

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr Jana Franciszka Klamki p.t.
„Long-lived particle searches with the ILD experiment”

Recenzowana rozprawa dotyczy symulacji zdolności planowanego eksperymentu International Large Detector (ILD) przy International Linear Collider (ILC) do przeprowadzenia poszukiwań hipotetycznych cząstek długożyciowych („long-lived particles”, LLP) w zderzeniach leptonów przy energii $\sqrt{s} = 250$ GeV. W układzie detekcyjnym ILD jedną z głównych ról będzie odgrywać komora projekcji czasowej (ang. Time Projection Chamber, TPC) o dużej akceptancji, i to na symulacji tego urządzenia skupiono się w pracy. Wynika to z tego, że TPC pozwala na rekonstrukcję ciągłych trajektorii cząstek naładowanych, w których można wydajnie poszukiwać specyficznych sygnatur LLP, takich jak odosobnione wierzchołki („displaced vertices”), czy tory załamane („kinks”). Przedstawione badania są unikatowe – wykonane po raz pierwszy dla konkretnych sygnatur eksperymentalnych LLP. Analiza została wykonana w całości, to znaczy nie tylko wykonano symulacje detektorowe, ale przeprowadzono również rekonstrukcję zdarzeń, oraz oszacowanie czułości na przekroje czynne wybranych procesów w szerokim przedziale kinematycznym. W tym sensie rozprawa jest istotnym wkładem do planowania nowego przedsięwzięcia naukowego, jakim jest kompleks ILC i eksperyment ILD oraz do określenia jego zdolności do poszukiwania sygnatur fizyki poza modelem standardowym.

Rozprawa napisana jest w języku angielskim i podzielona jest na 6 rozdziałów wraz z podsumowaniem oraz 2 załączniki („Appendix”). Pierwsze trzy rozdziały to część wprowadzająca i opisowa, w pozostałych trzech zawarto opis analizy danych będącej istotą rozprawy i dyskusję wyników tej analizy.

Rozdział 1 zawiera krótkie wprowadzenie do tematyki i plan rozprawy. Istotne jest podkreślenie kontekstu w jakim powstaje rozprawa, to znaczy faktu, że dotyczy ona zarówno eksperymentu, jak i infrastruktury badawczej, która nie tylko jeszcze nie istnieje, ale co więcej jej powstanie nie jest aktualnie zapewnione. Dlatego na pochwałę zasługuje wybór koncepcji badań, które, chociaż są zakotwiczone w konkretnym projekcie detektora, to są na tyle ogólne, że mogą być użyteczne także w innych przyszłych scenariuszach.

Rozdział 2 wprowadza tematykę fizyki poza modelem standardowym, a konkretnie poszukiwań nowych hipotetycznych cząstek, które mogą istnieć w różnorodnych rozszerzeniach tego modelu. Także w tym przypadku praca nie próbuje skupiać się na jednym konkretnym modelu, a raczej szukać wspólnych i możliwie najbardziej ogólnych sygnatur takich cząstek. Zidentyfikowana została konkretna grupa cząstek, tzw. cząstki długożyciowe (LLP), których poszukiwanie może być jednym z obiecujących scenariuszy w eksperymentach przy zderzacach. Mogą to być zarówno cząstki naładowane, jak i neutralne, produkujące specyficzne konfiguracje

kinematyczne w detektorach. Rozdział podaje niezwykle rozległą i kompletną analizę dotychczasowych badań które zostały wykonane przy LHC oraz w innych eksperymentach i identyfikuje te obszary kinematyczne w których jest jeszcze możliwość rozszerzenia tych poszukiwań. Rozdział pokazuje, że Autor w sposób więcej niż wystarczający przestudiował fizyczne podstawy prowadzonej analizy oraz dotychczasowy stan wiedzy. Ich przedstawienie jest kompletne i merytorycznie poprawne, oraz wystarcza do zrozumienia dalszych części rozprawy.

Rozdział 3 prezentuje aktualny stan przygotowań do budowy kolejnej wielkiej infrastruktury badawczej, kontynuującej program naukowy realizowany przy wielkim zderzaczu hadronów. Rozważana jest koncepcja budowy zderzacza elektronów i pozytonów w zakresie energii 240 do 380 GeV, co pozwoli na wydajną produkcję bozonów Higgsa. Zderzenia leptonów charakteryzują się tym, że znany jest dla nich stan początkowy, a samo zderzenie produkuje znaczni mniejsze tło eksperymentalne. Opisane są zarówno proponowane zderzacze kołowe, jak i liniowe. W pracy skoncentrowano się głównie na propozycji liniowego zderzacza zlokalizowanego potencjalnie w CERN – International Linear Collider (ILC). Opisano jego proponowane kolejne stadia rozwoju, w tym rozważane całkowite świetlności oraz energie zderzenia. Przedstawiono też konkurencyjne koncepcje CLIC i LCF oraz opisano potencjalne źródła tła pochodzącego od wiązki w takich urządzeniach. Należy jednak podkreślić, że aktualnie nie jest podjęta żadna decyzja dotycząca budowy któregośkolwiek z tych urządzeń. Ich parametry mogą się zmienić w przyszłości, podobnie jak i ich potencjalna lokalizacja. Podsumowując rozdział ten przedstawia w sposób wyczerpujący aktualny stan planowania kolejnego dużego akceleratora. Biorąc pod uwagę niepewność co do jego ostatecznych parametrów zasadne wydaje się podejście opisane w pracy, które nie skupia się tylko na jednym scenariuszu fizycznym, a zamiast tego analizuje możliwości detekcyjne w wybranych obszarach kinematycznych. Z drugiej strony analizy wykonalności muszą, z konieczności być przeprowadzone przy pomocy istniejących narzędzi i dla konkretnych założeń co do konstrukcji detektora. Wybór eksperymentu ILD przy ILC wydaje się być tutaj poprawny, gdyż jest on dostatecznie zbliżony do większości proponowanych konstrukcji i wnioski wyciągnięte na podstawie jego analizy powinny mieć zastosowanie także w innych eksperymentach. Dodatkowo eksperyment ILC ma już w tej chwili prężną społeczność naukowców rozwijających jego koncepcję, co pozwala na skorzystanie z ich doświadczenia i wsparcia oraz gotowych narzędzi programistycznych.

Rozdział 4 opisuje narzędzie badawcze wykorzystywane w rozprawie, to znaczy zestaw programów symulujących planowany eksperyment ILD przy zderzaczu ILC. ILD jest opracowywany przez międzynarodową współpracę badawczą, w której skład wchodzi grupa z Uniwersytetu Warszawskiego. Rozdział rozpoczyna się od przedstawienia ogólnych założeń projektu detektora, w tym detektorów śladowych, opartych o sensory półprzewodnikowe blisko wiązki oraz cylindryczną komorę projekcji czasowej (Time Projection Chamber, TPC), otaczającą wiązkę i detektory krzemowe. W dalszej odległości od wiązki planowane są też kalorymetry. Następnie opisany jest ekosystem oprogramowania eksperymentu, w tym modele użyte do generacji zdarzeń, programy do symulacji odpowiedzi detektora, oparte o pakiet Geant4, oraz oprogramowanie do rekonstrukcji danych rozwijane przez współpracę ILD. Istotnymi elementami tego ostatniego są procedury rekonstrukcji śladów oraz dalsza analiza danych służąca wyszukiwaniu konkretnych sygnatur fizycznych. Jako że najważniejszym celem pracy jest poszukiwanie konkretnych konfiguracji śladów cząstek, w rozdziale opisano znacznie bardziej

dokładnie procedurę rekonstrukcji śladów opartą o filtr Kalmana, prezentując także jej kluczowe parametry, takie jak wydajność rekonstrukcji oraz rozdzielczość pędową. Zawartość rozdziału pokazuje, że Autor jest świadomy zalet i ograniczeń narzędzia badawczego jakim się posługuje, t.j. planowanego detektora ILD, oraz opanował zaawansowane narzędzia programistyczne potrzebne do przeprowadzenia jego analiz. Informacje przedstawione w rozdziale są wystarczające do zrozumienia dalszych części rozprawy.

W rozdziale 5 przedstawiona jest kluczowa część wyników fizycznych rozprawy opisująca procedurę uzyskania próbek danych potrzebnych do analiz. Wykonane one zostały przy pomocy pakietu Whizard oraz standardowych pakietów symulacji i rekonstrukcji ILD. Dla neutralnych LLP rozważano dwa scenariusze: cząstki o niewielkim pędzie poprzecznym produkowane daleko od pierwotnego wierzchołka zderzenia oraz cząstki lekkie, produkujące w rozpadzie prawie współbieżne tory. Cząstki neutralne produkują w detektorze charakterystyczną sygnaturę odosobnionych wierzchołków, to znaczy torów cząstek naładowanych, które rozpoczynają się w objętości detektora daleko od osi wiązki, a ich kierunek lotu nie wskazuje na wierzchołek pierwotny. Dla naładowanych LLP rozpatrywano dwie masy fermionów oraz trzy masy cząstek ciemnej materii, dające w sumie sześć scenariuszy. Dla tych cząstek w detektorze obserwuje się tory załamane, przy czym kąt załamania toru zależy silnie od pędu rozpadu. Następnie opisany jest dedykowany, przygotowany na potrzeby pracy algorytm wyszukiwania odosobnionych wtórnych wierzchołków rozpadu. Zbadano wydajność znajdowania wierzchołków w funkcji położenia wtórnego wierzchołka, która okazała się zadowalająca w zakresie odpowiadającym rozmiarom TPC. Podobne studium zostało wykonane dla załamanych trajektorii, gdzie za wierzchołek uznaje się punkt załamania. Tu również zaobserwowano zadowalającą wydajność. W tej procedurze konieczna była optymalizacja algorytmu wykonana przez Autora. Bardzo wartościową częścią tego rozdziału jest porównanie wydajności rekonstrukcji torów pochodzących z wtórnych wierzchołków dla wybranych konfiguracji detektora, z użyciem tylko detektorów krzemowych oraz z użyciem także TPC. Bardzo klarownie zostało wykazane, że użycie TPC jest kluczowe ze względu na jego zdolność do rekonstrukcji torów w sposób praktycznie ciągły. Ten rozdział udowadnia, że Autor w sposób biegły posługuje się narzędziami programistycznymi ILD, a także jest w stanie je twórczo rozwinąć na potrzeby jego własnej analizy.

W rozdziale 6 następuje podsumowanie prac wykonanych na potrzeby rozprawy, to znaczy omówienie wyników poszukiwania odosobnionych wierzchołków oraz torów załamanych. Obrana strategia analizy polega na podejściu niezależnym od modelu i poszukiwaniu przynajmniej jednego odosobnionego wierzchołka. Jest to przykład analizy fizycznej polegającej na poszukiwaniu anomalii. Istotne było tutaj przede wszystkim zredukowanie potencjalnych źródeł tła. Opracowano dedykowane eksperymentalne kryteria wyboru torów, które redukują tło będące wynikiem oddziaływania wiązek, oraz innych cząstek z elementami detektora. Podobnie opracowano kryteria wyboru, które pozwoliły na redukcję tła pochodzącego z rzeczywistych oddziaływań zgodnych z modelem standardowym. Osiągnięta została redukcja tych efektów na poziomie 10^{-5} lub lepszym. Analiza została uwieńczona oszacowaniem górnych limitów poziomu ufności na przekroje czynne poszukiwanych procesów dla wybranych neutralnych LLP przy różnych średnich drogach rozpadu. Osiągnięto poziom 1fb lub lepszy. Następnie przeanalizowano alternatywny sposób przeprowadzenia analizy, w którym wybrany został konkretny przykład stanu końcowego: bozon Higgsa rozpadający się na długożyciowy skalar. Pozwoliło to na optymalizację

kryteriów wyboru służących do redukcji tła, i osiągnięcie dodatkowego współczynnika redukcji na poziomie co najmniej 10^{-3} . Również w tym przypadku wyznaczono górne limity na przekrój czynny na produkcję takich cząstek. Okazuje się, że osiągnięte wartości są podobnego rzędu, lub lepsze w wybranych obszarach kinematycznych niż wartości osiągane aktualnie przez eksperyment CMS. Rozdział kończy omówienie poszukiwań torów załamanych. Również w tym przypadku głównym celem była redukcja tła od przypadków objętych modelem standardowym. Wyznaczono wydajność znajdowania wierzchołków załamanych oraz górne granice na przekroje czynne na produkcję LLP. W tym sensie analiza wykonana w rozprawie jest na tyle kompletna na ile to możliwe w przypadku rozważania planowanego dopiero detektora oraz procesów fizycznych, co do których nie ma pewności, że są realizowane w Naturze.

Rozdział 7 podsumowuje studia przeprowadzone w rozprawie oraz wyciąga wnioski dla możliwych do przeprowadzenia studiów w ILD oraz preferowanej konfiguracji detektora – zawierającej TPC o dużej akceptancji. W załączniku A przedstawiono syntetyczny opis modelu standardowego, a w dodatku B zaprezentowano wizualizacje przykładowych zderzeń wygenerowanych w symulacjach użytych w rozprawie.

Rozprawa doktorska opisuje ciekawą i ważną analizę, zarówno pod względem technicznego opanowania oraz wkładu w rozwój specjalistycznego oprogramowania eksperymentu ILD, jak i merytorycznie poprawnej analizy danych dotyczących pomiarów przekrojów czynnych na produkcję cząstek LLP przewidywanych w fizyce poza Modelem Standardowym. Przeprowadzona analiza jest kompletna, to znaczy zawiera pełny opis metodologii badań, pod względem opisu podstaw teoretycznych i praktycznej implementacji symulacji wybranych scenariuszy fizycznych, połączonych z symulacją odpowiedzi detektora i rekonstrukcją zdarzeń w kilku planowanych konfiguracjach, jak i dotyczącej obróbki danych po rekonstrukcji oraz interpretacji teoretycznej. Wyniki są przedstawione w formie górnych ograniczeń na zmierzone przekroje czynna na produkcję cząstek LLP. Wyniki te nie były uzyskane nigdy wcześniej, co oznacza, że praca jest oryginalna i wnosi istotny wkład w proces planowania budowy i określenie programu fizycznego kolejnej wielkiej światowej infrastruktury badawczej, jakim może być kolejny zderzacz leptonów.

Praca jest przygotowana poprawnie od strony edytorskiej. Rysunki są duże i czytelne oraz jasno opisane. Na pochwałę zasługuje przygotowana bibliografia, która jest bogata i obejmuje zarówno teoretyczne podstawy fizyki poza Modelem Standardowym, opis bieżących wyników z eksperymentów na LHC jak i pozycje kluczowe dla zrozumienia narzędzi programistycznych wykorzystanych w pracy.

Należy jednak wymienić pewne aspekty analizy, które mogłyby zostać rozwinięte lub zmodyfikowane, co mogłoby potencjalnie skutkować poprawą uzyskanych wyników.

- Praca w bardzo przekonujący sposób pokazuje, że detektorem najbardziej odpowiednim do przeprowadzenia poszukiwań cząstek poza Modelem Standardowym jest komora projekcji czasowej, ze względu na bezkonkurencyjną gęstość rekonstruowanych śladów pozostawianych przez cząstki naładowane, co skutkuje praktycznie ciągłymi zrekonstruowanymi torami cząstek. Pozwala to na bardzo precyzyjne wyznaczenie położenia przesuniętego wierzchołka, co jest istotą analiz w pracy. Badano reakcje w zderzaczu, co determinuje specyficzny kształt tego TPC: cylindryczny, otaczający rurę wiązki z jednorodnym polem magnetycznym skierowanym wzdłuż kierunku wiązki. Na świecie istniały i działają do dzisiaj dwa TPC o dokładnie identycznej konfiguracji: w

eksperymentach STAR przy Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) w BNL oraz w eksperymencie ALICE przy LHC. Zwłaszcza ten drugi ma konfigurację bardzo zbliżoną do tego planowanego w ILD (149 wierszy elektrod odczytowych (tzw. „padrows”) w porównaniu do około 200 w ILD). W trakcie kilku dekad pracy obu detektorów zgromadzono ogromną wiedzę na temat praktycznych aspektów ich działania, w tym w szczególności różnych aspektów rekonstrukcji śladów w TPC, a także możliwych źródeł tła i pojawiających się zaburzeń i zniekształceń. W pracy nie znalazłem jednak żadnych odniesień do któregośkolwiek z tych detektorów. Wydaje się, że ich szczegółowe przestudiowanie mogłoby znacznie zwiększyć realistyczność symulacji. Dodatkowo oprogramowanie służące do rekonstrukcji śladów w STAR lub ALICE mogłoby być dobrą inspiracją do ulepszenia algorytmów rekonstrukcji śladów, poszukiwania odosobnionych wierzchołków, czy identyfikacji śladów załamanych. Porównanie z wynikami z TPC w ALICE lub STAR, otrzymanymi przy obróbce rzeczywistych danych dałoby też większe zaufanie dla realizmu przeprowadzonych symulacji.

- Poza niezwykle dużą gęstością punktów zrekonstruowanych na trajektorii detektor TPC ma jeszcze jedną kluczową cechę, która odróżnia go od pozostałych typów detektorów. Jest on w stanie precyzyjnie mierzyć specyficzną gęstość jonizacji ($\langle dE/dx \rangle$) dla cząstek przemierzających detektor. Z doświadczenia eksperymentów STAR i ALICE wiadomo, że ta zdolność okazała się niezwykle istotna w wielu aspektach ich analizy fizycznej. W szczególności daje ona kolejną niezależną zmienną, która może być użyta w kryteriach wyboru cząstek i wielu przypadkach kryterium to jest w stanie w znaczący sposób zredukować wybrane procesy tła. W pracy ten aspekt działania TPC nie jest jednak w żaden sposób użyty.

Pozostałe pytania, które nasuwają się po przeczytaniu rozprawy to:

- W sekcji 4.2.1 wspomniano, że pakiet Whizard nie ma mechanizmu generacji odosobnionych wierzchołków. W związku z tym nasuwa się pytanie, w jaki sposób zostały one wygenerowane na potrzeby tej pracy.
- W sekcji 4.2.2 (na przykład rys. 4.3) opisany jest techniczny aspekt symulacji detektora TPC, w którym cały „padrow” jest symulowany jako jeden kompletny cylinder, bez segmentacji w kącie azymutalnym. Rozwiązanie to, choć zapewne poprawia wydajność symulacji, generuje też zupełnie нефizyczne problemy, takie jak przerwy w zrekonstruowanych trajektoriach, widoczne np. na rys. 4.4. Takie efekty mogą w znaczący sposób wpływać na wydajność detekcji oraz mogą generować sztuczne dodatkowe ślady, co ma kluczowe znaczenie dla analiz takich, jak ta przedstawiona w pracy. Należy rozważyć, aby wprowadzić jednak w symulacjach segmentację w kącie azymutalnym. Pomocne byłoby tu doświadczenie z eksperymentów STAR i ALICE, które z powodzeniem przeprowadzają od dekad symulacje detektorów TPC bez podobnych ograniczeń.
- Sekcja „Tracking Performance” na stronie 47 opisuje wydajność detekcji śladów. Wiadomo jednak, że taka wydajność silnie zależy od poziomu zajętości detektora, która z kolei zależy od spodziewanej liczby śladów w jednym zderzeniu oraz liczby zderzeń nakładających się na siebie w czasie trwania dryfu elektronów w TPC. Jaka jest ta spodziewana zajętość (ang. „occupancy”) w standardowym scenariuszu działania ILD i

ILC?

- Na rys. 5.4 przedstawiono schematycznie separację pomiędzy helisami i proponowane położenie wierzchołka. Z rysunku dosyć jasno wynika, który z możliwych wierzchołków zostanie wybrany, gdy rozważana jest odległość pomiędzy helisami w płaszczyźnie zakrzywienia torów (czyli płaszczyźnie xy prostopadłej do kierunku wiązki). Jednak patrząc na rys. 4.4 wydaje się możliwe, że będziemy mieli do czynienia z torami wielokrotnie wykonującymi pełny obrót w tej płaszczyźnie, więc taki wybór będzie niejednoznaczny. Jak w takim przypadku będzie wykorzystywana odległość w kierunku z ? Co się stanie, jeżeli hipotezy co do położenia wierzchołka wynikające z odległości w płaszczyźnie xy nie będą spójne z odległością w kierunku z ?
- W sekcji 5.3.1 opisano potencjalny problem z błędną identyfikacją dwóch segmentów toru załamanego jako „matki” i „córkę” oraz kryterium selekcji, które eliminuje takie potencjalnie błędnie przypisane pary. Czy jednak nie ma innych kryteriów, które pozwolą na identyfikację takich pomyłonych przypadków oraz ich odzyskanie dla analizy?
- Na stronie 74 przedstawiono kryteria wyboru mające na celu usunięcie z próbki par torów potencjalnie pochodzących z konwersji kwantów γ . Użyto tu kryterium na maksymalną masę niezmienniczą pary. Z doświadczenia eksperymentów STAR i ALICE wiadomo, że innym kryterium, znacznie zwiększającym selektywność wyboru jest różnica w kącie polarnym pomiędzy trajektoriami – dla rzeczywistych konwersji powinna oba być bliska zeru.
- Na rys. 6.2 przedstawiono dwie helisy, w tym ilustrację zmiennych d_{11} i d_c . W opisie rysunku użyto sformułowania, „helix circles ... of these track should not overlap”. Jest to jednak przekonanie niepoprawne. Dla cząstek różnoimiennych pochodzących z jednego rozpadu ich helisy jak najbardziej mogą się przecinać, jeżeli ich początkowa różnica pędu daje im kąt rozwarcia, który jest przeciwny do kierunku zakrzywienia ich helis.
- Na stronie 87 użyto słowa „nominator”, choć zapewne powinno być „denominator”.
- Na stronie 91 opisano kryterium wymagające występowania co najmniej 5 punktów zarówno w przypadku toru rodzica jak i córki. Czy to kryterium odnosi się tylko do VTX, czy także do punktów w TPC?
- Na stronie 92 w sekcji „Additional protection for SIT” użyte jest sformułowanie „This can happen ...”, jednak z tekstu nie jest jasne do czego słowo „This” się odnosi.

Wymienione powyżej uwagi nie zmieniają jednoznacznie pozytywnej oceny przedstawionej rozprawy.

Rozprawa przedstawia unikatowe, nietrywialne, interesujące i ważne wyniki oszacowania możliwości pomiarów przekrojów czynnych na produkcję cząstek LLP w planowanym detektorze ILD w kompleksie ILC. Wyniki te zostały przedstawione w publikacji naukowej [14] oraz w kilku raportach konferencyjnych. Ważne jest również, że cała działalność Autora odbywała się w ramach międzynarodowej kolaboracji eksperymentalnej działającej w wiodącym światowym laboratorium naukowym CERN. Podsumowując uważam, że recenzowana rozprawa mgr Jana Franciszka Klamki spełnia niezbędne wymagania stawiane przed rozprawami doktorskimi i wnoszę o dopuszczenie Autora do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

prof. dr hab. inż. Adam Kisiel

