

Warszawa, czerwiec 2020 r.

Prof. dr hab. Wojciech DOMINIK  
Instytut Fizyki Doświadczalnej  
Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego  
Pasteura 5, 02-093 Warszawa

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Dominika Aromińskiego pt.  
**Beam-induced Backgrounds at the Compact Linear Collider**

Rozprawa doktorska mgr inż. Dominika Aromińskiego dotyczy badania scenariuszy powstawania promieniowania tła w projektowanym liniowym zderzaczu elektronów i pozytonów CLIC w CERN. Tematyka pracy jest ważna poznawczo, a także ma fundamentalne znaczenie z perspektywy budowy akceleratora CLIC w przyszłości oraz podjęcia badań procesów zderzeń wiązek z wykorzystaniem dedykowanej aparatury doświadczalnej.

Rozprawa napisana w języku angielskim i opublikowana w formie zgrabnej książeczki liczy 199 stron wraz z rysunkami, spisem rysunków, spisem tabel oraz spisem literatury obejmującym 105 pozycji. Język pracy bardzo poprawny w czym pomogli zapewne współpracownicy i współpracownicy z CERN. Struktura pracy bardzo przejrzysta, prawidłowa i zgodna ze standardami pracy naukowej. Uwagę zwraca bardzo ładna strona graficzna i duża staranność edytorska. Poza niezbyt zręcznym miejscami ułożeniem rysunków, nie znalazłem żadnych większych uchybień.

Rozprawa doktorska mgr. inż. Dominika Aromińskiego stanowi podsumowanie bieżącego etapu procesu przygotowania infrastruktury akceleratorowej w obszarze zderzeń wiązek i oraz układu doświadczalnego wielkiego projektu przyszłego zderzacza liniowego  $e^+e^-$  CLIC planowanego w CERN. Projekt CLIC jest elementem szerokiego pejzażu badawczego związanego z badaniem zderzeń elektronów z pozytonami przy energiach w środku masy przewyższających próg na produkcję bozonu Higgosa i pary kwarków top. Równocześnie z podjęciem prac konstrukcyjnych zderzacza LHC podjęto inicjatywę stworzenia wysokoenergetycznego zderzacza  $e^+e^-$ . Głównym ograniczeniem kołowych zderzaczy elektronów są straty energii wiązek relatywistycznych związane z emisją promieniowania synchrotronowego, co zmusza do stałego dostarczania olbrzymiej energii na przyspieszanie wiązek i utrzymanie ich energii. Graniczną efektywność przyspieszania osiągnięto w największym istniejącym akceleratorze kołowym LEP i przyjęto, że naturalnym kierunkiem dalszego rozwoju infrastruktury przyspieszania najbliższych naładowanych leptonów będzie akcelerator liniowy wiązek przeciwbieżnych z pojedynczym punktem przecięcia. Rozważano intensywnie budowę zderzacza TESLA w DESY, a potem International Linear Collider (ILC) oraz CLIC w CERN. Obecnie jedynym kontynuowanym przedsięwzięciem liniowego zderzacza  $e^+e^-$  jest CLIC, który, jako przedsięwzięcie badawcze wielkiej skali, ma szansę zaistnieć w programie Europejskiej Strategii Badawczej Fizyki Cząstek z terminem realizacji w drugiej połowie lat trzydziestych obecnego stulecia. Dla kompletności, trzeba wspomnieć, że prowadzone są prace badawczo-rozwojowe i

konstrukcyjne zderzacza kołowego  $e^+e^-$  CEPC (China Electron Positron Collider) umożliwiającego energię w środku masy  $2 \cdot 120$  GeV, który ma być „fabryką” bozonów Higgsa - jest to wewnętrzny projekt Chin i środowisko międzynarodowe nie ma wpływu na harmonogram czy parametry techniczne maszyny (termin uruchomienia 2028 ?).

W swojej rozprawie mgr inż. Aromiński zajmuje się badaniem wpływu procesów powodowanych przyspieszaniem oraz prowadzeniem wiązek elektronów w jonowodzie na charakterystyki samych wiązek oraz na ograniczenia detekcyjnej zdolności CLICdet – głównego i jedyne dużego układu pomiarowego planowanego w otoczeniu punktu przecięcia wiązek przeciwbieżnych.

Układ rozprawy jest logiczny i przejrzysty. W drugim rozdziale Autor przedstawia znaczenie przyszłych badań planowanych z użyciem nowych zderzaczy przeciwbieżnych wiązek, ze szczególnym zaznaczeniem infrastruktury akceleratorowej CLIC w badaniach przekrojów czynnych procesów opisanych w Modelu Standardowym. Badania przy użyciu akceleratorów najlżejszych naładowanych leptonów umożliwiają osiągnięcie największej precyzji identyfikacji kanałów reakcji ze względu na znacznie mniejsze tło niż w oddziaływaniach protonów. Mniejsze, niż w oddziaływaniach protonów, przekroje czynne pozwalają myśleć o rejestracji danych doświadczalnych bez bieżącego układu wyboru przypadków (tryger), co pozwoli na uniknięcie ewentualnych obciążeń próbki danych. Plan akceleratora CLIC zakłada osiągnięcie w trzech kolejnych etapach energii 380 GeV, 1.5 TeV i 3 TeV. Obecnie prace planistyczne koncentrują się na technicznym przygotowaniu etapu pierwszego, który powinien umożliwić precyzyjne pomiary w sektorze bozonu Higgsa i kwarku top w Modelu Standardowym, przy uwzględnieniu przestrzennego ograniczenia przedsięwzięcia do skali infrastruktury LHC. Pan Aromiński bardzo precyzyjnie przedstawia punkt wyjściowy własnych prac badawczych, jakim jest układ prowadzenia przyspieszonych wiązek do punktu przecięcia (Beam Delivery System – BDS) przyjęty w 2012 roku z aktualizacją dokonaną w roku 2017 (odpowiednio, pozycje [9] i [21] cytowanej literatury) oraz model zestawu aparatury pomiarowej CLICdet zawarty w raporcie Conceptual Design Report z roku 2017 (pozycja [14] w spisie literatury).

Mgr inż. Aromiński przedstawia w kolejnym rozdziale pakiety numeryczne służące do modelowania procesów związanych z prowadzeniem wiązek w jonowodzie BDS oraz badania ich wpływu na stabilność przestrzenną wiązki, stratę energii, pomiar świetlności i ograniczenia pomiarowe w CLICdet wynikające z silnego promieniowania tła. Szereg złożonych specjalistycznych pakietów posłużyło do wykonania poszczególnych części analizy. Sposób przedstawienia narzędzi numerycznych potwierdza dużą biegłość i fachowość Doktoranta oraz pełen wymagany profesjonalizm. Pakiet PyHEADTAIL zaadaptowany został do symulowania dynamiki wiązki przyspieszanej w akceleratorze liniowym, co jest szczególnie ważne dla precyzyjnej oceny impedancji jonowodu wynikającej ze sprzężeń poprzez pola wzbudzone. Pakiet Synrad+ pozwala modelować emisję promieniowania synchrotronowego i oddziaływania ze ścianą komory próżniowej jonowodu. Transport wiązek na odcinku wyprowadzającym BDS modelowany jest za pomocą pakietu PLACET (*Program for Linear Accelerator Correction and Efficiency Tests*) – pakiet umożliwia badanie wpływu stabilności mechanicznej układu jonowodu na parametry paczek wiązki. Warto w tym miejscu

podkreślić, iż Autor rozszerzył funkcjonalność PLACET o ekstrakcję informacji o promieniowaniu synchrotronowym do dalszych badań skutków wpływu promieniowania synchrotronowego na odpowiedź detektora głównego.

Podstawowym pakietem używanym przez mgr. inż. Aromińskiego w badaniach jest pakiet o akronimie Guinea-Pig (*Generator of Unwanted Interactions for Numerical Experimental Analysis Program Interfaced to GEANT*), który umożliwia numeryczne modelowanie oddziaływania wiązek w punkcie zderzenia i wyliczenie świetlności zderzeń w sposób uwzględniający rzeczywistą energię paczek pocisków. Jak nazwa wskazuje pakiet pozwala także wysymulować produkcję promieniowania tła w rejonie przecięcia wiązek. Autor zademonstrował przekonująco znaczenie właściwego doboru parametrów sieci rachunków numerycznych dla uzyskania stabilnych wyników. Poprawne wykonanie kalibracji pakietu Guinea-Pig ma fundamentalne znaczenie dla uzyskania wiarygodnych ocen ilościowych efektów tła promieniowania w detektorze oraz rozkładu częstości generacji sygnałów w przestrzeni detektora CLICdet, co jest jednym z głównych celów badawczych rozprawy. Autor wykazał pełną kontrolę nad używanymi pakietami numerycznymi i dbałość o spójność na kolejnych etapach eksperymentów numerycznych.

Następne rozdziały zawierają najważniejsze wyniki badań numerycznych i optymalizacji elementów jonowodu oraz układu pomiarowego CLICdet. Autor bada procesy oddziaływań z uwzględnieniem efektów związanych z emisją promieniowania hamowania dla dwóch planowanych energii CLIC: 380 GeV i 3 TeV. Ciekawa obserwacja przedstawiona na wykresie 4.1 wskazuje na dość duże rozmycie energii wiązek w punkcie zderzenia w stosunku do energii nominalnej w układzie środka masy. Zmniejszenie energii wynika z silnej emisji promieniowania hamowania i jest bardziej znaczące dla energii 3 TeV. Autor wskazuje, że tylko 60% i 36.3% oddziaływań  $e^+e^-$  zachodzących będzie przy energiach bliskich (w granicach 1%) nominalnej energii zdarzeń, odpowiednio dla 380 GeV i 3 TeV. Procesy oddziaływań  $e^+\gamma$ ,  $e^-\gamma$  oraz  $\gamma\gamma$  o sumarycznej świetlności porównywalnej lub wyższej niż częstość zderzeń  $e^+e^-$  przy energii nominalnej prowadzą do powstania silnego tła promieniotwórczego, co rzutuje na precyzję identyfikacji zdarzeń badanych oraz stanowić może silne ograniczenie zdolności pomiarowej elementów detekcyjnych umieszczonych w pobliżu komory próżniowej jonowodu. Obserwacja potwierdza konieczność przeprowadzenia szczegółowego modelowania i dokonania optymalizacji samej struktury jonowodu oraz aparatury detekcyjnej.

W przedstawionych wynikach symulacyjnych częstości poszczególnych kanałów tła znajdujemy, że przy energii 380 GeV dominującym procesem będzie produkcja niekoherentnych par  $e^+e^-$ , których sumaryczna energia osiągać może aż do 200 GeV, a przy energii 3 TeV główne tło stanowić będą pary koherentne o energiach do 1500 GeV. Częstość procesów hadronizacji w oddziaływaniach  $\gamma\gamma$  jest znacznie mniejsza, odpowiednio średnio 0.18 i 3.2 zdarzenia na przecięcie wiązek przy 380 GeV i 3 TeV, ale te właśnie procesy prowadzą do powstawania największych depozytów energii w obszarze rejestracji CLICdet. Obserwowane numerycznie częstości zdarzeń tła przewyższają w warstwach bliskich rury wiązki w rejonach „do przodu” tolerowaną górną granicę zajętości detektora CLICdet w wersji przyjętej w TDR.

Przeprowadzone badania numeryczne precyzji prowadzenia wiązek na ostatnim odcinku ich ogniskowania (Final Focus System – FFS) pokazały istotne znaczenie wielkości otwarcia wszystkich elementów prowadzenia wiązek oraz rodzaju materiału pokrycia elementów jonowodu. Utrata świetlności wynikająca z prądów indukowanych w ścianie jonowodu jest znacznie mniejsza przy zastosowaniu miedzi niż stali niemagnetycznej co Autor pokazuje na wykresie 5.10. Badania dystorsji paczki falowej także pokazują lepszą stabilność ich kształtu dla jonowodu wykonanego z miedzi przy obu badanych energiach. Zastosowanie dostępnych materiałów o lepszym niż miedź przewodnictwie w temperaturze standardowej nie prowadzi do poprawy parametrów. Oceny stabilności przy zastosowaniu srebra do pokrycia ścianek komory próżniowej pokazują, iż poprawa w stosunku do miedzi byłaby niewielka i niesatysfakcjonująca. Zasadne jest więc zbadanie możliwości redukcji niepożądanych efektów przez zmianę wielkości otwarcia przekroju jonowodu, gdyż amplituda fali wzbudzonej zależy silnie od apertury.

Badanie zależności kształtu poprzecznego paczki wiązki od apertury BDS prowadzi do kolejnych ważnych wniosków. Zwiększenie apertury zmniejsza dystorsję na odcinkach BDS odległych od punktu przecięcia o więcej niż 500 metrów. W okolicy punktu przecięcia dystorsja jest nieznacząca dla obu badanych energii nawet przy zmniejszeniu apertury i zastosowaniu stali niemagnetycznej. Interpretacje wyników przedstawionych na wykresach 5.3, 5.5, 5.7 i 5.9 utrudnia brak jednoznacznego zdefiniowania wartości na osi rzędnych. Nie udało mi się dostrzec wyraźnej definicji użytego do oceny parametru  $\langle r_{x(y)} \rangle_{\text{first}} - \langle r_{x(y)} \rangle_{\text{last}}$ . Również zastosowanie standardowej i zdawkowej treści podpisów pod rysunkami bez najmniejszego komentarza nie ułatwia czytelnikowi pełnej interpretacji przedstawionych wyników.

Mgr inż. Aromiński wykonał optymalizację wielkości otwarcia przekroju jonowodu dla obu energii wiązek. W rozprawie przekonywująco skonkludował, iż wpływ pól wzbudzonych na parametry wiązek może być zminimalizowany w wyniku zwiększenia apertury o 44% na całej długości odcinka FFS dla energii 380 GeV. Dla energii 3 TeV apertura powinna być większa o 3 mm do 5 mm zależnie od pozycji na torze prowadzenia wiązek. Wyniki badań wpływu pól wzbudzonych na parametry wiązek CLIC zostały przedstawione na 10th International Particle Accelerator Conference w Melbourne w 2019 roku; mgr inż. Aromiński jest wymieniony jako pierwszy współautor prezentacji.

Intensywne promieniowanie synchrotronowe emitowane podczas przyspieszania i prowadzenia wiązek w akceleratorze CLIC ma fundamentalne znaczenie dla zdolności pomiarowych i precyzji pomiarowej CLICdet. Autor zbadał bardzo szczegółowo skutek emisji promieniowania na stratę energii wiązek, kształt paczek, poziom promieniowania w tunelu akceleratora, grzanie rury wiązki oraz wynikający z parowania materiałów pod wpływem radiacji spadek próżni, a także, co najistotniejsze, częstość trafień i wynikającą z niej zajętość poszczególnych warstw i modułów detekcyjnych CLICdet. Autor zaobserwował, iż przy energii 380 GeV wystarczające jest konwekcyjne odprowadzenie mocy cieplnej dla utrzymania wzrostu temperatury rury wiązki poniżej 1 K w warunkach równowagi. Przy nominalnej energii 3 TeV dedykowany system chłodzenia musi być przewidziany.

Badania zajętości poszczególnych cylindrycznych warstw krzemowego detektora wierzchołka i warstw detektora śladowego w części „do przodu”, wynikającej z promieniowania synchrotronowego, pokazują znaczące przekroczenie dopuszczalnego poziomu zajętości 3% przy energii 380 GeV, gdy wewnętrzna powierzchnia komory próżniowej otaczającej punkt przecięcia będzie wygładzona mechanicznie (parametr gładkości 100 nm). Przy zwiększeniu szorstkości wewnętrznej powierzchni komory do 1  $\mu\text{m}$ , zajętość wewnętrznych warstw detektora wierzchołka zmniejsza się do 10% przy energii 380 GeV, co nadal przekracza dopuszczalny założony poziom. Przy energii wiązek 3 TeV szorstkość powierzchni 1  $\mu\text{m}$  sprowadza zajętość do poziomu nie wyższego niż 1%, co wynika z silnej kolimacji promieniowania wokół osi wiązki przy tej energii. Proponowane sposoby dalszego zmniejszenia tła promieniowania synchrotronowego w CLICdet, jak specjalne kształtowanie wewnętrznej powierzchni komory próżniowej, pułapkowanie fotonów we wnękach i czy zastosowanie przesłon przed aparaturą detekcyjną, Autor omawia wyłącznie jakościowo wskazując konsekwencje i ograniczenia zastosowania każdej z metod. Przedstawione wyniki są wartościowe i posłużą dalszym pracom nad minimalizacją wpływu promieniowania synchrotronowego na aparaturę pomiarową.

Wykonane przez mgr. inż. Aromińskiego badania produkcji niekoherentnych par leptonów i kanałów hadronowych w reakcji  $\gamma\gamma$ , pokazują, że takie procesy tła dają poważny wkład do częstości zdarzeń rejestrowanych przez CLICdet i powinny być precyzyjnie uwzględniane w projektowaniu przyszłego detektora. W obecnie przyjmowanym projekcie CLICdet, przy nominalnej świetlności, zajętość w krzemowym detektorze wierzchołka osiąga poziom 1% dla energii 380 GeV w obszarach bliskich rury wiązki, a dla 3 TeV dochodzi nawet do górnej akceptowalnej granicy 3%. W warstwach detektora śladowego – bardziej oddległych od osi wiązki, maksymalna zajętość jest zdecydowanie mniejsza niż 1%. Najtrudniejsza raportowana sytuacja pomiarowa dotyczy części „do przodu” kalorymetru hadronowego, gdzie w modułach oddległych o mniej niż 500 mm od osi wiązek zajętość wynosi 100% dla obu energii przy próbkowaniu sygnału w odstępach 25 ns, co w zasadzie przesądza o bezużyteczności tej części aparatury. Podobną konkluzję można odnieść do hodoskopu mionów „do przodu” – dla odległości mniejszych niż 800 mm wszystkie warstwy są przeciążone. Autor prawidłowo interpretuje uzyskane wyniki.

Pan Dominik Aromiński proponuje sposoby redukcji wpływu procesów tła na działanie kalorymetru hadronowego i hodoskopu mionowego i kilka naturalnych proponowanych ścieżek optymalizacji poddaje badaniom. Pokazuje, że wprowadzenie osłony radiacyjnej rury wiązki oraz lokalne zmniejszenie rozmiaru celek pomiarowych wraz ze zwiększeniem częstości próbkowania sygnału do 10 ns pozwala zmniejszyć zajętość najbardziej narażonych obszarów kalorymetru hadronowego do kilkunastu procent przy energii 380 GeV. Zaproponowane rozwiązanie uwzględnia ogólne ograniczenia techniczne, finansowe i organizacyjne przedsięwzięcia, co czyni zeń cenną i wiarygodną wskazówkę dla przyszłych badaczy oraz dobrze uzasadnia konieczność dalszego rozwoju kodów numerycznych narzędzi symulacji, szczególnie tych związanych z bardziej realistyczną parametryzacją oddziaływań w detektorze fotonów o niskich energiach.

Autor rozprawy uczestniczył w pracach licznego zespołu badawczego przygotowującego eksperymentowanie przy planowanym zderzacz liniowym CLIC w CERN. Udział Autora w przedsięwzięciu badawczym jest w pracy wyraźnie zaznaczony i stanowi indywidualny, istotny wkład w wieloletni proces przygotowań eksperymentu. Bogactwo informacji zebranych w rozprawie na pewno posłuży w dalszych pracach projektowych.

Układ tekstu rozprawy jest poprawny. Można powiedzieć, że rozprawa może służyć młodym adeptom eksperymentalnej fizyki cząstek jako dobra ilustracja ogromu zagadnień, które należy precyzyjnie rozwiązać, by mieć szanse na uzyskanie oczekiwanego wyniku fizycznego. W tym miejscu słowo krytyczne: odrębny spis wykresów jest czytelnikowi prawdopodobnie mniej przydatny w rozprawie, niż byłaby, brakująca tutaj, lista stosowanych akronimów i podstawowych definicji. Na przykład nie udało mi się odnaleźć rozszyfrowania skrótu FD użytego w dyskusji wyników na stronie 70. Także pojawianie się w tekście wykresów i tabel w dużym odstępnie od miejsca przywołania nie ułatwia czytelnikowi śledzenia głównych wątków.

Przedstawiona praca świadczy o dojrzałości Autora, a także o jego obszernej wiedzy w przedmiocie rozprawy. Powstanie akceleratora CLIC w najbliższej przyszłości nie jest przesądzone. Być może w obecnej połowie stulecia w ogóle nie powstaną liniowe zderzacze elektronów najwyższych energii. Uzyskane przez Autora wyniki dotyczące wpływu procesów tła radiacyjnego w rejonie punktu zderzenia na zdolność rejestracji oddziaływań właściwych i na ograniczenia pomiarowe mają na tyle uniwersalny charakter, że na pewno będą przydatne w opracowaniu przyszłych eksperymentów przy zderzaczach wiązek elektronów i pozytonów. Być może też w projekcie Future Circular Collider (FCC) w CERN, o ile zapadnie strategiczna decyzja o jego budowie.

Praca doktorska mgr inż. Dominika Aromińskiego stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i spełnia ustawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Rozprawę oceniam wysoko i wnioskuję o dopuszczenie Autora do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Wojciech DOMINIK