

dr hab Andrzej Bożek prof. IFJ  
Particle Physics and Astrophysics Department  
Instytut Fizyki Jądrowej PAN  
ul Radzikowskiego 152, Kraków

Kraków, 11 maja 2019

**Recenzja rozprawy doktorskiej pani mgr Varvary Batozskaya zatytułowanej:**

**Measurement of  $\mathcal{CP}$  Observables in  $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$  decays at LHCb experiment**

Przedstawiona mi do recenzji praca, dotyczy badania charakterystyki rozpadów  $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$  gdzie  $J/\psi$  rozpada się na  $e^+e^-$ . Celem pracy był pomiar łamania  $\mathcal{CP}$  w tych rozpadach. Dane użyte w pracy zostały zebrane przez detektor LHCb na zderzaczach LHC przy energii zderzeń 7 i 8 TeV. Całkowita świetlność wykorzystanych danych wyniosła  $3,0 \text{ fb}^{-1}$ . Zmierzono łamanie  $\mathcal{CP}$  z rozkładów kątowych oraz ewolucji krzywej czasu życia mezonu  $B$  w tym kanale. Pozwoliło to na wyznaczenie fazy  $\phi_s$  dla omawianego rozpadu.

Główną zaletą tej pracy jest oczywiście pomiar parametrów  $\mathcal{CP}$  w bardzo trudnym eksperymentalnie kanale dla detektorów na zderzaczach hadronowych gdzie w stanie końcowym mamy parę  $e^+e^-$  z rozpadu  $J/\psi$ . Należy podkreślić, że jest to pierwszy pomiar parametrów kątowych w tym kanale. Dodatkowo, w świetle wyników sugerujących możliwość złamania uniwersalności leptonowej w rozpadach  $B$ , pomiary autorki wpisują się w nurt potwierdzający wartość detektora LHCb do równoczesnych pomiarów kanałów rozpadu  $B$  z mionami lub elektronami w stanie końcowym. W rozprawie zaprezentowano także prace autorki na temat pozycjonowania detektorów śladowych w eksperymencie LHCb.

Praca mgr Varvary Batozskaya, napisana w języku angielskim, składa się ze streszczenia oraz pięciu rozdziałów, trzech dodatków, bibliografii zawierającej 129 pozycji i jest stosunkowo długa, bo liczy 181 stron.

Streszczenie które w zamyśle miało chyba pełnić także rolę wprowadzenia, spełnia swoją rolę streszczenia, niestety jako wstęp jest trochę zbyt zdawkowe. Czytając pracę okrywa się zalety i dodatkową strukturę pracy którymi autorka się nie pochwaliła na początku. W szczególności związek, bardzo istotny, pomiędzy kalibracją a otrzymanymi wynikami fizycznymi nie został zasygnalizowany. Brakuje też omówienia które części przedstawionych badań zostały wykonane przez autorkę osobiście, na pewno ułatwiło by to ocenę pracy.

Rozdział pierwszy zawiera ogólne wprowadzenie do tematyki łamania  $\mathcal{CP}$  w rozpadach mezonów  $B$ . Doceniam że wprowadzenie na temat Modelu Standardowego (MS) jest krótkie i że autorka przechodzi szybko do tematyki pracy, czyli łamania  $\mathcal{CP}$  zależnego od czasu w mezonach  $B_s^0$ . Podrozdział 1.3 szczegółowo omawia fenomenologię pomiaru  $\mathcal{CP}$  oraz fazy  $\phi_s$  w tych rozpadach. Autorka omówiła też wyniki eksperymentalne pomiaru  $\phi_s$ . Wyniki eksperymentalne pomiaru  $\phi_s$  ciągle mają stosunkowo dużą niepewność eksperymentalną w stosunku do niebezpośredniego wyznaczenia fazy z innych pomiarów w ramach MS jak ilustruje rysunek 1.10 z HFLAV. Jest to ta najważniejsza motywacja za pomiarem tej wielkości w innych kanałach rozpadu  $B_s$ . Brakuje mi trochę, poza fenomenologicznym omówieniem wpływu ewentualnej nowej fizyki na pomiary, skrótowego omówienia konkretnych modeli. Reasumując omawiany rozdział nie jest ogólnym wprowadzeniem pasującym do dowolnej pracy eksperymentalnej z fizyki mezonów  $B$  ale wskazuje na dobre przygotowanie autorki do tematyki i głębokie jej zrozumienie pozwalające na wyciągnięcie elementów istotnych dla omawianej pracy.

Rozdział drugi opisuje eksperyment LHCb. Poprawny, w pełni standardowy opis, niestety nie sy-

gnalizujący głównych problemów eksperymentalnych jakie mogła mieć autorka w swojej pracy nad konkretnym rozpadem. Opisy wyzwań przy identyfikacji elektronów, rekonstrukcji śladów w trackerze, czy zmianą polaryzacji pola magnetycznego byłyby jak najbardziej na miejscu. Jest opis identyfikacji i rozdzielania  $\pi$ - $K$ , który jest istotny ale nie najważniejszy w pracy i jest częścią większości jeżeli nie wszystkich analiz w LHCb. Podobne rozwinięcie dla identyfikacji elektronów przez systemy kalorymetryczne byłoby jak najbardziej potrzebne.

W rozdziale trzecim autorka opisuje metodę poprawy pozycjonowania detektorów śladowych online w LHCb. Tematyką zaprezentowaną w tym rozdziale, w dużych współpracach zajmuje się większa grupa, więc rozumiem że nie całość opisanej metody kalibracji detektorów śladowych został zrealizowany przez autorkę. Jej wpływ musiał być jednak znaczący, cytowana w rozprawie nota techniczna ma tylko dwóch współautorów, zaś współpraca LHCb pozwoliła jej zaprezentować wyniki na LHCP 2015 w formie posteru. To co jest na pewno wkładem autorki do kalibracji jest zawarte w podrozdziale 3.4. Musze przyznać że od samego początku byłem zgubiony czytając ten rozdział. W pierwszej tabeli (3.1) pojawiają się niezdefiniowane zmienne, odpowiadające stopniom swobody użytymi do globalnej kalibracji;  $T_z$ ,  $T_x$  i  $R_z$ . Z kontekstu można się domyślić że chodzi o translacje i rotacje w stosunku do pozycji nominalnej poszczególnych elementów detektora. W poprzednim rozdziale 3.3.2 autorka opisując procedure, zgodnie z oczekiwaniem, mówi że dla każdego elementu mamy 6 stopni swobody (po trzy rotacje i translacje). Dla globalnego ustawienia stacji roboczych nie musimy użyć wszystkich stopni swobody wykorzystanych w wewnętrznej kalibracji. Krótkie wytłumaczenie dlaczego właśnie te a nie inne stopnie swobody zostały użyte byłoby chyba tu na miejscu. Prawdopodobnie jest to naturalne dla kogoś wewnątrz współpracy, ale dla kogoś spoza, nie znającego definicji geometrycznych detektora, wcale nie jest już takie oczywiste. Autorka opisuje dwa testy globalnej kalibracji:

- stabilności kalibracji ze względu na odwrócenie polaryzacji pola magnetycznego w LHCb
- oraz stabilności kalibracji w czasie pracy detektora

W pierwszym punkcie pani Batozskaya porównywała rezydua dla śladów przechodzących przez detektor. Otrzymane wyniki pokazują że już po trzech iteracjach kalibracji nie obserwuje się znaczących różnic pomiędzy obiema polaryzacjami.

W drugim badaniu autorka badała stabilność rekonstrukcji parametrów rezonansów  $D^0 \rightarrow K^-\pi^+$  i  $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$  w funkcji czasu tutaj także, konkluzja była że detektor jest stabilny i nie zależy od czasu.

Osobiście uważam że doktorantka powinna była bardziej się chwalić tym wynikiem, jako bardzo istotnym we wszystkich interesujących pomiarach w LHCb, a nie sprawiać wrażenie że to jest jeszcze jeden z “service task-ów” jakie zrobiła dla Współpracy.

W rozdziale czwartym, na ponad 50 stronach, opisana jest analiza rozpadów  $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$ . Rozdział pomimo że jest długi, ma czytelną strukturę wyjaśnioną we wstępie. W pierwszych podrozdziałach opisano procedurę analizy :

- generację MC oraz selekcję przypadków  $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$ ,
- uwzględnienie akceptacji w pomiarach czasu rozpadu jak i rozkładach kątowych,
- modelowania procedury dopasowania wraz z wyznaczeniem współczynników korekcyjnych,
- opisu wyznaczania zapachu  $B_S$ , tzw. znakowania.

Później zaprezentowano szczegóły dopasowania, oraz wyznaczenia błędów systematycznych

Opisano procedurę generacji MC przypadków; łączna liczba wygenerowanych przypadków interesującego rozpadu wyniosła 20 milionów, zaś rozpadów będących tłem łącznie ponad 70 milionów. Nie do końca rozumiem wybór statystyki wygenerowanych kanałów tła. Na przykład wygenerowano

proporcjonalnie około 50% więcej przypadków tła  $B_s^0 \rightarrow J/\psi K^*(892)^0$  niż sygnału, a w przypadku próbki inkluzywnej  $B_s^0 \rightarrow J/\psi X$  jest to znacznie mniej. Nie była to jednak pełna symulacja odpowiedzi detektora, ale ślady były rozmazywane aby uwzględnić rozdzielczość detektora tak samo odpowiedź systemu PID. Rozumiem jednak, że jest to standardowa procedura w LHCb, niestety dodająca dodatkowej pracy przy analizie i uwzględnianiu poprawnie błędów systematycznych. Opis tej procedury jeżeli chodzi o identyfikację cząstek jest dokładnie przedstawiony w pracy. Autorka nie komentuje różnic jakie ma dla małych i bardzo dużych prawdopodobieństw identyfikacji elektronu na rysunku 4.2. To samo mamy dla prawdopodobieństwa identyfikacji kaonu, gdzie selekcja wymaga tylko prawdopodobieństwa większego od 0. Mogę się tylko domyślać że wynika ona z różnej zawartości tła w wyselekcjonowanej próbce kandydatów w danych i MC. Jako że skala na rysunkach jest logarymiczna uznano, że różnica jest zaniedbywalna.

Selekcja przypadków odbywa się przy pomocy pakietu TMVA używając wielowymiarowych metod opartych o Boosted Decision Tree (BDT) lub sieci neuronowych (NN). Autorka opisuje obie metody i ich zastosowanie dla danych z 2011 roku. Widać, porównując rysunki 4.7c z 4.5 że metoda oparta o BDT jest wyraźnie lepsza. Trochę mnie dziwi aż taka duża dysproporcja. W obu metodach zmienne użyte do dyskryminacji różnią się tylko tym, że w przypadku BDT użyto jakości wierzchołków a w przypadku NN parametrów zderzenia  $B_S$  i pozytronu w stosunku do IP. Dlaczego nie można było użyć tych samych zmiennych w przypadku NN ?

Autorka przeprowadziła dyskusję oceny tła pikującego wynikającego ze błędnej identyfikacji pionu lub protonu w rozpadach  $B_s^0 \rightarrow J/\psi K^*(892)^0$  i  $\Lambda_b \rightarrow J/\psi p K$ . Rysunek 4.12 wyraźnie pokazuje systematyczność i podejście empiryczne do problemu. Jeżeli miałbym się tu o coś zapytać to jest słowo komentarza, czy wybrane cięcie na PID dodatniego kaonu ma wpływ na zmienne użyte wyżej do selekcji sygnału? Jest to jedna ze zmiennych użytych w BDT.

Procedura dopasowania sygnału do masy układu uwzględnia promieniowania hamowania i w sposób przekonujący udowadnia, że użyta parametryzacja współpracy Crystal Ball opisuje dane eksperymentalne.

Przedyskutowano tło od nie w pełni zrekonstruowanych przypadków z  $J/\psi$  w stanie końcowym. Próbka MC jest wystarczająco duża w stosunku do spodziewanej statystyki, jest jednak mała w stosunku do statystyki MC sygnału.

W podrozdziałach 4.3 i 4.4 omówiono korekcję wydajności na czas rozpadu, kąt rozpadu, rozdzielczości czasową oraz kątowne. Poprawka wydajności na czas rozpadu jest duża dla bardzo małych czasów (nawet do 50% dla  $\ll 1ps$ ) i stosunkowo niewielka dla dłuższych czasów życia. Również korekcje akceptacyjne na kąty rozpadu, opisane w dodatku są w sposób przekonujący pokazane. Sprawdzono również hipotezę faktoryzacji korekcji kątownej i czasowej (w dodatku C)

Następnie autorka opisuje znakowanie zapachu  $B_S$ . Uważam że ten opis jest bardzo przejrzysty, moja uwaga jest tylko redakcyjna, jako że zostały użyte standardowe algorytmy współpracy, można było ten opis umieścić w rozdziale 2. Jest to takie samo narzędzie wykorzystywane w analizie jak układ wyzwalań czy algorytm identyfikacji cząstek. Skróciłoby to nadmiernie rozbudowany rozdział 4 i rozdzieliło analizę wykonaną samodzielnie przez autorkę od opisu użytych narzędzi.

Pani Batozskaya zbudowała funkcje gęstości prawdopodobieństwa użyte do dopasowania z uwzględnieniem ewolucji czasowej i różnych algorytmów znakowania. Parametry odpowiadające mieszanii  $B_s^0$ ;  $\Delta\Gamma_s$ ,  $\Gamma_s$  i  $\Delta m_s$  zostały ograniczone w ramach błędów i wartości centralnych do dopasowania z bliźniaczego kanału  $B_s^0 \rightarrow J/\psi(\mu^+\mu^-)\phi$ .

Dyskusja efektów systematycznych uwzględnia wszystkie zasygnalizowane wcześniej w pracy źródła błędów systematycznych. Bardzo przydatne do zrozumienia tej części rozdziału był dołączony dodatek C. Ciekawa jest zawartość tabeli C.19 wskazująca na możliwość poprawy użytych funkcji gęstości prawdopodobieństwa. Jednak wynikający z tego błąd jest niewielki w stosunku do niepewności pochodzącej od parametrów użytych w algorytmie BDT. Selekcja BDT jest głównym przyczynkiem do

błędów systematycznych, opis na stronie 108 nie jest wystarczający do oceny na ile trudne będzie zmniejszenie tej niepewności wraz ze wzrastającą statystyką danych.

Z dopasowania do danych wyznaczono wartość fazy  $\phi_s = -18_{-39}^{+37} \pm 25$  [mrad] z rozpadu  $B_s^0 \rightarrow J/\psi(e^+e^-)\phi$  co można porównać z  $\phi_s = -58 \pm 49 \pm 6$  [mrad] otrzymane z rozpadu  $B_s^0 \rightarrow J/\psi(\mu^+\mu^-)\phi$ . Autorka prawdopodobnie przez nieuwagę zostawiła tutaj referencje do starego wyniku LHCb z  $0,37 \text{ fb}^{-1}$  z 2013 (referencja 120) roku zamiast do nowszego uzyskanego przy tej samej statystyce  $3,0 \text{ fb}^{-1}$  co pomiar opisany w pracy który zresztą autorka sama cytuje w paragrafie wyżej (referencja 39). Uzyskane wyniki są oczywiście zgodne w ramach błędów statystycznych. Dla pełności obrazu, dobrze by było poznać komentarz autorki dlaczego jej błędy systematyczne są znacząco większe niż dla analizy  $B_s^0 \rightarrow J/\psi(\mu^+\mu^-)\phi$  i jakie są perspektywy zmniejszenia tych błędów.

Rozdział 5 podsumowuje otrzymane wyniki i przedstawia perspektywy. Autorka opisuje swój wkład w globalną kalibrację śladów w LHCb oraz podsumowuje wyniki dla  $\phi_s$  rozpadów  $B_s^0 \rightarrow J/\psi(e^+e^-)\phi$  wyniki te są zgodne z przewidywaniem modelu standardowego. Zauważa bardzo słusznie że stabilność kalibracji w czasie i ze względu na odwrócenie pola magnetycznego odgrywa podstawową rolę wynikach LHCb dla  $\mathcal{CP}$ . Brakuje trochę porównania ilościowego lub jakościowego do wyników LHCb z  $\mu^-\mu^+$  w stanie końcowym, rozumiem że autorka nie chciała porównywać z istniejącymi wynikami które być może niedługo zostaną zastąpione nowszymi. Interesująca jest dyskusja na temat pomiaru przy statystyce zebranej do 2018 roku przez LHCb. Przewidywany błąd statystyczny wynosić ma  $\approx 0.025$  rad. Dla pełnej statystyki jaka ma być zebrana w LHCb ma jeszcze się zmniejszyć trzy razy. Zakładając że wartość centralna pomiarów LHCb (z rysunku 1.10) się nie zmieni to przy pełnej statystyce będzie można obserwować wprost efekt fizyki spoza MS. Potencjał odkrywczy na nową fizykę został również przedyskutowany.

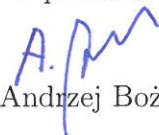
Praca wyróżnia bardzo dobra redakcja, poza naprawdę drobnymi wpadkami i niespójne oznaczenia osi rysunków. Niektóre z rysunków mają za małe opisy osi co nie dziwi w dodatkach, które są prawdopodobnie wzięte wprost z wewnętrznych not Współpracy ale zdarzają się w części głównej pracy (np. rysunki 4.7, 4.16). Problemem nie jest brak możliwości odczytania ale bardziej brak konsystencji pomiędzy rysunkami leżącymi obok siebie.

Rozprawa doktorska dowodzi, że autorka zdobyła duże doświadczenie w operowaniu warsztatem doświadczalnym. Pomimo że układ pracy nie pozwala na popisanie się szeroką wiedzą z zakresu fizyki badanych oddziaływań, widać dogłębne zrozumienie tematu. Wskazuje na to też fakt, że Współpraca doceniła wkład i wiedzę pani Batozskaya, delegując ją do przedstawienia tematyki pracy w swoim imieniu przynajmniej 8 razy na konferencjach. Jak na współpracę liczącą ponad 1200 współpracowników jest to bardzo dobry wynik. Jestem też pod wrażeniem nakładu pracy jaki był konieczny aby przeprowadzić tak szczegółową analizę. Praca została napisana zrozumiałym i bardzo poprawnym językiem angielskim.

Za najważniejszą cechę tej pracy uważam przeprowadzenie z sukcesem analizy nowego kanału rozpadu, który jest bardzo istotny dla dziedziny w którym doktorantka pracuje. Nie należy też zapominać o istotnym wkładzie autorki w kalibrację i co za tym idzie jakość wyników przedstawianych przez LHCb.

W konkluzji stwierdzam, że przedłożona praca spełnia wszelkie wymogi stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie pani mgr Varvary Batozskaya do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

z poważaniem

  
dr hab Andrzej Bożek prof. IFJ