



Kraków, 03.12.2025

Prof. dr hab. Marcin Kucharczyk

Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk

Ul. Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Jana Klamki pt.

„Long-lived particle searches with the ILD experiment”

Przedmiotem niniejszej recenzji jest rozprawa doktorska mgr Jana Klamki pt. *„Long-lived particle searches with the ILD experiment”*, przygotowana pod kierunkiem prof. dr hab. Aleksandra Filipa Żarneckiego. Prezentowana praca dotyczy analizy potencjału detektorów projektowanych dla przyszłych zderzaczy e^+e^- w zakresie poszukiwania sygnatur długożyciowych cząstek egzotycznych (*ang. long-lived particles – LLPs*), zarówno neutralnych, jak i naładowanych. Studia powyższe zostały przeprowadzone na przykładzie detektora International Large Detector (ILD) przy planowanym zderzaczu International Linear Collider (ILC), zakładając jego działanie przy energii zderzeń e^+e^- równej 250 GeV.

Zgodnie z Modelem Standardowym, potwierdzonym wieloma dowodami eksperymentalnymi, można przewidzieć wiele obserwabli opisujących podstawowe składniki materii z bardzo wysoką precyzją. Niemniej jednak, pomimo imponujących możliwości przewidywania, model ten nie jest doskonały – niektóre obserwowane zjawiska, takie jak ciemna materia, czy też brak antymaterii we Wszechświecie, pozostają niewyjaśnione i nie są uwzględnione w modelu. Do tej pory nie zaobserwowano jednak zjawisk wykraczających poza Model Standardowy, w szczególności w eksperymentach działających przy zderzaczu LHC (*ang. Large Hadron Collider*). W tę perspektywę wpisuje się główny cel rozprawy, związany z oszacowaniem czułości eksperymentu ILD na długożyciowe cząstki egzotyczne, gdzie analizy przeprowadzono w sposób niezależny od modelu, co umożliwiło bardziej wszechstronne przetestowanie zarówno możliwości detektora, jak i narzędzi rekonstrukcji przypadków. Warto również podkreślić, że takie podejście umożliwiło przedstawienie wyników analiz w funkcji parametrów fizycznych, takich jak czasy życia, czy też masy długożyciowych cząstek egzotycznych, co pozwoliło na zbadanie sygnatur o szczególnie wymagającej i interesującej kinematyce.

Bez wątpienia zagadnienia badawcze podjęte w recenzowanej pracy stanowią istotny element w kontekście perspektyw poszukiwań Nowej Fizyki w planowanych zderzaczach e^+e^- , dostarczając istotnych informacji przy wyborze optymalnych rozwiązań zarówno pod względem parametrów samego zderzacza, jak i rozwiązań zastosowanych w projektowanych eksperymentach. Na uwagę zasługuje szczegółowa dyskusja parametrów planowanych zderzaczy e^+e^- , zarówno kołowych jak i liniowych, w kontekście precyzyjnych pomiarów własności bozonu Higgsa, jak i poszukiwań zjawisk Nowej Fizyki.

Praca została napisana w języku angielskim i składa się ze wstępu, pięciu głównych rozdziałów oraz podsumowania. Zawiera także dodatek wprowadzający podstawowe pojęcia Modelu Standardowego oraz dodatek prezentujący przykładowe wizualizacje przypadków sygnału oraz niektórych źródeł tła. Bibliografia obejmuje 243 pozycje. Praca jest starannie opracowana i nie budzi zastrzeżeń pod względem merytorycznym.



INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
im. Henryka Niewodniczańskiego
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie do rozprawy oraz przedstawia motywację podjętych badań. Na jego końcu Autor podkreśla swój indywidualny wkład w przeprowadzone analizy.

Rozdział drugi zawiera zwięzłe wprowadzenie do fenomenologii długożyciowych cząstek egzotycznych. Na początku omówiono ograniczenia Modelu Standardowego, traktowanego jako niskoenergetyczny limit szerszej teorii. Następnie Autor koncentruje się na kluczowych zagadnieniach związanych z bezpośrednimi i pośrednimi metodami poszukiwania zjawisk wykraczających poza Model Standardowy (*ang. Beyond Standard Model – BSM*), przedstawiając jednocześnie potencjał zarówno działających, jak i planowanych eksperymentów. Rozdział kończy się omówieniem charakterystycznych sygnatur cząstek LLP oraz aktualnego stanu badań w tym obszarze. Autor zauważa m.in., iż cząstki LLP są obiecującymi kandydatami na stany końcowe ciemnej materii, które zazwyczaj charakteryzują się długim czasem życia wynikającym z silnego tłumienia ich oddziaływań w ramach sektora Modelu Standardowego.

Trzecia część rozprawy zawiera szeroki przegląd najbardziej zaawansowanych projektów przyszłych zderzaczy e^+e^- , zarówno kołowych jak i liniowych, w kontekście precyzyjnych pomiarów własności bozonu Higgsa, jak również poszukiwań zjawisk Nowej Fizyki. Autor analizuje zalety i ograniczenia zderzaczy e^+e^- w porównaniu ze zderzaczami hadronowymi, zwracając uwagę m.in. na znacznie czystsze środowisko eksperymentalne w przypadku zderzeń e^+e^- , w którym stan końcowy produktów zderzenia może być precyzyjnie zmierzony. Następnie zestawia główne charakterystyki kołowych i liniowych zderzaczy e^+e^- , podkreślając zalety zderzaczy liniowych, takie jak brak promieniowania synchrotronowego, czy też możliwość zderzania wiązek spolaryzowanych. Kolejnym etapem jest szczegółowy opis wybranych projektów liniowych zderzaczy e^+e^- , takich jak ILC, CLIC (Compact Linear Collider) czy też LCF (Linear Collider Facility). Rozdział zamyka krótkie omówienie potencjału zderzaczy e^+e^- w kontekście poszukiwań długożyciowych cząstek egzotycznych.

Rozdział czwarty wprowadza koncepcję eksperymentu ILD przy planowanym zderzaczu ILC, na bazie którego przeprowadzono opisane w rozprawie analizy. Autor omawia wymagania stawiane aparaturze tego systemu detekcyjnego w obliczu oczekiwanych pomiarów fizycznych, przechodząc następnie do opisu najistotniejszych części detektora ILD, kluczowych dla prezentowanej analizy. Przedstawiono budowę i funkcję głównych podzespołów detektora odpowiadających za rekonstrukcję oraz identyfikację cząstek, podając informacje o ich rozmiarach, metodach detekcji oraz zakładanych rozdzielczościach. Szczegółowo opisano procedurę rekonstrukcji śladów oraz strukturę danych, jak również narzędzia do rekonstrukcji, symulacji oraz analizy danych w kontekście selekcji cząstek LLP. Istotnym elementem tego rozdziału jest dyskusja możliwości rejestracji tzw. *przesuniętych śladów* (*ang. displaced tracks*), jak również tzw. *załamanych śladów* (*ang. kinked tracks*) z wykorzystaniem precyzyjnej rekonstrukcji w komorze TPC o dużej akceptancji.

W mojej opinii rozdziały drugi, trzeci i czwarty stanowią solidne wprowadzenie do przeprowadzonych analiz, zawierając niezbędną ilość informacji pozwalającą na pełne zrozumienie dalszych części pracy. Świadczy to o dobrej znajomości przez Autora zarówno zagadnień teoretycznych, jak i eksperymentalnych związanych z tematyką rozprawy.

Prezentacja wyników analiz fizycznych rozpoczyna się od rozdziału piątego, gdzie Autor przedstawia najpierw scenariusze referencyjne w kontekście analizy niezależnej od modelu, w której wszystkie próbki – zarówno sygnału, jak i tła – zostały wygenerowane przy użyciu generatora Whizard. W przypadku neutralnych cząstek LLP użyto w pierwszej kolejności modelu IDM (*ang. Inert Doublet Model*), w ramach którego rozważane były słabo pchnięte stany końcowe o niskim pędzie poprzecznym, wynikającym z niewielkiej różnicy mas



INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
im. Henryka Niewodniczańskiego
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

między ciężką cząstką LLP, a cząstką ciemnej materii powstającą w rozpadzie cząstki LLP. Drugi scenariusz obejmował produkcję bardzo lekkiej cząstki LLP, rozpadającej się na silnie skolimowane cząstki o dużym pędzie poprzecznym. Do generacji przypadków użyto modelu produkcji pseudoskalara ALP (*ang. Axion-Like Particle*) stowarzyszonej z fotonem. W przypadku naładowanych cząstek LLP do generacji użyto modelu produkcji par naładowanych LLP w rozpadzie na długożyciowy fermion wektorowy oraz skalarną cząstkę ciemnej materii. Rozważano dwie wartości mas LLP (średnią i dużą), dla każdej z nich przyjmując kilka wartości różnicy mas pomiędzy cząstką LLP a cząstką ciemnej materii. Dedykowane narzędzia do rekonstrukcji przesuniętych wierzchołków (*ang. displaced vertices*) oraz załamanych wierzchołków (*ang. kinked vertices*), użytych odpowiednio dla sygnatur neutralnych (wierzchołki przesunięte) oraz naładowanych (wierzchołki załamane) cząstek LLP, zoptymalizowano pod kątem przeprowadzonych analiz. Uzyskano dzięki temu relatywnie wysokie wydajności dla wszystkich rozpatrywanych scenariuszy. Co warto podkreślić, Autor przeprowadził również szczegółowe symulacje wybranych projektów detektorów rekonstrukcji śladów pod kątem ich potencjalnej modernizacji dla potrzeb wydajniejszej rekonstrukcji przesuniętych wierzchołków. Treść rozdziału jasno pokazuje, że Autor posiadał wiedzę i zrozumienie sposobu działania stosowanych narzędzi badawczych, dzięki czemu mógł poprawnie przeprowadzić właściwe analizy. Informacje przedstawione w tym rozdziale są wystarczające dla zrozumienia dalszej części rozprawy, a Autor w sposób właściwy odnosi się do nich w następnym rozdziale, omawiając szczegóły analizy.

Rozdział szósty stanowi najważniejszą część rozprawy doktorskiej, gdzie mgr Jan Klamka omawia kolejno wyniki analizy dla wymienionych powyżej scenariuszy dla neutralnych oraz naładowanych cząstek LLP, przy czym wyniki dla neutralnych cząstek LLP rozszerzono o analizę egzotycznych rozpadów bozonu Higgsa, gdzie do generacji przypadków użyto modelu, w którym bozon Higgsa rozpada się na dwie skalarnie cząstki ciemnej materii. Autor analizuje szereg źródeł tła, zarówno od procesów Modelu Standardowego ze stanami końcowymi o wysokim pędzie poprzecznym, jak również pochodzące od oddziaływań z wiązką czy też z materiałem detektora. Opisuje szczegółowo zastosowane ograniczenia w selekcji przypadków. Głównym wynikiem pracy są górne ograniczenia, obliczone na poziomie ufności 95%, na produkcję naładowanych i neutralnych cząstek LLP dla wszystkich rozpatrywanych w pracy scenariuszy referencyjnych w funkcji czasu życia oraz masy cząstek LLP dla eksperymentu ILD, działającego przy planowanym zderzaczu ILC, przy energii zderzeń e^+e^- równej 250 GeV, przy założeniu scałkowanej świetlności na poziomie 2 ab^{-1} . Główną konkluzją jest wniosek, że dla większości analizowanych scenariuszy możliwe będzie badanie sygnałów o przekroju czynnym na poziomie 0.1 fb. W szczególności czułość na stosunki rozgałęzień bozonu Higgsa do cząstek LLP została wyznaczona na poziomie 10^{-4} , co oznacza, że jest ona znacząco lepsza niż odpowiadające im ograniczenia z obecnie funkcjonujących eksperymentów. Podsumowując, wyniki przedstawione w rozprawie wskazują na duży potencjał eksperymentów przy planowanych zderzaczach e^+e^- , a w szczególności eksperymentu ILD przy planowanym zderzaczu ILC, w poszukiwaniach długożyciowych cząstek egzotycznych.

Warto w tym miejscu podkreślić znaczący wkład własny mgr Jana Klamki w przedstawione w rozprawie analizy. Wyniki badań dla neutralnych cząstek LLP zostały opublikowane przez Autora rozprawy w dwuautorskim artykule w *Journal of High Energy Physics* 02 (2025) 112, natomiast rezultaty analizy dotyczącej rozpadu bozonu Higgsa na cząstki LLP zostały ujęte w raporcie ECFA (*ECFA Higgs, electroweak, and top factory study, CERN Yellow Report, CERN-2025-005*). W przypadku analizy dla naładowanych cząstek LLP wyniki nie zostały jak dotąd opublikowane, niemniej należy zaznaczyć, że zaprezentowana analiza została



INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
im. Henryka Niewodniczańskiego
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

przeprowadzona w pełnym zakresie. Oznacza to realizację wszystkich wymaganych etapów – od przygotowania próbek sygnałowych po uzyskanie końcowych wyników fizycznych, tj. górnych ograniczeń na produkcję naładowanych cząstek LLP w eksperymencie ILD.

Rozprawa mgr Jana Klamki została opracowana rzetelnie i z dużą starannością. W całym tekście natrafiłem jedynie na pojedyncze drobne błędy edytorskie, co świadczy o tym, że praca została dokładnie zredagowana i poddana szczegółowej korekcie.

Wybrane uwagi krytyczne

1. W rozdziale drugim Autor wymienia szereg ograniczeń Modelu Standardowego, nie wspominając jednak, że model ten m.in. pomija grawitację oraz jest niezgodny ze Standardowym Modelem Kosmologii. Nie wspomniano również o ograniczeniach związanych ze strukturą zapachu, czyli liczbą generacji kwarków i leptonów oraz wartościami elementów macierzy CKM i PMNS. W mojej opinii warto byłoby wprowadzić pełniejsze omówienie wszystkich kluczowych problemów, aby czytelnik otrzymał kompletny obraz aktualnych ograniczeń Modelu Standardowego.

2. Chociaż przedstawione w rozprawie analizy przeprowadzono w sposób niezależny od modelu, w mojej ocenie w rozdziale drugim brakuje choćby krótkiego opisu przykładowych modeli przewidujących istnienie długożyciowych cząstek egzotycznych. Mogłyby to być na przykład modele ukrytej doliny (*Hidden Valley*), model ciemnego fotonu (*Dark Photon*), czy chociażby minimalnie supersymetryczny Model Standardowy z łamaniem liczby barionowej (*MSSM/mSUGRA*). Wydaje się, że uzupełnienie pracy o opis przykładowych modeli zakładających istnienie cząstek LLP pozwoliłoby rzucić więcej światła na możliwe mechanizmy stojące za produkcją tych stanów.

3. W nawiązaniu do poprzedniej uwagi, w tabelach 2.1 i 2.2 brakuje przykładowych modeli powiązanych z przedstawionymi sygnaturami, tj. na przykład odwołań do literatury opisującej modele przewidujące te sygnatury.

4. W podrozdziale 2.3.2 Autor omawia dotychczasowe wyniki poszukiwań cząstek LLP, nie wspominając jednak w ogóle o wynikach uzyskanych w eksperymencie LHCb, takich jak choćby te opublikowane w *Eur. Phys. J. C75 (2015) 152*, *Eur. Phys. J. C76 (2016) 664*, *Eur. Phys. J. C77 (2017) 224*, czy też w *Eur. Phys. J. C77 (2017) 812*.

5. Autor nie uzasadnia na ogół wyboru wartości ograniczeń, które zostały użyte do optymalizacji narzędzi rekonstrukcji przesuniętych i załamanych wierzchołków (rozdział 5), jak również wartości ograniczeń użytych w preselekcji i końcowej selekcji (rozdział 6), np. wartość cięcia na różnicę w kątach między pędem zrekonstruowanym a pędem pochodzącym z symulacji (str. 52); $d_{pca} < 25$ mm (str. 56); różnica między pozycją zrekonstruowanego wierzchołka a pozycją pochodzącą z symulacji < 30 mm (str. 62); cięcia preselekcyjne ze stron 72-74, czy też końcowe ograniczenia w przypadku analizy neutralnych cząstek LLP (str. 76). Podobnie jest w przypadku analizy naładowanych cząstek LLP. Autor nie dyskutuje potencjalnego wpływu wyboru tych ograniczeń np. w kontekście niepewności systematycznych. Ponieważ niektóre zmienne użyte w selekcji mogą być skorelowane, pojawia się również pytanie o ewentualną możliwość użycia analizy wielu zmiennych.

6. W podrozdziale 6.3, poświęconym analizie produkcji bozonu Higgsa rozpadającego się na dwie cząstki LLP, brak dyskusji dotyczącej wpływu, jaki na końcowe wyniki mogłoby mieć wprowadzenie dodatkowych ograniczeń na liczbę zrekonstruowanych przesuniętych



INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
im. Henryka Niewodniczańskiego
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

wierzchołków ≥ 2 , czy też na ich masę niezmienniczą? Umożliwiłoby to porównanie wyników z szeregiem podobnych analiz przeprowadzonych w działających eksperymentach.

6. Brak dyskusji potencjalnych źródeł niepewności systematycznych, zwłaszcza, że możliwe wydaje się ewentualne oszacowanie przyczynków np. od efektów związanych z oddziaływaniami z wiązką czy też z materiałem detektora. Brak informacji na temat wielkości spodziewanej niepewności dla pomiaru świetlności w eksperymencie ILD.

Recenzent odnotował również pewną liczbę drobnych błędów edytorskich, które jednak nie wpływają na zrozumienie treści rozprawy i z tego względu nie zostały szczegółowo wymienione.

Podsumowując, uważam, że rozprawa doktorska mgr Jana Klamki pt. „*Long-lived particle searches with the ILD experiment*” stanowi bardzo istotny wkład Autora w rozwój badań nad potencjałem detektorów projektowanych dla przyszłych zderzaczy e^+e^- w kontekście poszukiwania zjawisk nieopisywanych w ramach Modelu Standardowego, a w szczególności długożyciowych cząstek egzotycznych. Należy zauważyć, że przedstawione analizy wymagały bardzo dobrego opanowania warsztatu eksperymentalnego. Ponadto rozprawa zawiera szerokie omówienie projektów przyszłych zderzaczy e^+e^- pod kątem poszukiwań Nowej Fizyki, jak również porównanie ich potencjału z możliwościami obecnie działających eksperymentów, dzięki czemu może pełnić rolę przeglądu lub wprowadzenia dla osób rozpoczynających badania w tej dziedzinie.

Większość wymienionych uwag krytycznych nie dotyczy wartości merytorycznej rozprawy, lecz jedynie aspektów edytorskich lub preferencji recenzenta związanych z opisem wybranych zagadnień. Wskazane w recenzji uwagi nie zmieniają mojej jednoznacznie pozytywnej oceny rozprawy.

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późn. zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne.

Marcin Kucharczyk