



dr hab. inż. Iwona Grabowska-Bołd, prof. AGH
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica
w Krakowie

Kraków, 12 czerwca 2020 roku

Recenzja rozprawy doktorskiej pana mgr Dominika Aromińskiego pt. “Beam-induced Backgrounds at the Compact Linear Collider”

Głównym celem rozprawy doktorskiej pana mgr Dominika Aromińskiego “Beam-induced Backgrounds at the Compact Linear Collider” jest zbadanie wpływu tła pochodzącego od oddziaływań ultra-relatywistycznych wiązek cząstek naładowanych w układzie dostarczania wiązki (z ang. Beam Delivery System, BDS), jak również w poszczególnych podsystemach detektora CLICdet dla rozwijanego projektu nowej generacji zderzacza liniowego CLIC. Projekt jest integralną częścią międzynarodowej współpracy ponad 70 instytutów z przeszło 30 państw.

Kompaktowy Akcelerator Liniowy (z ang. Compact Linear Collider, CLIC) jest projektem liniowego zderzacza, który jest planowany jako przyszły komplementarny eksperyment dla kompleksu akceleratorów kołowych w Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych (z fr. Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, CERN) w Genewie, z których Wielki Zderzacz Hadronów (z ang. Large Hadron Collider, LHC) jest najbardziej znany. Celem CLIC jest badanie zderzeń elektronów i pozytonów przy energiach w centrum masy sięgających kilku teraelektronowoltom ($1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$). Aby w pełni zrealizować swój program badawczy, CLIC jest przygotowywany do zbierania danych w trzech etapach przy zwiększającej się energii zderzenia par wiązek tj. 380 GeV, 1.5 TeV oraz 3 TeV, co przekłada się na stopniowo rosnącą długość akceleratora w zakresie od 11 km do 50 km. W programie badań eksperymentu CLIC znajdują się m.in. bardzo precyzyjne pomiary oddziaływań bozonu Higgsa, którego istnienie udowodniono eksperymentalnie w roku 2012 na LHC. W przeciwieństwie do protonów, elektrony i pozytony są cząstkami elementarnymi, czyli nie posiadającymi wewnętrznej struktury. Stąd też przyszły zderzacz leptonów oferuje bardzo czyste środowisko pomiarowe, w którym stan końcowy produktów zderzenia może być precyzyjnie poznany. Ponadto CLIC stwarza możliwość wykonania niezwykle precyzyjnych pomiarów produkcji najcięższego kwarku szczytowego t (z ang. top), a tym samym pozwala na poszukiwanie sygnału tzw. nowej fizyki poza Modelem Standardowym z nieosiągalną dziś precyzją.

Projekt akceleratora liniowego CLIC oparty jest o technologię wnęk przyspieszających o częstościach radiowych, w połączeniu z zastosowaniem nowatorskiego pomysłu przyspieszania z wykorzystaniem dwóch wiązek w celu wytworzenia pól elektrycznych o gradiencie 100 MV/m. Aby osiągnąć wysoką świetlnność (na poziomie $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) w punkcie zderzenia przyszłego eksperymentu, zderzane wiązki muszą charakteryzować się wysokimi intensywnościami (około 10^9 ładunków na pęczek) i nanometrowymi rozmiarami. Zderzenia w CLICu będą się odbywać co 0.5 ns. Te restrykcyjne wymagania prowadzą do wielu wyzwań w projekcie przyszłego akceleratora i detektora.

W momencie zderzenia pęczki elektronów i pozytonów są silnie ogniskowane w polu elektromagnetycznym wytworzonym przez przeciwbieżne i przeciwnie naładowane wiązki, co skutkuje emisją promieniowania synchrotronowego (z ang. synchrotron radiation, SR) w postaci strumienia wysokoenergetycznych fotonów. Zjawisko to prowadzi do redukcji całkowitej energii zderzanych cząstek, a zatem oddziaływanie elektron-pozyton odbywa się przy niższej energii niż nominalna. Ponadto fotony SR mogą oddziaływać m.in. zarówno ze sobą nawzajem, jak również z naładowanymi cząstkami wiązki, co w efekcie prowadzi do produkcji nowych cząstek wchodzących w skład tzw. tła od oddziaływań wiązek. Istnienie tła jest zawsze efektem niepożądanym, gdyż może mieć negatywny wpływ na przebieg eksperymentu. Zatem ograniczenie wpływu tego rodzaju tła na eksperyment ma kluczowe znaczenie przy jego projektowaniu. Ponadto ze względu na geometrię akceleratora liniowego promieniowanie SR produkowane w układzie BDS może przemieszczać się na dużych odległościach wewnątrz rury akceleratora, po czym jego energia może być deponowana w rejonie detektora, zagrażając jego bezpieczeństwu i wysokiej wydajności. Stąd też geometria rury układu BDS musi być dobrze zoptymalizowana, aby zredukować negatywny wpływ odbitego promieniowania SR na eksperyment. Utrzymanie stabilnych wiązek w przypadku rury o niewielkim promieniu stanowi dodatkowe duże wyzwanie. Z powodu wysokiego prądu wiązki i skończonej wartości przewodnictwa materiału rury, prąd powierzchniowy indukowany w ścianie rury jest opóźniony w stosunku do źródła i może oddziaływać z wiązką zaburzając jej stabilność. **Rozprawa pana mgr Dominika Aromińskiego w systematyczny sposób adresuje wszystkie te zagadnienia dla dwóch ekstremalnych punktów pracy akceleratora: 380 GeV oraz 3 TeV.**

Rozprawa składa się ze streszczeń w języku angielskim i polskim, dziewięciu rozdziałów, dodatku zawierającego plik konfiguracyjny do programu symulacji oraz spisu referencji obejmującego 105 pozycji. Rozprawa zredagowana jest w języku angielskim. Praca napisana jest niezwykle klarownie. Na podkreślenie zasługuje fakt, iż większość wykresów i obrazków nie będących autorstwa Doktoranta posiada referencję do oryginalnych publikacji, z której pochodzi (wyjątek najprawdopodobniej stanowi Fig. 2.7).

W Rozdziale 1 znajduje się zwięzły wstęp, w którym oprócz motywacji fizycznej będącej kluczową podstawą do poszukiwań nowych rozwiązań akceleratorowych, dowiadujemy się jakie są zalety i wady akceleratorów kołowych i liniowych, jak również na czym polega projekt nowej generacji akceleratora CLIC wraz z istotnymi wyzwaniami w tym przedsięwzięciu.

Rozdział 2 zawiera dyskusję obecnie rozwijanych projektów akceleratorowych wraz z najważniejszymi założeniami ich programu badawczego. Ponadto dowiadujemy się o najważniejszych wyzwaniach konstrukcyjnych stojących przed akceleratorem CLIC, jak również poznajemy elementy jego konstrukcji ze szczególnym naciskiem na jego trzy części składowe tzw. 1) Główny Liniak (z ang. Main Linac, ML), którego zadaniem jest przyspieszanie wiązek e^\pm od energii 9 GeV do wartości nominalnej 0.38-3 TeV, 2) BDS, którego zadaniem jest transport wiązki z końca ML do punktu zderzenia i wreszcie 3) detektor ogólnego przeznaczenia CLICdet, który otacza punkt zderzenia wiązek, a którego zadaniem jest rejestrowanie produktów zderzenia elektron-pozyton. Z drobnych uwag do tej części rozprawy nadmienię trzy. 1) Trzecia linia w Tabeli 2.1 powinna być zatytułowana "*Number of particles per bunch*" zamiast "*Bunch of particles per bunch*". 2) Na obrazku Fig. 2.3 linia BDS dla energii 380 GeV rozciąga się do niecałych 2000 m, podczas gdy tekst głosi, iż jej długość to 2200 m "*There is a significant difference in length between the energy stages, with 2200 m (...) at 380 GeV and 3100 m at 3 TeV*". 3) Akronim BDS został zdefiniowany, ale wbrew przyjętym praktykom, jest używany naprzemiennie z pełną nazwą w całej pracy. Ta uwaga dotyczy też innych akronimów np. SR.

W kolejnym Rozdziale 3 znajduje się opis oprogramowania używanego do analizy transportu wiązki w BDS (PyHEADTAIL), wpływu indukowanego pola na stabilność wiązek (Guinea-Pig) oraz emisji i oddziaływania promieniowania SR (PLACET, Synrad+) z materiałem rury akceleratora, jak również produkcji niepożądanych cząstek w oddziaływaniach z udziałem wiązek. W celu uzyskania pełnej symulacji odpowiedzi detektora na procesy tła użyto narzędzia GEANT4 w połączeniu z informacją o pełnej geometrii detektora w oparciu o iLCSoft oraz iLCDirac. **Sposób, w jaki ten rozdział jest napisany przekonuje czytelnika o bardzo dobrej znajomości tych narzędzi przez Doktoranta.** W drugiej części Rozdziału 3 znajdują się definicje wielkości używanych do obliczeń zajętości (z ang. occupancy) detektorów śladów oraz kalorymetrów. Z drobnych uwag do tej części rozprawy wymienię trzy. 1) W dyskusji oprogramowania PLACET znajduje się stwierdzenie “*A perfectly aligned beam line without any magnetic field errors is assumed.*”, które pozostawione jest bez komentarza czy wspomniane założenie jest spełnione. 2) Jak realistyczna i jak daleka od obecnie obowiązującej jest wersja geometrii CLIC_o3_v13 używana w dalszej analizie? 3) Ostatni wers na stronie 35: “*It takes into account account the uncertainty of the γ - γ luminosity spectrum (...)*”. Co to jest “the γ - γ ”?

W Rozdziale 4 Doktorant szczegółowo omawia procesy, w wyniku których produkowane jest tło pochodzące od oddziaływań wiązek. **Ważnym wynikiem Doktoranta jest wniosek, iż skład tego tła, jak również strumienie różnią się znacznie pomiędzy rozważanymi punktami pracy dla energii zderzenia 380 GeV oraz 3 TeV.** Dominującymi procesami tła przy niższej energii 380 GeV są: niekoherentna produkcja par $e+e-$, $\gamma\gamma \rightarrow$ hadrony, niekoherentna produkcja par $\mu+\mu-$. Natomiast przy najwyższej energii 3 TeV dodatkowo koherentna produkcja par $e+e-$ wnosi znaczny wkład do całkowitego tła. Istotnym wynikiem jest uzyskanie rozkładów kątowych i energetycznych dla poszczególnych rodzajów tła, jak również modyfikacji rozkładów świetlności, które są następstwem emisji promieniowania SR przez cząstki wiązki. Z drobnych uwag dotyczących tej części wymienię dwie. 1) Brak informacji o tym jak zdefiniowane są symbole na osi x na wykresach Fig.4.1? 2) Lewy panel wykresu Fig. 4.1: Jak interpretujemy spadek świetlności dla punktu o najwyższej wartości x dla procesu $e+e+$?

Rozdziały 5-8 stanowią najistotniejsze części rozprawy doktorskiej z punktu widzenia wkładu wniesionego przez Doktoranta. I tak w Rozdziale 5 znajduje się analiza optymalizacyjna rozmiaru otworu rury akceleratora na odcinku BDS z uwzględnieniem pól indukowanych w jej ścianie oraz wpływu tych pól na stabilność pracy wiązki. Rozważone zostały dwa rodzaje materiałów rury tzn. miedź oraz stal. **Wyniki optymalizacji otworu rury akceleratora stanowią ważny parametr wejściowy dla symulacji promieniowania SR,** którego dyskusja znajduje się w Rozdziale 6. Istotnym wynikiem jest wniosek, iż miedź ma lepszy wpływ na stabilność wiązek oraz profil świetlności niż stal. Natomiast minimalny promień rury akceleratora musi zostać powiększony z sugerowanej początkowo wartości 6 mm, aby zapewnić stabilność wiązek i optymalny rozkład świetlności wzdłuż ciągu pęczków. **Wyniki badań omówione w tym rozdziale zostały opublikowane w artykule konferencyjnym pod Ref. [69].**

W Rozdziale 6 Doktorant bada wpływ promieniowania SR na bezpieczeństwo i stabilność pracy akceleratora. Analiza prowadzi do ważnego stwierdzenie, iż **straty energetyczne z powodu promieniowania SR przy energii zderzenia 380 GeV są zaniedbywalne** w porównaniu z początkową energią oraz rozmyciem energetycznym wiązki. Natomiast **przy energii zderzenia wynoszącej 3 TeV straty te stają się znaczące i nie mogą zostać pominięte.** Emisja promieniowania SR ma negatywny wpływ na jakość wiązki poprzez zwiększenie jej rozmiaru poprzecznego. Podobne wnioski dotyczą średniej mocy promieniowania SR oraz towarzyszącego im wzrostu temperatury, które przy energii 380 GeV mogą zostać zaniedbane. Natomiast przy energii 3 TeV średnia moc promieniowania na metr jest około 90 razy większa, co prowadzi do znacznego wzrostu temperatury rury wiązki. Wreszcie rozdział kończy omówienie badania wpływu

promieniowania SR na poszczególne podsystemy detektora CLICdet. **Detektor wierzchołka jest najbardziej dotknięty przez to promieniowanie** z powodu jego bliskości do rury wiązki, jak również niskiego progu energetycznego potrzebnego do wygenerowania sygnału. Detektor śladów, z wyjątkiem pierwszej warstwy, otrzymuje dużo mniejsze dawki promieniowania. Przy energii zderzenia 380 GeV zajętość pierwszej warstwy detektora śladów osiąga poziom 2% w przypadku rury akceleratora o nieodbijającej powierzchni i około 20% w przypadku rury o gładkiej powierzchni. Przy energii zderzenia wynoszącej 3 TeV, nawet w przypadku rury o gładkiej powierzchni zajętość wynosi poniżej 1%. Rozdział 6 kończy się interesującą dyskusją metod, które mogą służyć obniżeniu wpływu fotonów SR na detektor (m.in. zmniejszenie gładkości rury akceleratora poprzez zastosowanie powierzchni w kształcie zębów piły w miejscach, gdzie dochodzi do odbić promieniowania SR).

W Rozdziale 7 zawarte są badania Doktoranta na temat wpływu tła pochodzącego od oddziaływań wiązek na poszczególne podsystemy detektora CLICdet. W szczególności tło od niekoherentnej produkcji par e^+e^- oraz $\gamma\gamma \rightarrow$ hadrony ma istotny wkład. W przypadku detektora wierzchołka i detektora śladów zajętości nie przekraczają dopuszczalnej wartości 3%. **W kalorymetrach w obszarze do przodu rejestrowana jest znacząca ilość cząstek pochodzących z tych procesów.** Depozyt energetyczny w tych rejonach jest na poziomie teraelektronowoltów. **System mionowy (MuonID) w obszarze do przodu znajduje się pod wielkim wpływem cząstek pochodzących od tła.** Zajętość tej części detektora osiąga wartość 100%.

Wreszcie w Rozdziale 8 **Doktorant optymalizuje geometrię detektora** w rejonach, które albo są dotknięte wysokim poziomem promieniowania, albo tam, gdzie promieniowanie jest niewielkie i zmiana geometrii może podnieść jakość parametrów rekonstruowanych obiektów. Proponowane zmiany dotyczą detektora wierzchołka, BeamCal, HCal oraz MuonID w obszarze do przodu. Obejmują one zmianę akceptancji, zwiększenie granularności lub wprowadzenie dodatkowych osłon przed promieniowaniem.

Z drobnych uwag do tych rozdziałów przedstawię dwie: 1) Na wykresach Fig. 6.19 w legendzie brakuje symbolu krzywej opisującej VTX 1. 2) Wykres Fig. 6.20: Co oznaczają zajętości detektora przekraczające wartość 100%?

Rozprawę doktorską kończy Rozdział 9, w którym znajduje się bardzo obszerne podsumowanie.


Rozprawę doktorską pana mgr Dominika Aromińskiego oceniam bardzo wysoko.

Dokumentuje ona w sposób bardzo przejrzysty i systematyczny badania wnoszące istotny wkład w rozwój i optymalizację przyszłego eksperymentu CLIC dla dwóch punktów pracy przy energiach zderzenia 380 GeV i 3 TeV. Każde z trzech zadań, których podjął się Doktorant, a które obejmują 1) wpływ promieniowania SR na pracę układu BDS oraz poszczególne podsystemy detektora CLICdet, 2) zbadanie efektów tła pochodzącego od oddziaływań wiązek oraz 3) wpływ indukowanego pola w ścianach rury akceleratora na stabilność wiązek, prowadzą do bardzo interesujących wniosków, które mają zasadniczy wpływ na stabilną i efektywną pracę przyszłego eksperymentu. Doktorant biele używa do symulacji dostępnego oprogramowania, gdzie tylko możliwe uzupełniając analizę o obliczenia analityczne.

Podsumowując, uważam, że rozprawa doktorska pana mgr Dominika Aromińskiego zatytułowana "Beam-induced Backgrounds at the Compact Linear Collider" demonstruje istotny wkład Doktoranta w rozwój międzynarodowego projektu akceleratora liniowego nowej generacji CLIC oraz jego optymalizacji przy uwzględnieniu warunku obniżenia wpływu tła pochodzącego od oddziaływań wiązek. Krytyczne uwagi zawarte w niniejszej recenzji nie umniejszają ogromnej

wartości rozprawy, jak również istotnego wkładu Doktoranta w projekt i rozwój przyszłego eksperymentu.

Recenzowana rozprawa doktorska spełnia warunki ustawowe stawiane rozprawom doktorskim stąd wnioskuję o dopuszczenie pana mgr Dominika Aromińskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Ponadto wnoszę o wyróżnienie rozprawy pana mgr Dominika Aromińskiego za istotny wkład w badania dotyczące przyszłego międzynarodowego projektu CLIC ze szczególnym naciskiem na analizę wpływu impedancji ścian rury akceleratora na stabilną pracę wiązek oraz optymalizację świetlności eksperymentu.


.....
Iwona Grabowska-Bołd