.

W pierwszej pracy [186] skupiono się na badaniu długożyjących, supersymetrycznych cząstek z produkcją pary gluino w zderzeniach pp, tworząc łańcuch rozpadów do dżetów i długożyciowego neutralina, rozpadającego się do cząstek tau i stau. Z obliczeń wynika, że MoEDAL może wykryć te cząstki dla mas i czasów życia poza zasięgiem eksperymentów ATLAS, CMS. Jednym z ważniejszych wyników tej pracy jest zaproponowanie zmiany konfiguracji detektora MoEDAL w celu lepszego monitorowania obszaru oddziaływania oraz efektywniejszej akwizycji danych w trakcie pracy LHC w okresie "Run 3". Postulat

ten został urzeczywistniony przez kolaborację MoEDAL.

W drugiej pracy [187] kontynuowano badania modelu supersymetrycznego z długożyjącymi cząstkami (gluina, cząstki stop, skwarki, chargina, sleptony). Przyjęto podejście, w którym masy i czasy życia cząstek supersymetrycznych są swobodnymi, niezależnymi od modeli parametrami. W pracy wzięto pod uwagę najnowsze ograniczenia otrzymane przez kolaboracje ATLAS i CMS oraz uzyskano przewidywania dla obecnie prowadzonych w LHC badań dla okresu "Run 3". Dla cząstek supersymetrycznych posiadających liczby kwantowe koloru MoEDAL nie jest tak czuły na odkrycie omawianych cząstek jak ATLAS czy też CMS. W rozprawie zwrócono jednak uwagę na fakt, że ograniczenia uzyskane przez MoEDAL są cenne ze względu na różne techniki eksperymentalne, które mogą być wrażliwe na niektóre obszary przestrzeni modelu pomijane przez ATLAS i CMS, m.in. scenariusze z małymi sprzężeniami łamiącymi parzystość R , w których nie występuje brak pędów poprzecznych rozpatrywanych przy selekcji danych ATLAS/CMS. W pracy tej zbadano również niekolorowe podwójnie naładowane cząstki skalarnie oraz fermiony występujące w modelach mas neutrin typu seesaw I i II. W tym przypadku wyniki są konkurencyjne w stosunku do CMS dla przypadku fermionów pochodzących z trypletu grupy $SU(2)_L$.

W trzeciej pracy [188] zbadano możliwe sygnały od cząstek LLP w eksperymencie MoEDAL w szczególnym modelu gdzie neutrina nabywają masę na poziomie jednej pętli przy udziale cząstek skalarnych LLP o ładunkach $\pm\{2, 3, 4\}e$. Cząstki te nie niosą koloru, zmodyfikowano jednak ten model w kierunku badania również kolorowych cząstek skalarnych o ładunkach $\pm\{4/3, 7/3, 10/3\}e$. W pracy tej pokazano, że oprócz produkcji typu Drell-Yan, ważne są procesy fuzji fotonowej, szczególnie dla cząstek o dużym ładunku elektrycznym (Figs. 4.14, 4.15). W tabeli 4.3 przedstawiono wyniki dla niekolorowej wersji modelu z cząstkami $S^{\pm 2}, S^{\pm 3}, S^{\pm 4}, F^{\pm 3}$. I tak, nie ma wielkiej nadziei na obserwację cząstek przewidywanych przez badany model w trakcie "Run 3" w MoEDAL, ponieważ większość dostępnych mas jest w zakresie już wykluczonym przez ATLAS, z wyjątkiem $S^{\pm 4}$, dla którego istnieje małe okno rzędu ~ 40 GeV. W przypadku HL-LHC, MoEDAL może sondować większe masy, które obecnie nie są ograniczone. W tabeli 4.4 przedstawiono wyniki dla kolorowej wersji modelu z cząstkami $S^{\pm 4/3}, S^{\pm 7/3}, S^{\pm 10/3}$. Podobnie jak w przypadku modelu z cząstkami bez koloru, większość przestrzeni parametrów dostępnej dla "Run 3" w MoEDAL została już wykluczona dzięki poszukiwaniu masywnych, stabilnych cząstek. Dla fazy HL-LHC MoEDAL można będzie testować wielokrotnie naładowane skalarnie cząstki BSM o masach poza zasięgiem wcześniejszych faz działania LHC. Oprócz niezależnych od modelu wyników, zbadano również podprzestrzeń parametrów modelu spełniających aktualne ograniczenia dotyczące mas neutrin i kątów mieszania. Dla ważnego parametru $\lambda \sim 10^{-5}$ modelu mas neutrin odpowiadającemu najdłuższemu czasowi życia cząstek $S^{\pm 4}, \tilde{S}^{\pm 10/3}$, czułość MoEDAL jest największa. Maksymalny zakres mas trypletów skalarnych w MoEDAL odpowiada w przybliżeniu zakresom z niezależnej od modelu części analiz.

W ostatniej pracy [189] zbadano możliwość wykrycia długożyciowych cząstek o dużych

ładunkach elektrycznych z zakresu $1 e \leq |Q| \leq 8 e$ w LHC. Porównano czułość "Run 3" i HL-LHC dla trzech różnych typów poszukiwań: (i) poszukiwania anomalii w części detektora z dużym gradientem energii dE/dx w eksperymentach ATLAS i CMS, (ii) poszukiwania naładowanych LLP w MoEDAL, (iii) rezonansu dwufotonowego w eksperymencie ATLAS i CMS. Rozróżniono przypadki tzw. produkcji otwartej gdzie długożyciowe cząstki BSM mogą być wytwarzane parami przelatując przez detektor bez rozpadów oraz produkcję zamkniętą, gdzie produkowane parami cząstki BSM mogą tworzyć metastabilny stan związany. Rozpady dwufotonowe są przykładem takiego metastabilnego stanu $B, pp \rightarrow B \rightarrow \gamma\gamma$. Udowodniono znaczenie fuzji fotonów w trybie produkcji otwartej dla wysoko naładowanych cząstek i dużych wartości dE/dx , która to opcja nie była rozpatrywana przez ATLAS i CMS. Pokazano również, że czułość na detekcję rezonansu dwufotonowego w trybie produkcji zamkniętej szybko rośnie wraz z ładunkiem Q stanu B . W rozprawie zwrócono uwagę na fakt, że w przypadku badania cząstek o dużym ładunku elektrycznym znaczenie ma silne oddziaływanie elektromagnetyczne cząstek z medium detektora, co wpływa na spowolnienie cząstek oraz zmianę ich pędów poprzecznych. W szczególności pokazano, że eksperyment MoEDAL ma przewagę nad wielozadaniowymi eksperymentami ATLAS i CMS ze względu na brak tła przy detekcji cząstek o ładunkach w zakresie $3 e \leq |Q| \leq 7 e$. Badania tego typu cząstek będą jeszcze bardziej efektywne w przypadku HL-LHC.

Rozprawa doktorska napisana jest w sposób staranny, nie zauważyłem błędów stylistycznych czy edytorskich wartych odnotowania. Cztery prace których wyniki zostały opisane w rozprawie przyczyniły się do poznania nowych możliwości, w których eksperyment LHC może odkryć egzotyczne cząstki o dużych ładunkach elektrycznych, zarówno skalary jak i fermiony, o (nie)zerowej liczbie koloru. Wartościowe jest to, iż poczynione analizy oraz uzyskane wyniki doprowadziły do fizycznej rekonfiguracji poddetektorów MoEDAL w celu zwiększenia jego ogólnej czułości i umożliwieniu eksperymentowi większej efektywności w porównaniu z charakterystyką detektorów ATLAS i CMS. Dzięki poczynionym badaniom, obecnie ATLAS i CMS zwracają uwagę na fotonowe kanały produkcji wielokrotnie naładowanych cząstek LLP.

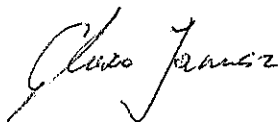
Przedstawiona rozprawa doktorska reprezentuje wysoki poziom naukowy. Na zakończenie mojej recenzji przedstawię parę ogólniejszych uwag, które w żaden sposób nie pomniejszają wartości rozprawy doktorskiej.

- (i) W motywacji badań wykraczających poza SM czytamy "Finally, the critics of the Standard Model raise the inelegance argument, claiming that there is a large number of a priori unconstrained parameters in the theory. It is true, Standard Model has 19 free parameters ...". Czy jednak wprowadzenie np. modelu z mechanizmem radiacyjnej generacji mas neutrin na poziomie jednopętlowym, w którym dodaje się kilkanaście nowych sprzężeń (wzór 2.72) oraz kilka nowych egzotycznych cząstek upraszcza sytuację? Argument dotyczący genezy parametrów SM wydaje mi się

odpowiedni raczej w przypadku modeli badających podstruktury cząstek elementarnych (ang. compositeness models).

- (ii) W swoich pracach również badałem modele z podwójnie naładowanymi cząstkami Higgsa i możliwość ich wykrycia w wysokich energiach (zderzaczach leptonowych, hadronowych) w powiązaniu z procesami niskoenergetycznymi, które w wielu przypadkach prowadzą do znaczących ograniczeń parametrów modeli. W niniejszej rozprawie ograniczenia takie uwzględniono jedynie w przypadku radiacyjnej generacji mas neutrin (masy i mieszania w sektorze neutrinowym). Niezależnie od tego czy sprzężenia nowych cząstek z cząstkami SM traktujemy jako wolne parametry czy są one ustalone przez specyficzny model, cząstki te (neutralne, naładowane) mogą prowadzić do znacznych modyfikacji niskoenergetycznych procesów, łamiących lub zachowujących liczby leptonowe, czy też wpływać na analizy kosmologiczne, ograniczając zakres parametrów danego modelu. Zdaję sobie sprawę, że niniejsza rozprawa jest już obszerna i wykonano bardzo wiele pracy przy jej powstaniu, jednak w przyszłości moim zdaniem warto wziąć pod uwagę tego typu procesy, jeśli takie badania jak przedstawione w rozprawie będą kontynuowane.
- (iii) W pracy [188] badano sygnały produkcji naładowanych cząstek w funkcji sprzężeń λ_5 , mas. Nie pokazano korelacji wartości tych parametrów na zakres generowanych mas czy też mieszań masywnych neutrin. Czy można na przykład rozróżnić w ten sposób hierarchię mas (normalna, odwrotna)?

Moim zdaniem rozprawa doktorska w pełni spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie mgra Rafała Masełka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



prof. dr hab. Janusz Głuza