



dr hab. inż. Iwona Grabowska-Bołd
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica

Kraków, 2 maja 2018 roku

Recenzja rozprawy doktorskiej Pani mgr Anny Zaborowskiej pt. “Calorimetry for the Future Circular Collider Experiments”

Głównym celem rozprawy doktorskiej pani mgr Anny Zaborowskiej “Calorimetry for the Future Circular Collider Experiments” jest optymalizacja parametrów nowego detektora, jakim jest kalorymetr elektromagnetyczny, którego projekt jest integralną częścią międzynarodowych badań zmierzających w kierunku rozwoju nowej generacji eksperymentów fizyki wysokich energii. Badania wykonane w ramach tej pracy stanowią ważny wkład do Współpracy Future Circular Collider (FCC), która rozwija projekt nowego akceleratora kołowego, w którym zderzane będą wiązki protonów o energii 100 TeV w układzie środka masy. Projekt FCC, obok zderzacza SppS w Chinach, jest jednym z dwóch obecnie rozważanych eksperymentów hadronowych nowej generacji. Energia dostępna w zderzeniach na FCC będzie siedem razy wyższa niż nominalna energia pracy Wielkiego Zderzacza Hadronów (z ang. Large Hadron Collider, LHC), największego obecnie funkcjonującego akceleratora dostarczającego zderzeń proton-proton znajdującego się w laboratorium CERN w Genewie. Przyszłe badania w oparciu o dane zebrane przez FCC umożliwią poszukiwanie sygnałów fizyki spoza Modelu Standardowego (z ang. Standard Model, SM) w nowym zakresie energetycznym, niedostępnym do tej pory przez inne eksperymenty fizyki wysokich energii. Ponadto dane zebrane przez FCC dadzą możliwość precyzyjnych studiów własności bozonu Higgsa, odkrytego w roku 2012 na LHC, oraz pomogą udzielić odpowiedzi na pytania o źródło asymetrii materia-antymateria we Wszechświecie, czy o pochodzenie ciemnej materii i wiele innych.

Projekty przyszłych eksperymentów na FCC, w tym kalorymetru elektromagnetycznego, muszą zmierzyć się z ogromnymi wyzwaniem, jakimi są dużo większa świetność $3 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, większa krotność i pęd poprzeczny cząstek produkowanych w zderzeniach o energii 100 TeV, znaczący przekrój czynny na produkcję cząstek w tzw. obszarze do przodu, ogromna liczba zderzeń równoczesnych tzw. in-time pileup oraz nakładanie się sygnałów z wielu przecięć wiązek w detektorze tzw. out-of-time pileup z powodu dużej częstości próbkowania zderzeń. Ponadto nie do zaniebdania przy wyborze materiałów, z których zbudowane będą detektory jest wysoki poziom radiacji w eksperymencie.

We współczesnych eksperymentach ogólnego przeznaczenia na akceleratorach cząstek, kalorymetr elektromagnetyczny obok detektora śladów, kalorymetru hadronowego i spektrometru mionów, stanowi kluczowy system do pomiaru produktów zderzenia. Kalorymetr elektromagnetyczny służy do detekcji elektronów, pozytonów i fotonów produkowanych w wysokoenergetycznych zderzeniach. Wszystkie te cząstki stanowią istotne sygnatury przy precyzyjnych badaniach procesów SM, jak również w poszukiwaniu sygnałów fizyki spoza SM. Przy planowaniu kalorymetru dla eksperymentów na FCC, jako detektora referencyjnego wybrano kalorymetr elektromagnetyczny eksperymentu ATLAS, o podobnym rozmiarze do planowanego kalorymetru na FCC, a który udowodnił niezawodne działanie uczestnicząc w zbieraniu danych ze zderzeń proton-proton przy energiach 7, 8 i 13 TeV w układzie środka masy. Detektor ATLAS zbiera dane od roku 2010.

Rozprawa doktorska pani Zaborowskiej napisana jest w języku angielskim. Składa się z siedmiu rozdziałów oraz bibliografii liczącej 114 pozycji. Pracę otwiera zwięzły wstęp w Rozdziale 1, który przytacza główne tezy pracy. W Rozdziale 2 znajduje się wprowadzenie do projektu zderzacza FCC, którego planowany obwód to prawie 100 km, a jego rozważana lokalizacja to laboratorium CERN w Genewie, gdzie funkcjonuje zespół akceleratorów LHC, który może pełnić rolę wstępnego przyspieszania dla wiązek FCC. Ponadto w Rozdziale 2 znajduje się dyskusja programu fizycznego eksperymentów na FCC oraz wyzwań, które przed nimi stoją z powodu bardzo wymagających warunków zbierania danych. Doktorantka przytacza kilka przykładów fizycznych procesów referencyjnych, które pozwolą na pełne wykorzystanie potencjału FCC, a które nakładają surowe ograniczenia na parametry przyszłych detektorów, w tym również kalorymetru elektromagnetycznego. Na uwagę zasługuje dyskusja potencjału programu fizycznego FCC w zestawieniu z obecnie funkcjonującymi eksperymentami na LHC. Niestety Rozdział 2 nie jest wolny od drobnych błędów. Na stronie 7 Doktorantka przytacza przekroje czynne na podwójną produkcję bozonu Higgsa w złych jednostkach tj. fb^{-1} i pb^{-1} zamiast fb i pb . W opisie do Rysunku 2.7 zabrakło dyskusji krzywych dla energii 33 i 80 TeV. Użycie terminu “*initial states*” w zdaniu “*An increase of the centre-of-mass collision energy leads to the production of the initial states into a more forward region.*” jest niepoprawne. Powinno ono raczej brzmieć “*An increase of the centre-of-mass collision energy leads to the particle production into a more forward region.*”

W Rozdziale 3 omawiane są zagadnienia związane z kalorymetrią w fizyce wysokich energii. Rozpoczyna się on od dyskusji oddziaływania elektronów, pozytonów i fotonów z materią, a następnie zawiera opis procesu produkcji kaskady elektromagnetycznej. W dalszej części tego rozdziału omówiona jest zasada działania kalorymetrów elektromagnetycznych oraz wielkości, które służą do opisu działania takich detektorów. Rozdział kończy przegląd kalorymetrów elektromagnetycznych albo funkcjonujących (ATLAS i CMS), albo rozwijanych na potrzeby przyszłych eksperymentów (projekty Współpracy CALICE oraz RD52). Z drobnych uwag dotyczących tej części rozprawy wymienię kilka. Wzór (3.11) zawiera niezdefiniowaną wielkość “*y*”. Dalej natężenie pola elektrycznego jest wyrażone w złej jednostce tzn. $[\text{kV}^{-1} \text{mm}^{-1}]$ zamiast $[\text{kV} \text{mm}^{-1}]$. Na uwagę zasługuje fakt, że Doktorantka wybrała niestandardowy sposób definiowania wzorów w całym tekście rozprawy. Pełny wzór przytaczany jest dopiero po tym, jak pojawi się do niego odnośnik w tekście. Stąd też, w niektórych miejscach rozprawy ma się wrażenie, że złamana jest spójność tekstu. Niestety pewny niedosyt po przeczytaniu rozprawy pozostawia dyskusja wielkości jaką jest rozdzielczość pomiaru pozycji, której poświęcony został mały akapit na końcu części 3.3.3. A jak Doktorantka przekonuje, zwłaszcza w przypadku detekcji fotonów, kalorymetr elektromagnetyczny jest jedynym źródłem informacji na temat pozycji tej cząstki.

Rozdziały 4, 5 i 6 stanowią najważniejszą część rozprawy doktorskiej. Omówione są tam wyniki badań wykonanych przez panią mgr Zaborowską. Rozdział 4 poświęcony jest opisowi symulacji przejścia cząstek przez kalorymetr elektromagnetyczny detektora FCC. **Kod do symulacji został przygotowany przez Doktorantkę, co jest jej istotnym wkładem do Współpracy FCC. Znalazł on zastosowanie nie tylko w studiach wykonanych na użytek badań prezentowanych w niniejszej rozprawie, ale również jest on wykorzystywany do symulacji odpowiedzi detektora przez Współpracę FCC.** Implementacja zawiera zarówno tzw. szybką symulację (z ang. fast simulation), która jest kluczowa w przypadku studiów opartych o duże statystyki cząstek, jak również pełną symulację (z ang. full simulation), która jest nawet dwa rzędy wielkości razy wolniejsza. Z drobnych uwag do tego rozdziału wymienię brak informacji na stronie 56 na temat bezwzględnych liczb dla zasobów CPU zużytych na symulację przez eksperymenty LHC. Przytoczone procentowe zużycie zasobów nie daje w tym przypadku pełnego wyczucia skali zasobów zużywanych na produkcję próbek z symulacją detektora. A bez wątpienia są one ogromne. Rysunek 4.3 przedstawia mierzony rozkład pędu elektronów w detektorze śladów o symulowanej wartości 20 GeV, a nie 10 GeV, jak podano w tekście. Wzory (4.6) i (4.7) zawierają wielkości l_1 - l_4 , które nie zostały zdefiniowane. W dyskusji Rysunku 4.6 zabrakło komentarza na temat spodziewanych wyników dla innych niż elektrony typów cząstek.

Rozdział 5 poświęcony jest projektowi i optymalizacji parametrów kalorymetru elektromagnetycznego dla eksperymentów FCC. **W badania nad tymi zagadnieniami Doktorantka wniosła kluczowy wkład.** Jako detektor referencyjny wybrała kalorymetr eksperymentu ATLAS, który ma podobne rozmiary geometryczne, używa technologii z ciekłym argonem odpornej na promieniowanie, a który został z sukcesem zbudowany i funkcjonuje dostarczając wysokiej jakości danych ze zderzeń proton-proton na LHC od roku 2010. W tej części rozprawy znajduje się dyskusja wymagań dla wymiarów geometrycznych, materiału, geometrii, włączając liczbę podłużnych warstw detektora oraz ich kątów nachylenia, grubości oraz liczby warstw absorbera i segmentacji w pseudopospieszności. Wyniki dla zoptymalizowanego kalorymetru elektromagnetycznego podsumowane są w części 5.2.6. Ważnym elementem tego rozdziału jest dyskusja poprawki z powodu straty części energii cząstek w oddziaływaniu w materiale znajdującym się przed kalorymetrem. Po uwzględnieniu tej poprawki, osiągnięta rozdzielczość pomiaru energii dla części centralnej kalorymetru tzw. barrel dla $|\eta|=0$ jest lepsza niż wartość założona w projekcie (por. Rysunek 5.22). Jednak wynik ten słusznie opatrzony jest komentarzem, że wielkość ta zmierzona została przy pewnych uproszczeniach, których wpływ należy zrozumieć. Niemniej jednak rokowania na przyszłość są bardzo dobre. Z drobnych uwag do tego rozdziału wymienię: Rysunek 5.5 (jak i jemu podobne) zawiera ciągle krzywe, których znaczenia nie podano ani w opisie wykresu, ani w tekście. Część 5.2.2 kończy zdanie "*All the results presented in this thesis are calibrated with the sampling fraction obtained from the simulation of 50–200 GeV electrons, presented in Fig. 5.6b.*" Nasuwa się pytanie na jakiej podstawie użycie jednakowej kalibracji jest uzasadnione dla innych, niż elektrony, rodzajów cząstek? Symbole użyte dla punktów pomiarowych z Rysunku 5.7 nie odpowiadają tym z legendy. W równaniach (5.4) i (5.5) jeden z parametrów P_{01} powinien być oznaczony P_{10} . Na stronie 93 znajduje się referencja do Rysunku 5.19 przy dyskusji zależności parametrów P_{00} - P_{11} od $|\eta|$ dla tzw. obszaru endcap. Niestety wykres ograniczony jest do zakresu $|\eta|<1.1$, a więc nie pokrywa obszaru do przodu dla $|\eta|>1$. Rysunek 5.24 pozostawia bez komentarza fakt, iż trzy krzywe rozdzielczości pomiaru energii dla elektronów, pozytonów i fotonów są w zgodzie. Dla przykładu na Rysunku 5.22 krzywa dla fotonów jest znacząco różna od tej dla elektronów i pozytonów w obszarze centralnym.

Rozdział 6 poświęcony jest procedurze rekonstrukcji, która służy przetłumaczeniu sygnałów z detektora na fizyczne obiekty, jakimi są energia czy pęd cząstki wyprodukowanej w zderzeniu. W rozprawie dyskutowane są dwa algorytmy rekonstrukcji energii klastrow elektromagnetycznych: algorytm przesuwającego okna oraz metoda topologicznych klastrow. Obie metody używane są do rekonstrukcji klastrow w kalorymetrze elektromagnetycznym eksperymentu ATLAS. Doktorantka prezentuje wyniki działania procedury rekonstrukcji na przykładzie pojedynczych elektronów. Rozdzielczość pomiaru energii przedstawiona jest na Rysunku 6.5 i jest ona w dość dobrej zgodzie z wynikami prezentowanymi wcześniej na Rysunku 5.22, które otrzymane zostały bez udziału rekonstrukcji. Z uwagi na to rozdział wymienię: Tabela 6.2 zawiera niepotrzebne powtórzenie wartości parametrów P_{00} - P_{11} , które dyskutowane były już wcześniej na Rysunku 5.19. Ponadto dla parametru $P_{10}(|\eta|=0)$ podana jest w tabeli błędna wartość. Przy okazji nasuwa się jednak pytanie czy w procedurze kalibracji energii cząstek używane są dyskretne wartości parametrów P_{00} - P_{11} z Tabeli 6.2, czy też raczej należałoby rozważyć dopasowanie funkcji do punktów pomiarowych z Rysunku 5.19, który demonstruje, jak silnie mogą się zmieniać wartości parametrów w podanym zakresie $|\eta|$? Stwierdzenie na temat metody topologicznych klastrow “*This reconstruction is more complex and is used for the reconstruction in the forward calorimetry of ATLAS [114] and to reconstruct jets and the missing transverse energy [113].*” nie jest w pełni poprawne. Od początku roku 2017 eksperyment ATLAS używa metody klastrow topologicznych jako domyślnej procedury do rekonstrukcji elektronów i fotonów w kalorymetrze. Oczywiście Doktorantka miała prawo tego nie wiedzieć.

Rozprawę doktorską kończy Rozdział 7, w którym znajduje się podsumowanie.

Rozprawa doktorska pani mgr Anny Zaborowskiej napisana jest bardzo klarownie. Prezentowane wykresy są czytelne, zaopatrzone w legendę i opis. Na uwagę zasługuje fakt, iż w rozprawie doktorskiej większość wykresów, które nie są autorstwa Doktorantki posiada referencję do oryginalnej publikacji, z której pochodzą. Na marginesie, przykładem wykresu spoza pracy, dla którego zabrakło referencji jest Rysunek 2.9. Drobnym niedociągnięciem strony edytorskiej rozprawy jest sporadyczny brak przedimków przed rzeczownikami.

Wszystkie symulacje, których wyniki prezentowane są w rozprawie doktorskiej wykonane zostały dla pojedynczych cząstek. Tak przebiega zawsze pierwszy etap badań nowego detektora, kiedy liczba narzędzi dostępnych w projekcie jest ograniczona, a każde bardziej zaawansowane badania wymagają przygotowania nowych narzędzi od podstaw. Doktorantka zdaje sobie z tego ograniczenia sprawę i podkreśla przy wielu okazjach, że kolejnym etapem badań będzie analiza rzeczywistych przypadków ze zderzeń proton-proton przy nominalnej energii. W tym kontekście nasuwa się pytanie, jak bardzo wyniki dla rzeczywistych zderzeń uwzględniające nakładające się przypadki (in-time oraz out-of-time pileup) będą odbiegać od przyjętych założeń?

Podsumowując, uważam, że rozprawa doktorska pani mgr Anny Zaborowskiej zatytułowana “*Calorimetry for the Future Circular Collider Experiments*” demonstruje bardzo ważny wkład Doktorantki w rozwój oprogramowania, projektu i optymalizacji kalorymetru elektromagnetycznego dla eksperymentów nowej generacji na FCC. Krytyczne uwagi zawarte w niniejszej recenzji nie umniejszają ogromu wkładu Doktorantki w projekt i rozwój przyszłego eksperymentu.

Recenzowana rozprawa doktorska spełnia warunki ustawowe stawiane rozprawom doktorskim stąd wnioskuję o dopuszczenie pani mgr Anny Zaborowskiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

.....*Grabowska-Bold*.....
Iwona Grabowska-Bold