



dr hab. Ewa Stanecka, prof. IFJ PAN
Instytut Fizyki Jądrowej PAN
32-342 Kraków
Radzikowskiego 152

Kraków, 11.06.2019 r.

Recenzja rozprawy habilitacyjnej pt.
„Radiation damage in the LHCb Vertex Locator.
First observation of $B_S^0 \rightarrow D_S^{\mp} K^{*\pm}$ decay”
oraz ocena dorobku naukowego dr Agnieszki Obłąkowskiej-Muchy w postępowaniu
kwalifikacyjnym o nadanie stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk
fizycznych w dyscyplinie fizyka

Podstawą wniosku o nadanie dr Agnieszce Obłąkowskiej-Musze stopnia naukowego doktora habilitowanego jest osiągnięcie naukowe zatytułowane „**Radiation damage in the LHCb Vertex Locator. First observation of $B_S^0 \rightarrow D_S^{\mp} K^{*\pm}$ decay**” przedstawione w postaci monografii w języku angielskim, wydrukowanej nakładem wydawnictwa JAK, Kraków 2018, ISBN 978-83-64506-60-4.

Osiągnięcie naukowe związane jest z kilkunastoletnim zaangażowaniem Autorki monografii w eksperymencie LHCb przy Wielkim Zderzaczu Hadronów (LHC) w CERN. LHCb jest jednym z czterech głównych eksperymentów na LHC. Jego program fizyczny jest ukierunkowany na fizykę mezonów B, głównie na pomiary parametrów łamania kombinowanej symetrii parzystości oraz symetrii ładunku w oddziaływaniach hadronów b , poszukiwania rzadkich rozpadów mezonów B oraz poszukiwania tzw. nowej fizyki czyli zjawisk poza Modelem Standardowym cząstek.

We współpracy naukowej LHCb uczestniczy kilkusobowy zespół z Wydziału Fizyki i Informatyki stosowanej AGH w Krakowie. Pani dr Agnieszka Obłąkowska-Mucha dołączyła do tego zespołu po doktoracie tj. w 2002 r. i od tego czasu, pracując na wielu etapach eksperymentu LHCb, zdobywała wszechstronne doświadczenie jako fizyk eksperymentalny. Habilitantka działała na wielu różnych polach związanych z eksperymentowaniem LHCb: od generacji przypadków i symulacji odpowiedzi detektora, poprzez analizę danych, do optymalizacji algorytmów dla trygera wysokiego poziomu oraz badań uszkodzeń radiacyjnych w sensorach krzemowych. Brała również udział w dyżurach przy detektorze jako kierownik zmiany i jako kontroler zbierania danych.

Przy ocenie osiągnięć naukowych Habilitantki należy więc wziąć pod uwagę szeroki zakres jej ekspertyzy jak również specyfikę pracy w ustrukturyzowanych ramach dużej międzynarodowej kolaboracji.

Ocena osiągnięcia naukowego

Przedstawiona przez Habilitantkę monografia zawiera opis dwóch wykonanych przez nią projektów w ramach eksperymentu LHCb. Pierwszy z nich dotyczy zniszczeń radiacyjnych w detektorze wierzchołka spektrometru LHCb, a drugi obserwacji procesu $B_S^0 \rightarrow D_S^{\mp} K^{*\pm}$. Osiągnięcie składa się siedmiu rozdziałów oraz bibliografii i jest opatrzone przedmową.

Rozdział pierwszy zwięźle przedstawia spektrometr LHCb, z uwzględnieniem opisu rekonstrukcji śladów i wierzchołków oraz detektora wierzchołka. W kolejnych trzech



rozdziałach przedstawione są zagadnienia związane z uszkodzeniami radiacyjnymi w detektorach krzemowych.

Rozdział drugi stanowi systematyczne wprowadzenie do zasad działania sensorów krzemowych ze złączem p-n oraz mechanizmów prowadzących do uszkodzeń radiacyjnych sensorów pod wpływem promieniowania. Rozdział ten dość szczegółowo omawia rodzaje defektów powstających na skutek przechodzenia przez sensory strumienia cząstek, jak również wpływ tych uszkodzeń na makroskopowe własności półprzewodnika, a co za tym idzie wydajność pomiarową detektora.

W rozdziale trzecim przedstawione są wyzwania jakim musi sprostać detektor VELO, ze względu na ekstremalne warunki radiacyjne na jakie jest narażony. Jednym z najważniejszych parametrów wejściowych w modelowaniu uszkodzeń radiacyjnych sensorów krzemowych jest całkowita fluencja cząstek przez nie przechodzących. Dokładny, bezpośredni pomiar fluencji cząstek, zwłaszcza w warstwach detektora położonych najbliżej wiązek nie jest możliwy, zatem zachodzi potrzeba jak najlepszego jej oszacowania na podstawie symulacji. Rozdział trzeci zawiera opis symulacji fluencji cząstek dla detektora wierzchołka VELO, wykonanych przez Habilitantkę przy użyciu środowiska FLUKA dla aktualnej geometrii detektora, dla obu dotychczasowych okresów zbierania danych Run I oraz Run II. Symulacje te przebiegały dwuetapowo. Pierwszy etap polegał na generacji przypadków zderzeń proton-proton za pomocą wbudowanego generatora FLUKI oraz analizie spektrum wyprodukowanych w zderzeniach cząstek. Drugi etap łączył generację zderzeń proton-proton z symulacją transportu wyprodukowanych cząstek przez detektor. Głównym wynikiem opisanych symulacji było wyznaczenie centralnej wartości fluencji cząstek dla wszystkich sensorów w detektorze VELO. Wartości te wahają się od $8.5 \times 10^{12} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2/\text{fb}^{-1}$ dla $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ do $1.1 \times 10^{13} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2/\text{fb}^{-1}$ przy $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$. Wykonana przez Autorkę symulacja fluencji wyznaczyła jej centralną wartość o 15% wyższą niż w poprzednio przeprowadzonych analizach tego typu dla okresu Run I, wykonanych za pomocą generatora przypadków Phytia8 oraz pakietu GEANT4 do symulowania przejścia cząstek przez materiał detektora. Autorka komentuje, że oba wyniki są zgodne, biorąc pod uwagę duże niepewności systematyczne w modelowaniu.

W rozdziale czwartym monografii przedstawione są metody i wyniki monitorowania uszkodzeń radiacyjnych w sensorach detektora VELO na podstawie danych zebranych w latach 2011-2018. Ponieważ prąd upływu w sensorach krzemowych zależy liniowo od fluencji dla szerokiego zakresu substratów krzemowych, to jego pomiar dostarcza prostej i dokładnej metody badania uszkodzeń radiacyjnych. Długoterminowe pomiary prądów upływu w detektorze VELO, pokazują liniową zależność od dostarczonej świetlności oraz zgodność z przewidywaniami stosowanego modelu w granicach błędu. Podczas obu sezonów zbierania danych przeprowadzano również regularne pomiary zależności prądów upływu od temperatury sensorów, charakterystyki prądowo-napięciowe. Na podstawie pomiarów wyznaczano parametry związane z uszkodzeniami radiacyjnymi sensorów, np. efektywną przerwę energetyczną w funkcji położenia sensora, czy efektywną stałą zniszczeń. W wynikach można dostrzec zmniejszanie się efektywnej przerwy energetycznej wraz ze wzrostem całkowitej dostarczonej świetlności, co zgadza się z cytowanymi przez Habilitantkę pomiarami laboratoryjnymi. Efektywne napięcie zubożenia (EDV) sensorów było regularnie mierzone podczas specjalnych pomiarów efektywności zbierania ładunku w sensorze, w zależności od przyłożonego napięcia polaryzującego w czasie zbierania danych. Parametr EDV odzwierciedla zmiany efektywnego domieszkowania materiału sensora w czasie na skutek akumulacji defektów radiacyjnych, a co za tym idzie pozwala monitorować zjawisko tzw. inwersji typu. Regularne monitorowanie EDV pozwala na bieżącą optymalizację



punktów pracy detektora. Ewolucja parametru EDV w zależności od fluencji jest porównywana z tzw. modelem Hamburgskim, co pozwala na przewidywanie wysokości napięć operacyjnych w kolejnych etapach działania eksperymentu. Ostatnia sekcja rozdziału czwartego opisuje interesujący efekt stopniowego spadku efektywności zbierania ładunku, a co za tym idzie spadku efektywności znajdowania klastrów (CFE) w sensorach typu R. Przed napromieniowaniem parametr ten wynosił ponad 99%, a po zebraniu scałkowanej świetlności 1.15 fb^{-1} , spadł nawet do $\sim 90\%$ w zewnętrznych rejonach sensorów. Efekt ten jest kombinacją skutków uszkodzeń radiacyjnych w detektorze oraz specyficznej budowy sensora z radialnie ułożonymi liniami przewodzącymi sygnał z mikropasków do peryferyjnej elektroniki odczytu. Wpływ degradacji efektywności znajdowania klastrów na efektywność rekonstrukcji śladów jest minimalizowany przez odpowiednie techniki w procesie rekonstrukcji. Opisany przykład wyraźnie pokazuje fundamentalną rolę monitorowania i analizy uszkodzeń radiacyjnych detektorów dla uzyskania dobrej jakości danych do analiz fizycznych.

Rozdziały 5-7 monografii poświęcone są analizie wykonanej przez Habilitantkę w kierunku pierwszej obserwacji rzadkiego rozpadu $B_S^0 \rightarrow D_S^\mp K^{*\pm}$. Pierwsze kilka sekcji rozdziału piątego stanowi wstęp teoretyczny do oddziaływań słabych i mechanizmu łamania symetrii CP w Modelu Standardowym. Następnie Autorka dyskutuje potencjał badawczy procesów z rodziny $B \rightarrow DX$ w LHCb, do wyznaczania kąta γ trójkąta unitarności macierzy CKM, oraz do obserwacji efektów fizyki poza Modelem Standardowym. Ponieważ stosunek rozgałęzień rozpadu $B_S^0 \rightarrow D_S^\mp K^{*\pm}$ nie został dotychczas zmierzony, Autorka rozpoczęła swoje studia od oszacowania tej wartości i obliczenia liczby spodziewanych przypadków sygnału. W zasadniczej części dotyczącej analizy szczegółowo opisana została kilkietapowa selekcja przypadków. Po wstępnej selekcji przypadków na podstawie cięć kinematycznych, zastosowano metody wielowymiarowe z odpowiednio wytrenowanymi narzędziami tzw. „*Boosted Decision Tree*”, co pozwoliło na wyraźną redukcję tła kombinatorycznego. W selekcji końcowej użyto zmiennych identyfikujących piony i kaony oraz podzielono przypadki na klasy odpowiadające konkretnym typom rozpadów mezonów B^0 i B_S^0 . Na podstawie dopasowań do rozkładów masy niezmienniczej wyselekcjonowanych przypadków, wyznaczono liczbę przypadków sygnału i obliczono stosunek rozgałęzień dla procesu $BR(B_S^0 \rightarrow D_S^\mp K^{*\pm}) = (4.2 \pm 0.53) \cdot 10^{-4}$. W końcowej sekcji rozdziału piątego Habilitantka opisuje plany dotyczące kontynuacji rozpoczętych studiów w kierunku obserwacji rozpadu $B_S^0 \rightarrow D_S^\mp K^{*\pm}$ oraz oszacowania stosunku rozgałęzień dla tego procesu. W oparciu o dane z modeli Monte Carlo, Autorka planuje oszacować tło inne niż kombinatoryczne, wkłady od tzw. przesłuchów i odbić pomiędzy rozpadami B^0 i B_S^0 oraz efekty detektorowe. Do analizy użyto danych zebranych w latach 2010-2017, próbka odpowiadała scałkowanej świetlności 6.71 fb^{-1} . W przyszłości analiza będzie przeprowadzona na pełnej próbce dotychczas zebranych danych na LHC do końca 2018 roku, wraz z wyznaczeniem niepewności systematycznych.

W szóstym rozdziale monografii Autorka opisuje perspektywy i wyzwania w proponowanym pomiarze kąta γ macierzy CKM przy użyciu procesu $B_S^0 \rightarrow D_S^\mp K^{*\pm}$. Pomiar ten będzie możliwy po zebraniu większej ilości danych w Run III.

Rozdział siódmy stanowi podsumowanie.



Uwagi szczegółowe:

Monografia, wraz z zebraną bibliografią zawierającą ważne aktualne opracowania, może służyć jako materiał edukacyjny dla osób rozpoczynających pracę w tematyce eksperymentalnej fizyce cząstek.

Monografia napisana jest przejrzyście, z dużą starannością, z niewielką liczbą usterek redakcyjnych i nieścisłości. Kilka z nich, które utrudniły mi czytanie rozprawy przytaczam poniżej. Jednak nie pomniejszyły one wartości całej monografii.

- Przy podawaniu wyników obliczeń średnich wartości fluencji w podsumowaniu wyników symulacji na str. 60, wkraść się błąd edycyjny, który został powtórzony w Autoreferacie. Z wykresu 3.16a, można odczytać, że średnia wartość fluencji w najbardziej napromieniowanych sensorach przy $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ wynosi $8.5 \times 10^{12} n_{eq} / \text{cm}^2 / \text{fb}^{-1}$, a nie jak podano $8.5 \times 10^{13} n_{eq} / \text{cm}^2 / \text{fb}^{-1}$.
- W tabeli 4.1 wartość E_{eff} podana dla świetlności 2.7 fb^{-1} wynosi $1.56 \pm 0.002 \text{ eV}$. Nie wpisuje się ona w obserwowaną tendencję zmniejszania się efektywnej przerwy energetycznej wraz z napromieniowaniem, a ponadto jest zaskakująco wysoka, wyższa nawet od wartości podawanej w literaturze dla krzemu przed napromieniowaniem tj. $1.214 \pm 0.0014 \text{ eV}$. W tekście monografii nie jest to skomentowane, co może sugerować błąd edycyjny.
- Naoczne porównanie przewidywań modelu hamburskiego dla parametru EDV z pomiarami wykonanymi w czasie trwania eksperymentu, a w szczególności ocena ich zgodności na jednym wykresie, byłyby interesujące dla czytelnika. Niestety, wykres 4.13, wbrew temu co można przeczytać w jego opisie, nie pokazuje zmierzonych wartości parametru EVD do roku 2016, a jedynie krzywe przewidywań modelu.

Znaczenie otrzymanych wyników:

Eksperyment LHCb odgrywa obecnie najważniejszą rolę w badaniach sektora kwarkowego fizyki zapachu. Dostarczane wyniki badań dynamiki oddziaływań słabych osiągają niespotykaną dotąd precyzję. Pani dr Agnieszka Obłąkowska-Mucha jest uczestnikiem współpracy LHCb od kilkunastu lat. Na różnych etapach pracy eksperymentu wniosła swój wkład do wielu dziedzin, od generacji przypadków i symulacji odpowiedzi detektora, poprzez analizę danych, do optymalizacji algorytmów dla trygera wysokiego poziomu oraz badań uszkodzeń radiacyjnych w sensorach krzemowych. Ważna część jej działalności skoncentrowana jest na badaniu uszkodzeń radiacyjnych detektora VELO. Jest to kluczowa część aparatury pomiarowej umożliwiającej precyzyjną rekonstrukcję śladów cząstek naładowanych i wierzchołków oddziaływań. Jej analizy i opracowania na temat uszkodzeń radiacyjnych pozwalają na lepsze zrozumienie odpowiedzi detektora VELO, a co za tym idzie mają duży wpływ na jakość całego zbieranego materiału badawczego i precyzję wyników uzyskanych w eksperymencie. Wyniki analiz są również ważnym wkładem do prac prowadzonych przez organizację RD50 w kierunku opracowania nowych rozwiązań detektorów dla przyszłych eksperymentów.

Wyniki analizy procesu $B_S^0 \rightarrow D_S^\mp K^{*\pm}$ opublikowane w monografii można potraktować jako badania pilotażowe, jednoznacznie wskazujące na możliwość pierwszej obserwacji tego procesu na podstawie danych zebranych przez LHCb do 2018 oraz perspektywy pomiarów kąta gamma macierzy CKM przy użyciu tego procesu po zebraniu większej ilości danych w Run III. Jestem przekonana, że kolejnym krokiem Autorki będzie publikacja pełnej analizy, na kompletnej próbce dotychczas zebranych danych, jako oficjalnego wyniku eksperymentu LHCb.



Ocena aktywności naukowej (dorobku naukowego, dydaktycznego i organizacyjnego oraz współpracy międzynarodowej) Habilitantki

Oceny dorobku naukowego dr Agnieszki Obłąkowskiej-Muchy dokonałam na podstawie otrzymanych dokumentów:

- Autoreferatu
- Wykazu dorobku naukowego
- Listu polecającego of prof. Gaya Wilkinsona, przedstawiciela współpracy LHCb (*spokeperson*)
- Listu polecającego od dr Michaela Molla, przedstawiciela kolaboracji CERN-RD50

Dorobek publikacyjny Habilitantki w czasopismach międzynarodowych znajdujących się w bazie Journal Citation Report (JCR) liczy 535 pozycji, których liczba cytowań według bazy Web of Science wynosi ponad 14 tysięcy, a indeks Hirsha według tej samej bazy wynosi 52. Są to typowe wartości wskaźników scientometrycznych dla uczestników wielkich kolaboracji. Ogromna większość publikacji jest wieloautorska, co również jest typowe dla dużych eksperymentów. Habilitantka wśród nich wyróżniła 15 pozycji, w których miała znaczący wkład, w tym 14 związanych z jej działalnością w LHCb (4 jednoautorskie doniesienia konferencyjne, 2 prace dwuautorskie, 7 prac wieloautorskich) oraz jedną publikację z 2003 roku dotyczącą badań w eksperymencie DELPHI. Ponadto, Habilitantka wykazała dwie pozycje spoza czasopism znajdujących się w bazie JCR: dwuautorską notę eksperymentu LHCb oraz doniesienie konferencyjne przyjęte do druku. Taki dorobek publikacyjny to dobry wynik w kontekście pracy w dużym międzynarodowym zespole, który ma dosyć sztywne zasady publikowania wyników kolaboracji. Należy zauważyć, że opracowania Habilitantki na temat uszkodzeń radiacyjnych i optymalizacji pracy detektora VELO, czy rekonstrukcji torów stanowią nieodzowny element w procesie zbierania i analizy danych. Wpływają zatem na całość zbieranego materiału doświadczalnego, a w konsekwencji na jakość wszystkich publikowanych wyników fizycznych.

Z dostarczonej dokumentacji można się dowiedzieć, że w latach 2012-2018 dr Obłąkowska-Mucha wygłosiła 14 referatów na konferencjach, sympozjach, warsztatach oraz seminariach o międzynarodowym zasięgu. Kilka ze wspomnianych referatów wygłoszonych na znaczących międzynarodowych konferencjach dotyczyło wyników fizycznych eksperymentu prezentowanych w imieniu współpracy LHCb. Powierzenie dr Obłąkowskiej-Musze prezentacji wyników na międzynarodowych konferencjach naukowych przez współpracę LHCb, potwierdza jej znaczący wkład w całość programu badawczego eksperymentu.

Jednym z kryteriów oceny dorobku naukowego habilitanta jest jego udział w projektach badawczych. Habilitantka była wykonawcą w pięciu takich krajowych projektach. Od 2017 roku jest kierownikiem 3-letniego grantu OPUS, który pozwolił jej utworzyć grupę badawczą na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH w Krakowie. Grupa ta zajmuje się symulacjami fluencji i studiami nad ewolucją prądów upływu w VELO, a w perspektywie badaniami własności detektorów półprzewodnikowych dla projektu High Luminosity LHC. Kierownictwo grantu i grupy badawczej niewątpliwie potwierdza dużą samodzielność naukową Habilitantki w prowadzeniu badań oraz aktywność w pozyskiwaniu środków na badania. Swoje talenty organizatorskie Habilitantka wykorzystywała pełniąc różne funkcje w komitetach organizacyjnych konferencji, spotkań i warsztatów o międzynarodowym zasięgu.



Działalność dydaktyczną i popularyzatorską dr Agnieszki Obłąkowskiej-Muchy oceniam bardzo dobrze. Była ona promotorem pięciu prac magisterskich oraz sześciu inżynierskich, a także promotorem pomocniczym w jednej pracy doktorskiej. Na wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH UST prowadziła serie wykładów zarówno w języku polskim jak i angielskim. Zakres tematyki tych zajęć jest dosyć szeroki – od podstaw fizyki, cząstek elementarnych i ich oddziaływań, przez metody eksperymentalne w fizyce, do rachunku prawdopodobieństwa i opracowania wyników pomiarów. Habilitantka prowadziła aktywną działalność popularyzatorską, organizowała duże imprezy popularyzatorskie jak „Noc Naukowców”, Warsztaty Małopolskiej Chmury Edukacyjnej, warsztaty w studenckim kole naukowym BOSON, warsztaty dla uczniów szkół średnich „CERN Master Classes”, a także wycieczki do CERNu dla studentów AGH w programie „Prymusi”.

Mimo, że Habilitantka wymieniła w wykazie osiągnięć tylko jeden 3-miesięczny staż zagraniczny w okresie poddoktorskim, to jednak nie ulega wątpliwości, że prowadzi ona intensywną współpracę zagraniczną z naukowcami z całego świata w ramach kolaboracji LHCb oraz RD50. Jej działania oraz plany naukowe są doceniane i popierane przez te międzynarodowe środowiska, o czym świadczą przedstawione listy rekomendacyjne od Prof. Guya Wilkinsona oraz dr Michaela Molla. W dzisiejszych czasach, kiedy możliwości komunikacji zdalnej z całym światem są właściwie nieograniczone, rola staży zagranicznych w nawiązywaniu kontaktów naukowych zdecydowanie traci na ważności.

Dr Agnieszka Obłąkowska-Mucha aktywnie współpracuje z grupami naukowymi w Polsce w ramach konsorcjum LHCb-PL.

Pani dr Agnieszka Obłąkowska-Mucha jest naukowcem o dużym doświadczeniu i wiedzy w dziedzinie fizyki zapachów oraz uszkodzeń radiacyjnych w detektorach krzemowych. Jest cenionym autorytetem w międzynarodowych zespołach badawczych LHCb oraz RD50. Posiada znaczny dorobek naukowy, który spełnia wymagania ustawowe stawiane kandydatom do stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk fizycznych.

Podsumowanie

Podsumowując moją recenzję stwierdzam, że zarówno przedstawiona rozprawa habilitacyjna dr Agnieszki Obłąkowskiej-Muchy, jak i zaprezentowany dorobek naukowy, uczestnictwo we współpracy międzynarodowej oraz dorobek dydaktyczny i popularyzatorski, w mojej ocenie, spełniają wymogi ustawowe stawiane w tym zakresie kandydatom do stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk fizycznych w zakresie fizyki. W związku z tym popieram wniosek o nadanie doktor Agnieszce Obłąkowskiej-Musze stopnia doktora habilitowanego nauk fizycznych.

Ewa Stanecka