



UNIwersytet  
Warszawski

Warszawa, 7 października 2022

dr hab. Katarzyna Grzelak  
Wydział Fizyki  
Uniwersytet Warszawski  
ul. Pasteura 5  
02-093 Warszawa

**Recenzja**  
**rozprawy doktorskiej mgr Wojciecha Krupy**  
**pt. „Towards first observation of the  $B_s^0 \rightarrow D_s^{*\mp} K^{*\pm}$  decay and calibration of**  
**the Upstream Tracker detector”**

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska wykonana w ramach dużej, międzynarodowej współpracy LHCb przy akceleratorze LHC. Rozprawa składa się z dwóch głównych części. Pierwsza to opis prac programistycznych związanych z monitorowaniem i kalibracją jednego z detektorów wchodzących w skład detektora LHCb. W drugiej części opisana jest analiza, której celem było opracowanie procedury prowadzącej do pierwszej obserwacji rzadkiego rozpadu mezonu  $B_s^0$ :  $B_s^0 \rightarrow D_s^{*\mp} K^{*\pm}$ .

Praca składa się z sześciu rozdziałów, jednego dodatku i spisu literatury. Główna część pracy poprzedzona jest omówieniem dorobku naukowego autora. Szczególnego podkreślenia wymaga tutaj bogata lista wystąpień konferencyjnych doktoranta, opis prac potwierdzających ekspercką wiedzę w dziedzinie technik programistycznych w fizyce cząstek, udział w dwóch grantach w roli głównego wykonawcy i doświadczenie zdobyte w czasie prac związanych z budową i uruchamianiem krzemowego detektora UT (Upstream Tracker).

Rozdział pierwszy wprowadza czytelnika do podstaw Modelu Standardowego Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych, demonstuje teoretyczną wiedzę autora na temat zjawiska łamania symetrii CP, metod jego pomiaru, a także motywacji kryjącej się za poszukiwaniami nowych kanałów rozpadu z rodziny  $B \rightarrow DK$ . W rozdziale drugim opisany jest eksperyment LHCb, jego miejsce wśród eksperymentów działających przy akceleratorze LHC oraz podsystemy tego detektora, ze szczególnym uwzględnieniem układu służącego do rekonstrukcji torów cząstek. Kolejny, trzeci rozdział poświęcony jest w całości szczegółowemu opisowi detektora Upstream Tracker, ponieważ jedna z dwóch głównych części pracy dotyczy rozwoju oprogramowania z nim związanego. Najważniejsze wyniki uzyskane przez autora pracy opisane są w rozdziałach 4 i 5. Rozdział czwarty poświęcony jest systemowi monitorowania i kalibracji detektora Upstream Tracker, a rozdział piąty przedstawieniu analizy mogącej prowadzić do obserwacji nowego rozpadu mezonu  $B_s^0$ . Całość pracy kończy rozdział szósty z końcowymi

wnioskami i opisem planów kontynuacji analizy fizycznej i rozwoju oprogramowania związanego z detektorem UT.

Rozprawa została bardzo starannie zredagowana (w całej 133 stronicowej pracy znalazłam jedynie 9 literówek) i ma przejrzysty i logiczny układ. Wyjątkiem jest zbyt szczegółowy opis pakietu Vetra - UT (rozdział 4.6), który powinien znaleźć się w dodatku. Po przeczytaniu tego fragmentu można się tylko domyślać, że autor bardzo szczegółowo opisuje elementy algorytmów wchodzących w skład pakietu, ponieważ prawdopodobnie jest ich głównym lub wręcz jedynym autorem. Nie jest to jednak nigdzie wyraźnie napisane. Obszerny spis literatury zawiera 132 pozycje dobrze dobrane do problematyki pracy. Tylko w jednym miejscu, w rozdziale 5.6.3 zauważyłam brak odnośnika do pakietu TMVA i jednocześnie wytłumaczenia samego skrótu.

Jednym z dwóch celów pracy było opracowanie i przetestowanie procedury prowadzącej do pierwszej obserwacji rozpadu  $B_s^0 \rightarrow D_s^{*\mp} K^{*\pm}$ , a tym samym do zwiększenia precyzji pomiaru kąta  $\gamma$  macierzy CKM (Cabbibo-Kobayashi-Maskawa). W ten sposób rozprawa doktorska wpisuje się w niesłychanie ważną tematykę w fizyce cząstek elementarnych, jaką jest poszukiwanie źródeł i pomiar łamania ładunkowo-przestrzennej symetrii CP. Ostatecznym celem tych badań jest próba wyjaśnienia przyczyn asymetrii materii i antymaterii we współczesnym Wszechświecie.

Autor opracował kolejne kroki analizy niezbędne do obserwacji rzadkiego rozpadu  $B_s^0 \rightarrow D_s^{*\mp} K^{*\pm}$ . Wśród nich znajduje się wieloetapowa procedura selekcji badanego procesu i przeprowadzenie szeregu testów przy użyciu danych i kontrolnych procesów, w tym rozpadu  $B^0 \rightarrow D_s^{*\mp} K^{*\pm}$  z identycznym stanem końcowym jak w przypadku poszukiwanego rozpadu. W selekcji ważne miejsce zajmuje użycie jednej z metod nadzorowanego uczenia maszynowego: Boosted Decision Tree. Sama metoda jest bardzo dokładnie opisana, co pokazuje dużą wiedzę autora w tej dziedzinie. Przechodząc do zastosowania metody w tym konkretnym przypadku, w rozprawie trudno jest jednak doszukać się jak przygotowano próbkę z przypadkami tła, która została użyta do treningu algorytmu. Powinno to już być wyraźnie napisane w rozdziale 5.3 pt. Analysis strategy. W rozdziale 5.7.4 dowiadujemy się, że rolę tła spełniają dane z innego kinematycznie obszaru niż obszar sygnału, ale nie wiadomo po jakich dokładnie cięciach. Separacja sygnału i tła po zastosowaniu algorytmu BDT (rys. 5.10) wydaje się być niemal perfekcyjna. Byłoby bardzo interesujące, gdyby można było zobaczyć jak wygląda separacja w przypadku dwóch najważniejszych z piętnastu wejściowych zmiennych (tabela 5.12); dowiedzieć się jakie były proporcje sygnału i tła na etapie treningu; jak duży zysk w stosunku sygnału do tła daje w tym przypadku zastosowanie metody BDT w porównaniu do metody opartej na prostych cięciach, jak również jakie znaczenie dla poprawy stosunku sygnału do tła ma każdy z etapów selekcji.

Opisana analiza oparta jest na danych z okresów zbierania danych Run 1 i Run 2, odpowiadających scałkowanej świetłości  $6 \text{ fb}^{-1}$ . Dane zostały wykorzystane na różnych etapach analizy, między innymi przy wstępnej selekcji stanów  $D_s^+$ ,  $K_s^0$  i  $D_s^{*\mp}$ ; do trenowania metody BDT; do końcowych testów stanów pośrednich związanych z cząstkami, które powinny powstać w wyniku poszukiwanego rozpadu, jak i do porównania danych z wynikami symulacji dla jednego z kontrolnych procesów.

Nie do uniknięcia jest wrażenie pewnego niedosytu spowodowanego tym, że w rozprawie nie udało się pokazać jak wygląda rozkład masy niezmienniczej  $D_s^{*\mp} K^{*\pm}$  w obszarze spodziewanego sygnału. Zrozumiałe jest jednak, że w dużej współpracy jaką jest



LHCb, proces zatwierdzania danych do publicznego udostępnienia jest bardzo długi, a wyżej wymieniony brak nie umniejsza wartości wykonanej pracy.

Drugi cel pracy dotyczy rozwoju oprogramowania dla nowego detektora, którego budowa jest częścią dużej modernizacji eksperymentu LHCb. Krzemowy detektor Upstream Tracker będzie jednym z podstawowych elementów systemu rejestracji torów cząstek w eksperymencie LHCb. Monitorowanie działania detektora w czasie zbierania danych, jak również jego kalibracja, którymi zajmuje się autor pracy to jedne z kluczowych zadań bez których prawidłowe działanie detektora byłoby niemożliwe. Projektowanie i tworzenie dużej części oprogramowania w tak dużym eksperymencie jakim jest detektor LHCb, często powiązanego z innymi, istniejącymi modułami wymaga od programisty dużych umiejętności, które zademonstrował autor pracy. W rozprawie doktorskiej oprócz omówienia działania algorytmów przytoczone są przykłady działania przygotowanego oprogramowania.

Podsumowując, rozprawa doktorska zawiera opis podejścia do poszukiwania nowego kanału rozpadu mezonu  $B_s^0$ , jak również opis nowego oprogramowania przygotowywanego na potrzeby przebudowywanego detektora LHCb. Autor zademonstrował umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej i bardzo dobre opanowanie warsztatu, zarówno jeśli chodzi o prowadzenie analizy fizycznej, jak i rozwój oprogramowania eksperymentu. W obu przypadkach wykonana praca znajduje się w głównym nurcie działalności współpracy LHCb i będzie kontynuowana.

Uważam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania dotyczące rozpraw doktorskich i wnioskuję o dopuszczenie jej autora, mgr Wojciecha Krupę do dalszych etapów postępowania doktorskiego.



Katarzyna Grzelak