



Prof. dr hab. Piotr Salabura  
Instytut Fizyki im. M. Smoluchowskiego  
ul. Prof. Łojasiewicza 11  
Uniwersytet Jagielloński  
30-348 Kraków

14.06. 2017  
Kraków

**Ocena osiągnięcia naukowego przedstawionego do postępowania habilitacyjnego  
oraz dorobku naukowego, dydaktycznego i organizacyjnego  
dr. Agnieszki Obląkowskiej-Muchy**

**Charakterystyka dorobku naukowego .**

Dorobek naukowy dr. Obląkowskiej-Muchy jest związany z dużymi eksperymentami w Fizyce Wysokich Energii przeprowadzanymi w CERN. Po uzyskaniu magisterium na Wydziale Fizyki i Techniki Jądrowej na AGH dr. Obląkowska-Mucha uczestniczyła w eksperymencie DELPHI na zderzaczu LEP uzyskując w roku 2002 tytuł doktora nauk fizycznych prezentując rozprawę „Obserwacja rezonansu  $\eta_c(2980)$  poprzez rozpad czterocząstkowe w oddziaływaniach foton-foton w eksperymencie DELPHI”. Po obronie doktoratu dr. Obląkowska-Mucha rozpoczęła pracę badawczą w eksperymencie LHCb, pracującym na zderzaczu LHC. Detektor LHCb jest jednym z czterech podstawowych urządzeń pomiarowych na LHC, nakierowany na fizykę mezonów B, w szczególności badania łamania parzystości CP w rozpadach zawierających przejścia kwarkowe  $b \rightarrow u$ ,  $b \rightarrow c$  oraz poszukiwań fizyki z poza modelu standardowego. Jego główną zaletą w porównaniu do fabryk mezonów B, używających anihilacji pozytron-elektron, są znacznie większe przekroje czynne na produkcję par  $b\bar{b}$  ( $\sim 500 \mu\text{b}$  przy  $\sqrt{s}=13 \text{ TeV}$  w porównaniu  $\sim 1\text{nb}$  dla  $e^+e^-$  w Belle). Jednocześnie, przekrój czynny na kanały tłowe są także znacznie większe ( $\sigma \approx 100\text{mb}$ ), co wraz dużą krotnością przecinania wiązek na LHC oraz wyzwalania w eksperymencie rzędu kilku MHz (a w

przyszłości w tzw. Run3 nawet 30 MHz) stanowi bardzo duże wyzwanie eksperymentalne. Jednym z kluczowych elementów detektora LHCb jest detektor wierzchołka VELO (Vertex LOcator), którego zadaniem jest rozróżnienie wtórnych rozpadów mezonów B oraz ich produktów rozpadu mezonów D, od wierzchołka pierwotnej interakcji. Zadanie jest realizowane przy pomocy 23 stacji paskowych detektorów krzemowych których połączona pozycyjna zdolność rozdzielcza jest rzędu 20-30  $\mu\text{m}$ . Stacje są umieszczone wokół osi wiązki i znajdują się w bardzo dużym strumieniu cząstek (ekwiwalentnego do  $10^{15}$  neutronów/ $\text{cm}^2$ ) co powoduje ich nieuniknione zniszczenia radiacyjne. Innym istotnym elementem wyróżniającym eksperyment LHCb jest system wysoko-poziomowego wyzwalań (tzw. High Level Trigger) opierający się rekonstrukcji śladów w czasie rzeczywistym.

Działalność naukowa dr. Obłąkowskiej-Muchy jest skupiona wokół tych trzech aspektów : (a) monitorowania procesów zniszczeń radiacyjnych w detektorze VELO oraz ich ilościowy opis pozwalający na estymacje dla przyszłych pomiarów z wysoką świątlnością (b) praca nad algorytmami rekonstrukcji śladów dla HLT (c) analizy danych eksperymentalnych dotyczących rozpadów mezonów  $B \rightarrow D X$  (dla różnych stanów końcowych) w kontekście wyznaczenia kąta  $\gamma$  w macierzy CKM istotnego do opisu procesów łamania CP. Jest to bardzo szerokie spektrum zainteresowań i bardzo niełatwe do pogodzenia w tak dużym eksperymencie. Rozciąga się od zagadnień dotyczących technologii detektorów krzemowych, poprzez algorytmy rekonstrukcji śladów i nowoczesne metody informatyczne do klasyfikacji danych do wreszcie zagadnień fizyki procesów łamania parzystości CP w sektorze kwarków b. Z tym większym uznaniem oceniam całokształt badań oraz ich znaczenie.

W ciągu obu kampanii pomiarowych LHCb, tzw. Run1 oraz Run2, dr. Obłąkowska-Mucha brała aktywny udział w pomiarach których wynikiem jest blisko 540 publikacji, zawierających wyniki o fundamentalnym znaczeniu nie tylko dla zrozumienia Modelu Standardowego (np. łamanie parzystości CP w rozpadach  $B^0 \rightarrow D_s \pi$ ,  $B^0_s \rightarrow D_s K$  i wyznaczenia kąta  $\gamma$  macierzy CKM) ale także innych spektakularnych odkryć eksperymentu LHCb, jak na przykład ostatnie wyniki dotyczące stanów pentakwarkowych (układy barion-mezon z kwarkiem c). Wyniki eksperymentu LHCb zostały osiągnięte oczywiście przez dużą grupę badawczą, w której jednak działalność dr. Obłąkowskiej-Muchy oraz grupy badawczej na AGH jest wyraźnie określona. Tematyka badawcza dotyczy istotnej dla eksperymentu problematyki zniszczeń radiacyjnych

detektora wierzchołka i fizyki rozpadów kwarków b. Potwierdzają to listy rekomendacyjne od przewodniczącego zespołu badawczego LHCb Prof. Guy Wilkinson'a z Uniwersytetu w Oksfordzie oraz przewodniczącego grupy roboczej RD50 dr. Michael Molla'a z CERN zajmującej się badaniem i rozwojem detektorów krzemowych dla potrzeb przyszłych eksperymentów z dużą świątlnością. Do najważniejszych publikacji zespołu LHCb, ze znacznym osobistym wkładem (>10%), dr. Obłąkowska-Mucha zalicza 5 publikacji (wymienionych na stronie 25 autoreferatu) dotyczących detektorów krzemowych oraz 10 publikacji z fizyki mezonów B (wymienionych na stronie 24) oraz 2 monografie.

Dr. Obłąkowska-Mucha wygłosiła 6 referatów na dużych międzynarodowych konferencjach prezentując w imieniu współpracy LHCb wyniki związane z fizyką rozpadów B oraz 7 referatów dotyczących zniszczeń radiacyjnych w imieniu współpracy LHCb lub RD50

Podsumowując uważam dorobek naukowy jest w zupełności wystarczający.

### **Ocena osiągnięcia naukowego będącego podstawą postępowania habilitacyjnego**

Jako osiągnięcie naukowe dr. Obłąkowska-Mucha przedstawiła monografię „*Radiation damage in the LHCb Vertex Locator. First observation of  $B_s^0 \rightarrow D_s^\pm K^{*\mp}$  decay*”

Monografia jest podzielona na dwie tematycznie części; część (1) dotyczy zniszczeń radiacyjnych detektorów krzemowych VELO (rozdziały 2-4), część 2 przedstawia wstępne wyniki analizy rozpadów  $B_s^0 \rightarrow D_s K^*$  ( $K_s \pi$ ) wraz z pierwszym wyznaczeniem współczynników rozgałęzienia (rozdziały 5-6). Oba tematy są poprzedzone opisem eksperymentu LHCb, ogólnej charakterystyki pomiarów przeprowadzonych w latach 2010-2018 (Run I, Run II) oraz przeglądem podstaw teoretycznych fizyki łamania symetrii CP.

W czasie w.w. pomiarów uzyskano dane odpowiadające scałkowanej świątlności  $L=9.04 \text{ fb}^{-1}$ . Całkowity strumień cząstek przechodzący przez sensory VELO wyniósł  $10^{15}$  neutronów/cm<sup>2</sup> i był najwyższy ze wszystkich detektorów na LHC. Wyniki badań dotyczących przyczyn pojawia się zniszczeń radiacyjnych przedstawione zostały w rozdziale 2. Zostały one wykonane w dużej części w ramach współpracy RD50 w CERN,



której członkiem jest dr. Obląkowska-Mucha. Zniszczenia radiacyjne są spowodowane poprzez jonizację w materiale otaczającym krzem generującym powstawanie ładunków pasożytniczych oraz poprzez dyslokacje w sieci samego krzemu. Te ostatnie procesy są efektem zderzeń cząstek a atomami sieci i prowadzą do powstawania tzw. wakansów oraz nowych atomów międzywęzłowych, czyli tzw. par Frenkla (lub przy odpowiednio dużej przekazanej energii powstawanie całych klastrów). Efektem zniszczeń radiacyjnych jest modyfikacja struktury pasmowej, pojawianie się nowych pasm, modyfikacja rozkładów ładunku przestrzennego w sensorze, pojawianie się pułapek ładunku. Mechanizmy oraz typy defektów zostały dokładnie przedstawione w rozdziałach 2.2-2.4.

Zniszczenia radiacyjne prowadzą ogólnie to wzrostu prądu upływu który jest proporcjonalny do objętości sensora, efektywnego strumienia cząstek (znormalizowanego do efektu wywoływanego przez neutrony o energii 1 MeV) oraz współczynnika zniszczeń  $\alpha$  który zależy istotnie od temperatury i czasu pomiaru (rysunki 2.8 oraz 2.9 w rozdziale 2.5.4). Zniszczenia powodują zmianę wielkości warstwy zubożenia i wymagają zwiększenia napięcia pracy detektora. W szczególności, w monografii dyskutowany jest wpływ temperatury na redukcję szybkości pojawiania się (i znikania) zniszczeń radiacyjnych. Preferowana jest praca w niskich temperaturach ( $-8^{\circ}$   $-20^{\circ}$  C) choć obserwowana jest także szybka ale krótkotrwała poprawa po podgrzaniu sensora.

Rozdział 3 przedstawia szczegółowa badania strumienia cząstek przepływających przez sensory VELO wykonane przy pomocy symulacji Monte Carlo używając pakietu oddziaływań hadronowych FLUKA (generator DPMJET-3). Wyznaczono rozkłady protonów, neutronów, kaonów pionów w funkcji pędu oraz kąta emisji dla zderzeń proton-proton przy energiach  $\sqrt{s}=7$  i 13 TeV. Następnie obliczono strumienie i efektywne strumienie cząstek przechodzące przez poszczególne warstwy detektora, w funkcji odległości od wiązki oraz punktu interakcji- rys. 3.7-3.8, 3.13, 3.15. Symulacje wykazały że w niektórych miejscach strumienie zbliżają się do  $10^{14}$  neutronów/cm<sup>2</sup> przy  $L=1 \text{ fb}^{-1}$  (rys. 3.16), największej dla detektorów na LHC.

Uzyskując wartości strumieni cząstek oraz mając wyniki szczegółowych pomiarów wzrostów prądu w czasie eksperymentu (rozdział 4) można było wyznaczyć efektywną stałą zniszczeń  $\alpha=(1.27\pm 0.4)*10^{-18}$  A/cm (rys.4.9), co jest bardzo cennym i pierwszym tego typu wynikiem na LHC. Stałą zniszczenia wyznaczono także w zależności od świetlności, która jest wielkością bezpośrednio mierzoną w eksperymencie.

Szczegółową analizę prądu upływu wykonano w funkcji temperatury oraz czasu pomiaru, w specjalnych dedykowanych pomiarach, i na ich podstawie wyznaczono inny wartościowy parametr detektora tzw. efektywną wielkość przerwy energetycznej ( $E_{\text{eff}}$ ), która pod koniec naświetlania w Run2 zmalała prawie około 10% w stosunku wartości ( $1.214 \pm 0.0014$ ) eV dla nienaświetlanych sensorów (wielkość znana także z literatury). Pomiary wykazały wyraźną zależność prądów upływu od położenia sensora (większe efekty dla bardziej napromieniowanych sensorów) –rys. 4.7,4.8 - praktycznie podążając za obliczonymi zależnościami strumienia cząstek. W rozdziale 4.2 przedstawiono także zależność wielkości napięcia koniecznego do osiągnięcia pełnej warstwy zubożenia od wielkości strumienia cząstek (rys. 4.2) oraz wydajność na rekonstrukcję trafień w warstwach detektora VELO (rys.4.14), które nie wykazują istotnego pogorszenia w wyniku naświetlania.

Podsumowując tę część monografii stwierdzam iż dostarcza on wiele wartościowych wyników charakteryzujących procesy zniszczeń radiacyjnych w detektorze VELO oraz metod pozwalających na wiarygodne szacowanie tych efektów dla przyszłych pomiarów z jeszcze większą intensywnością planowanych przy pomocy nowego detektora wierzchołka i LHCb w Run3.

Druga część monografii (rozdział 5) jest poświęcona analizie rozpadów  $B^0_{s \rightarrow D_s} K^* (K_s \pi)$  w danych zebranych przez LHCb w czasie Run1 oraz Run2. Rozpady te nie zostały nigdy wcześniej zmierzone, a są obiecujące dla przyszłych badań łamania parzystości CP (w celu określenia kąta  $\gamma$  w macierzy CKM) . Zamieszczony w monografii pierwszy wynik współczynnika rozgałęzienia  $BR=(4.2 \pm 0.53) \cdot 10^{-4}$ , choć bardzo wstępny , jest bardzo wartościowy. Szczegółowy opis identyfikacji rozpadu, przedstawiony w rozdziale 5.4.4, jest cennym materiałem który dostarcza wiele istotnych wniosków w kierunku ulepszenia metod analizy, w szczególności identyfikacji stanu końcowego  $K^*$  (892) który jest widoczny na obecnym etapie na tle dużego tła (rys.5.19b). Znacznie czystsza identyfikacja została osiągnięta dla nierezonansowego stanu końcowego  $K^0 \pi \pm$ . Dla tego kanału rozpadu mezonu  $B_s$  , zawierającego ten stan nierezonansowy, wyznaczono współczynnik rozgałęzienia  $BR=(5.8 \pm 0.1) \cdot 10^{-4}$  . Identyfikacja obu rozpadów była trudnym wyzwaniem wymagającym identyfikacji 6 cząstek naładowanych oraz 3 wtórnych wierzchołków rozpadu. Podstawową rolę odegrała tutaj bardzo dobra zdolność pozycyjna detektora VELO. Do identyfikacji zastosowano metody analiz wielowymiarowych, które zostały zoptymalizowane na symulacji sygnału



oraz tła pobranego z próbki eksperymentalnej. Do uzyskania w.w współczynników rozgałęzienia użyto normalizacji w oparciu o ilości zrekonstruowanych znanych rozpadów o tych samych stanach końcowych  $B^0 \rightarrow D^\pm K^0 \pi^\pm$  ( $D^\pm \rightarrow KK\pi$ ), co znacznie uwiarygodnia uzyskane współczynniki rozgałęzienia nawet przy braku przeprowadzenia dogłębnych symulacji (znoszenie się wydajności na detekcję i rekonstrukcję obu przypadkach). Ciekawym wynikiem jest także analiza pośrednich stanów w rozpadzie mezonów  $D^\pm$  z wyodrębnieniem stanów rezonansowych  $\phi\pi$ ,  $K^*K$  (rys. 5.15-51.7). Przeprowadzono także alternatywną normalizację względem bardziej prawdopodobnych (rzędu wielkości) rozpadów  $B^0 \rightarrow D^\pm K^0 \pi^\pm$  ( $D^\pm \rightarrow K\pi\pi$ ) których wyników jednak nie podano, wskazując tylko iż są one kompatybilne. Ponieważ te rozpady mogą być istotnym tłem, związanym z błędną identyfikacją mezonów  $K$  i  $\pi$  a prowadzącą w końcowym efekcie do wkładów w przedziale masy mezonu  $B$ , ich dalsza analiza jest konieczna do ostatecznej estymacji wsp. rozgałęzienia.

Uzyskane wartości w.w wsp. rozgałęzienia porównano z oszacowaniami bazujących na efektywnej teorii pola, podanych w rozdziale 5.3.1. Oszacowania sprowadzają się do relacji pomiędzy stosunkami wsp. rozgałęzienia rozpadów mezonów  $B \rightarrow D_s K^*/K$  i  $B \rightarrow D_s \rho/\pi$  zawierającym mezony wektorowe i skalarnie i prowadzą do zupełnie rozsądnej zgodności w wynikami analizy.

W ostatnim rozdziale 6 opisano metodę określenia zależnej od czasu asymetrii wynikającej z łamania symetrii CP dla rozpadów  $B^0_s \rightarrow D_s K^*$  oraz podano szacowania na błąd kąta  $\gamma$ . Jednakże, jak sama autorka pisze, przedstawione wyniki nie mają konkluzyjnego charakteru z powodu znacznych uproszczeń w założeniach modelu symulacyjnego.

Podsumowując uważam iż przedstawiony w monografii materiał jest wartościowy, łączy w sobie bardzo ważne aspekty fizyki detektorów krzemowych oraz interesujące wyniki analizy danych. Oba tematy są ze sobą związane poprzez wspólny mianownik, detektor wierzchołka VELO, który odgrywa centralną rolę w LHCb w identyfikacji rozpadów mezonów  $B$ . Przedstawione osiągnięcie naukowe oceniam zdecydowanie pozytywnie

## **Działalność dydaktyczna, organizacyjna, popularyzacja nauki oraz współpraca Międzynarodowa**

Z charakteru działalności naukowej dr. Obłąkowskiej-Muchy, opisanego w pierwszej części mojej recenzji, jasno wynika jej międzynarodowy charakter. LHCb jest dużą międzynarodową grupą badawczą pracującą w CERN i bazuje wyłącznie na współpracy międzynarodowej. Dr. Obłąkowska-Mucha jest także aktywnym członkiem współpracy RD50, zajmującej się badaniami nad detektorami krzemowymi przeznaczonymi do pracy w przyszłych eksperymentach z wysoką świetlnością. Zorganizowała spotkanie robocze grupy RD50 w Krakowie, była współorganizatorem spotkania „Workshop on Radiation Effects in the LHC Experiments and Impact on Operation and Performance” oraz spotkania współpracy LHCb w Krakowie.

Ważnym elementem działalności w dużych grupach badawczych jest zorganizowanie własnego zespołu. Dr. Obłąkowska-Mucha wspólnie z dr. hab. Tomaszem Szumlakiem koordynuje działalność grupy z AGH na LHCb, której znaczenie dla eksperymentu, a w szczególności detektora VELO, podkreślał w cytowanym już liście Prof. Wilkinson. Dr. Obłąkowska-Mucha była kierownikiem dedykowanego na badanie zniszczeń radiacyjnych w detektorach krzemowych grantu OPUS Narodowego Centrum Badań oraz wykonawcą 5 innych grantów poświęconych fizyce LHCb. Efektem tej działalności jest wypromowanie 6 prac inżynierskich, 5 magisterskich oraz opieka w charakterze promotora pomocniczego jednego doktoratu co dobitnie świadczy o owocnej współpracy.

Dr. Obłąkowska-Mucha jest wykładowcą na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej na AGH. Prowadziła wykłady oraz ćwiczenia z Fizyki I,II, Część elementarnych i ich oddziaływań, metod eksperymentalnych w fizyce wysokich energii, łamania symetrii CP, rachunku prawdopodobieństwa i opracowania wyników pomiarów (także w języku angielskim). Otrzymała coroczne wyróżnienia od Rektora za prowadzone zajęcia dydaktyczne. Była organizatorem zajęć popularyzujących fizykę w kraju (Noc Naukowców, Warsztatów Małopolskiej Chmury Edukacyjnej, CERN International Master classes). Całość tej działalności należy ocenić pozytywnie.

Podsumowując, uważam że przedstawione mi do recenzji osiągnięcie naukowe w przewodzie habilitacyjnym dr. Obłąkowskiej-Muchy, którym jest monografia pt. "*Radiation damage in the LHCb Vertex Locator. First observation of  $B_s^0 \rightarrow D_s^\pm K^{*\mp}$  decay*", jest osiągnięciem wartościowym i spełnia ustawowe wymogi osiągnięcia habilitacyjnego zarówno

pod względem merytorycznym, jak i formalnym. Fakt ten w połączeniu z dorobkiem naukowym oraz aktywnością dydaktyczną, organizacyjną popularyzatorską oraz osiągnięciami na polu współpracy międzynarodowej, w pełni uzasadnia ubieganie się o stopień doktora habilitowanego nauk fizycznych w dyscyplinie fizyka . Wnioskuje zatem o dopuszczenie dr. Obłąkowskiej-Muchy do dalszych etapów przewodu habilitacyjnego

Prof. dr hab.

Piotr Salabura

