

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Jana Franciszka Klamki

Przedstawiona rozprawa doktorska nosi tytuł **”Long-lived particle search with the ILD experiment”**. Składa się ze streszczeń, podziękowań, siedmiu rozdziałów (wliczając wstęp i podsumowanie) oraz dwóch dodatków. Te siedem rozdziałów zajmuje 129 stron. Praca jest zredagowana po angielsku. Jest ona napisana czytelnie i poprawnie językowo.

Praca dotyczy badania wrażliwości generycznego detektora ILD (International Large Detector), którego budowa i zastosowanie są planowane przy przyszłym ILC (International Linear Collider), na neutralne oraz naładowane długożyciowe cząstki (LLPs: Long-Lived Particles). Istotnym elementem pracy jest użycie pełnej symulacji odpowiedzi detektora uzyskanej za pomocą pakietu Genat4. Nazwa ta (LLP) dotyczy nadal hipotetycznych cząstek przewidywanych przez różne modele rozszerzające Model Standardowy.

Streszczenia (po angielsku i po polsku) oraz Wstęp wiernie opisują zawartość pracy. Jednocześnie początek Wstępu wraz z rozdziałem 2. (Physics Beyond the Standard Model) są zwięzłym przeglądem poszukiwań Fizyki poza Modelem Standardowym. Na końcu rozdziału zamieszczone jest oryginalne podsumowanie tzw. niezależnych od modelu sygnatur LLPs. Ten wstępny fragment pracy świadczy o dogłębnym rozumieniu przez doktoranta szerszej perspektywy tematu, którym zajmuje się on w swojej dysertacji.

Znajduje to potwierdzenie w następnym rozdziale (The e^+e^- Higgs factories). Zawarte jest w nim dojrzałe uzasadnienie budowy zderzacza elektron-pozyton oraz przegląd koncepcji budowy takiego urządzenia z wnikliwym (choć uzasadnienie krótkim) przedstawieniem charakterystyk oraz mocnych i słabych stron poszczególnych rozwiązań. Rozdział kończy się omówieniem stanu szacowania potencjału takiego zderzacza jeżeli chodzi o poszukiwanie LLPs.

W kolejnym rozdziale (The ILD experiment) jest opis generycznego detektora ILD dla przyszłego zderzacza elektron-pozyton. Ponownie jest to zwięzłe dojrzałe i wystarczająco detaliczne omówienie głównych cech planowanego urządzenia. Rozdział ten zawiera również wprowadzenie do analizy, która zostanie przedstawiona w rozdziałach 5. oraz 6. Wprowadzenie to dotyczy szczegółów rekonstrukcji śladów w ILD.

W rozdziale 5. (Benchmark scenarios and reconstruction of displaced signatures) rozwinięta jest koncepcja pracy zasygnalizowana wcześniej w streszczeniu oraz we wstępie. Spośród wielu możliwych sygatur wybrano dwie. Ich wybór jest związany ze skupieniem się na takich, na które wrażliwość zależy od sprawności TPC (Time Projection Chamber). Chodzi o rozpoznawanie wtórnych wierzchołków (displaced vertices) oczekiwanych przy rozpadzie (umiarkownie) długożyciowych hipotetycznych cząstek neutralnych oraz załamanych śladów (kinked tracks) oczekiwanych przy rozpadzie hipotetycznych (umiarkowanie) długożyciowych cząstek naładowanych.

Pomimo intencji prowadzenia analizy w sposób jak najbardziej niezależny od modelu, w obu przypadkach zaproponowano wzorcowe modele, w odpowiedzi na konieczność wysymulowania oczekiwanego sygnału.

Podano dwa scenariusze dla sygatury wtórnych wierzchołków, istotnie różniące się końcową topologią. W jednym sprowadza się ona do pary niskopędowych cząstek naładowanych, dla których suma pędów nie celuje w wierzchołek pierwotny (używane w pracy określenie *heavy scalars* wiąże się z wykorzystaniem tzw. Inert Doubled Model postulującego uzupełnienie Modelu Standardowego o cztery skalarne cząstki, ale jednocześnie podkreśla istotność samej topologicznej charakterystyki wybranego wzorca). Za komplementarną topologię wzorcową przyjęto model w którym *light pseudoscalars* (LLP) rozpadają się na skolimowaną parę energetycznych naładowanych cząstek.

W przypadku modeli objawiających się załamanymi śladami zadbano o możliwość wygenerowania naładowanych cząstek LLP o różnych masach oraz o różnych różnicach mas między nimi a cząstką ciemnej materii (rozpad na którą daje właśnie załamanie śladu, ze względu na powstającą w wyniku rozpadu naładowaną cząstkę Modelu Standardowego oraz nieobserwowaną cząstkę ciemnej materii). Przy okazji w inowacyjny sposób użyto własności generatora Geant4 do uzyskania rozpadów LLPs, co świadczy o poziomie opanowania warsztatu przez doktoranta.

Rozdział ten zawiera również dość szczegółowy opis użytych metod rekonstrukcji (których ostateczna postać była, przynajmniej w części, wynikiem modyfikacji przeprowadzonych przez doktoranta) oraz analizę wydajności tych metod, z uwzględnieniem opisu efektu ewentualnego użycia alternatywnej konstrukcji detektora śladowego (wyeliminowania TPC na rzecz detektora w pełni krzemowego). Z punktu widzenia rozpatrywanych topologii wariant taki istotnie obniżyłby efektywność rekonstrukcji.

Rozdział 6. (ILD sensitivity to long-lived particle detection) zawiera główne wyniki pracy. Jest w znacznej mierze oparty na materiale, które został już przez doktoranta (i skromną liczbę współautorów) opublikowany.

Podrozdział 6.2 (Search for displaced Vertices) został prawie w całości opublikowany (Ref. [13] w bibliografii pracy: J. Klamka and A.F. Zarnecki, Searching for displaced vertices with a gaseous tracker for a future e^+e^- Higgs factory, JHEP 02 (2025) 112 [arXiv:2409.13492].) Jest to pełna analiza wrażliwości ILD w wersji z TPC, na topologie z wtórnymi wierzchołkami, wprowadzone już w poprzednim rozdziale jako *heavy scalars* oraz *light pseudoscalars*. Głównym wynikiem są niezależne od modelu ograniczenia na przekrój czynny zobrazowane rysunkiem 6.9.

Rozszerzeniem tej analizy na konkretny model jest przedstawione w podrozdziale 6.3 (Higgs decays to long-lived particles). Można tę część rozumieć jako demonstrację możliwości optymalizacji poszukiwania w przypadku zrezygnowania z jak największej niezależności od modelu.

Natomiast w podrozdziale 6.4 (Search for kinked tracks) zeprezentowana jest analiza inspirowana poszukiwaniem wtórnych wierzchołków, ale dotycząca zasadniczo innej topologii tytułowych „załamanych śladów”. Ona również została już omówiona w poprzednim rozdziale. Ponownie głównym wynikiem są ograniczenia na przekrój czynny zobrazowane tym razem rysunkiem 6.16.

....Warte podkreślenia jest fakt, że wszystkie trzy opracowania są pełnymi analizami opartymi na pełnej symulacji oraz wykorzystującymi nowatorskie podejście do generowania egzotycznych sygnatur. Każde z tych opracowań zawiera detaliczną dyskusję użytych wyników.

Prace kończy bardzo zgrabnie zredagowane podsumowanie.

Ogólne wrażenie po przeczytaniu przedstawionej pracy jest bardzo dobre. Dodatkowo uzyskane wyniki zostały w znacznej mierze opublikowane, a w całości były pokazywane w ramach spotkań różnych grup roboczych oraz na międzynarodowych konferencjach.

Praca z nawiązką spełnia wymagania stawiane dysertacjom doktorskim.

Opinia recenzenta jest zdecydowanie pozytywna.

Wnoszę o dopuszczenie pracy do publicznej obrony.



Piotr Zalewski