



dr hab. Paweł Brückman de Renstrom, prof. IFJ PAN  
Instytut Fizyki Jądrowej PAN  
ul. Radzikowskiego 152  
32-342 Kraków

Kraków, 14.11.2023 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej pana mgr. inż. Jakuba Ryżki zatytułowanej  
„New approaches for searching for CP violation effects in the  $\Xi_c^+ \rightarrow pK^- \pi^+$   
decays in the LHCb experiment”**

Pan mgr inż. Jakub Ryżka przedstawił do recenzji rozprawę doktorską zatytułowaną *New approaches for searching for CP violation effects in the  $\Xi_c^+ \rightarrow pK^- \pi^+$  decays in the LHCb experiment*, dokumentującą pracę jaką wykonał w ramach współpracy LHCb, a dotyczącą poszukiwań efektów łamania symetrii ładunkowo-przestrzennej (CP) w trzyciałowych rozpadach barionu  $\Xi_c^+$  na  $pK^- \pi^+$ , produkowanych w zderzeniach proton-proton w akceleratorze LHC w czasie drugiego seansu naświetlań (Run 2) i zarejestrowanych w eksperymencie LHCb. Ambicją autora było zastosowanie kilku różnych technik pozwalających na detekcję efektów łamania symetrii CP w sposób niezależny od modelu, czyli nie zakładając żadnego konkretnego mechanizmu, a co za tym idzie przewidywanego wpływu na kinematykę badanego rozpadu. Punktem wyjścia są dla autora diagramy Dalitza dla trzech cząstek stanu końcowego oraz ich odpowiedniki dla anty-cząstek. W przypadku łamania symetrii CP, spodziewana jest różnica pomiędzy tymi dwoma diagramami. Jest ona badana z zastosowaniem trzech różnych metod statystycznych.

Eksperyment LHCb to wysoko wyspecjalizowany jednoramienny spektrometr „do przodu” pokrywający obszar pseudopospiesznosci od około 2 do 5, pozwalający na ekskluzywną rekonstrukcję i precyzyjną spektroskopię ciężkich hadronów, w szczególności kaskadowych rozpadów hadronów zawierających kwark piękny  $b$  oraz powabny  $c$ . Jednym z głównych celów powstania tego wyjątkowego eksperymentu było precyzyjne badanie produkcji i rozpadów ciężkich hadronów a zwłaszcza zjawiska łamania symetrii przestrzenno-ładunkowej CP w ich rozpadach mediowanych poprzez oddziaływania słabe z uwzględnieniem macierzy mieszania CKM. Zespólna faza występująca w tej ostatniej może być źródłem łamania symetrii CP w przypadku, gdy dany proces opisywany jest przez co najmniej dwa interferujące ze sobą diagramy. Jako pierwsze, zjawisko łamania CP zaobserwowane zostało w latach 60-tych w sektorze dziwnym, w oscylacjach kaonów neutralnych  $K^0$ . Obecnie bezpośrednie łamanie CP jest dobrze potwierdzone w rozpadach hadronów dziwnych i pięknych a w 2019 roku eksperyment LHCb po raz pierwszy zaobserwował to zjawisko w sektorze mezonów powabnych. Podobne poszukiwania w sektorze barionowym są z jednej strony ciekawym tematem badawczym, z drugiej zaś stanowią spore wyzwanie eksperymentalne wymagające przeanalizowania ogromnej ilości danych i odsiania sygatur poszukiwanego zjawiska od innych efektów fizycznych czy też eksperymentalnych mogących prowadzić do błędnych obserwacji. W ramach Modelu Standardowego łamanie symetrii CP w sektorze powabnym przewidziane jest na poziomie  $10^{-3}$  lub mniejszym, co dodatkowo stanowi o wyzwaniu eksperymentalnym.

Przedstawiona do recenzji rozprawa Pana mgr. inż. Jakuba Ryżka składa się z krótkiego wstępu, siedmiu głównych rozdziałów i podsumowania, oraz bibliografii zawierającej 74 pozycje. Praca, składająca się z 107 stron, napisana jest w języku angielskim a całość poprzedzają streszczenia w języku polskim i angielskim.

Rozdział 2 stanowi zwięzłe wprowadzenie do Modelu Standardowego w kontekście zjawiska łamania symetrii ładunkowo-przestrzennej. Wprowadza pojęcie obserwowanej we Wszechświecie asymetrii pomiędzy materią i antymaterią i przytacza warunki bariogenezy Sacharowa. Następnie, w przejrzysty sposób wprowadzony jest kwantowo-mechaniczny opis łamania symetrii CP zarówno w sposób



pośredni jak i bezpośredni. Szczegółowo omówiony jest mechanizm bezpośredniego łamania CP w przypadku przedmiotowego rozpadu  $\Xi_c^+$ . Poza wstępem teoretycznym przedstawiony jest również status eksperymentalny pomiaru łamania symetrii CP w sektorze kwarków dziwnych, pięknych i powabnych oraz motywacja prowadzenia tego typu pomiarów w sektorze barionów powabnych.

Rozdział 3 opisuje układ eksperymentalny, to jest zderzacz wiązek przeciwbieżnych LHC oraz spektrometr LHCb w jego kształcie w ciągu pierwszych 10-ciu lat działania. Osobne podrozdziały poświęcone zostały systemowi rekonstrukcji śladów cząstek naładowanych, identyfikacji cząstek w spektrometrze oraz systemowi wyzwiania (trigger). W osobnym podrozdziale opisana jest modernizacja jaką spektrometr LHCb przeszedł podczas drugiego długiego okresu modernizacyjnego (tzw. LS2) w latach 2019-2022. Ta dyskusja uzupełnia wprawdzie opis eksperymentu, nie dotyczy jednak opisanej dalej analizy, która oparta jest na danych z lat 2016-18. Pozostaje niejasnym, dlaczego podrozdział 3.3 dyskutujący przekroje czynne na interesujące procesy oraz spodziewaną statystykę zdarzeń umieszczony został w tym rozdziale, mimo że omówienie zebranych danych otwiera kolejny rozdział (4).

Rozdział 4 poświęcony jest niemal w całości kryteriom selekcji danych w celu uzyskania optymalnej separacji sygnału od tła oraz technikom mitygowania efektów systematycznych mogących zaburzyć pomiar. Dobór kryteriów selekcji oparty jest na znaczącości statystycznej ( $FoM=S/\sqrt{(S+B)}$ ), ale również samej wydajności zastosowanych cięć. Niestety, czasami nie jest jasne które kryterium jest ostatecznie decydujące i dlaczego. Tak jest w przypadku podrozdziału 4.2 gdzie zamieszczono wiele grafów przedstawiających wydajność selekcji w funkcji danego cięcia. Są to z natury rzeczy funkcje monotoniczne i niełatwo domyślić się motywacji dla wybranej wartości progowej. Przydatniejsze byłyby podobne wykresy wielkości FoM. Podobnie tabele 2 i 3 wskazują na to, że ostateczny wybór cięcia nie był podyktowany maksymalizacją FoM. Podrozdział poświęcony możliwej kontaminacji obszaru sygnałowego przez błędnie zidentyfikowane rozpady mezonów powabnych  $D^+$  lub częściowo zrekonstruowanych rozpadów czterociałowych wieńczy konkluzja, że są one zaniedbywalnie małe. Podobnie, przypadki zawierające więcej niż jednego kandydata na rozpad  $\Xi_c^+$  oszacowano na około 5%. W takich wypadkach jedynie kandydat o niższej wartości  $\chi^2$  fitu wierzchołka rozpadu jest kwalifikowany do dalszej analizy. Dodatkowe cięcia obszaru detekcji cząstek w detektorze zastosowano w celu redukcji asymetrii ładunkowej wynikającej z nieuniknionych niedoskonałości geometrii samego spektrometru i efektów brzegowych, przy czym szalenie istotnym czynnikiem mitygującym okazuje się stosowanie odwrócenia kierunku pola magnetycznego w spektrometrze (tzw. próbki UP i DOWN). Jednakże na Ryc. 28-33, nawet wewnątrz zaakceptowanego obszaru kinematycznego widać wyraźnie śladowe asymetrie. Bez dodatkowego komentarza, czytelnik ma trudność ocenić jak istotny jest to efekt. Na koniec, efekty systematyczne związane z rekonstrukcją w detektorze testowane są za pomocą zależnej od pędu cząstki asymetrii liczby przypadków w próbkach UP i DOWN (podrozdział 4.6.2). Odnoszę wrażenie, że próbki UP i DOWN nie muszą być identycznie liczne, więc definicja we wzorze 26 wymaga dodatkowego wyjaśnienia. Jako kryterium przyjęte zostało wymaganie zgodności wykresu dla cząstek i antycząstek i na tej podstawie ustanowione zostały dodatkowe cięcia na pędy protonów kaonów i pionów. Ale niejasnym pozostaje, dlaczego np. asymetria widoczna na Ryc. 39 w obszarze pędów między 50 a 100 GeV została uznana za nieszkodliwą. Podobnie, nieoczywistym jest czemu szerokość podwójnego rozkładu Gaussa jest obliczana jako  $\sqrt{(\sigma_1^2+\sigma_2^2)}$ . Na koniec jako test ostatecznej selekcji, wyznaczono czas życia w obszarze sygnałowym stosując technikę sPlot. Uzyskana wartość ( $450\pm 8$  fs) jest zgodna z wartością PDG.

W rozdziale 5 Autor opisuje trzy metody statystyczne zastosowane do testowania zgodności (lub jej braku) diagramów Dalitza wyznaczonych dla rozpadu cząstek i analogicznych rozpadów antycząstek. Pierwsza z nich to tzw. metoda  $S_{CP}$ , będąca w swojej istocie testem  $\chi^2$  zgodności binowanego diagramu Dalitza. Zastanawia jednak definicja we wzorze 27, ponieważ mianownik nie jest odchyleniem standardowym licznika, czego można by się normalnie spodziewać. Drugą techniką jest jądrowy estymator gęstości (ang.: KDE) zastosowany do kilku pasm (przedziałów masy układu  $K\pi$ ) na wykresie Dalitza. Trzecią zaś jest tzw. Test Energii, który w swojej istocie mierzy prawdopodobieństwo znalezienia odpowiednio blisko położonych elementów z dwóch rozkładów. Prawdopodobieństwo to jest maksymalne w przypadku, kiedy oba rozkłady są losowane tą samą funkcją gęstości prawdopodobieństwa. Można też o tej metodzie myśleć jako o niebinowanym teście  $\chi^2$ , przy czym istotnym parametrem wydaje się być parametr rozdzielczości  $\sigma$ . Niestety z tekstu nie dowiadujemy się w jaki sposób został on wyłoniony.

Rozdział 6 pracy dotyczy optymalizacji szerokości pasmowej, czyli parametru wygładzenia  $h$  stosowanego w metodzie KDE. Jest on wyznaczany metodą iteracyjną dla każdego binu rozkładu



niezależnie. Bardzo starannie oszacowany został tzw. wzorcowy KDE. Użyto w tym celu 100 niezależnie wylosowanych histogramów typu „toy”, co umożliwiło nie tylko wyznaczenie wypadkowego, średniego kształtu funkcji gęstości prawdopodobieństwa, ale przede wszystkim odchylenia standardowego oszacowanej funkcji. Metoda KDE jest ogólnie uznanym sposobem szacowania funkcji gęstości prawdopodobieństwa, jednak w przypadku problemu statystycznego który autor stara się rozwiązać wydaje się z jednej strony nadmiarowy, z drugiej zaś niedodefiniowany. Nadmiarowość wynika z faktu, że wyznaczenie kształtu p.d.f. nie jest samo w sobie celem, a w dodatku nie pozwala na ilościowe oszacowanie zgodności dwóch rozkładów (w tym wypadku dwuwymiarowych). Niedookreśloność widzę choćby w dosyć arbitralnym wyborze pasm na diagramie Dalitza. W pracy nie znalazłem uzasadnienia czy też próby optymalizacji tegoż. Ograniczenie badania własności rozkładu jedynie dla fragmentów przestrzeni fazowej sugeruje, że metoda ta nie może być bezpośrednio porównana do pozostałych dwóch, a jej rezultaty są trudne do ilościowego oszacowania. Fakt niemożności pełnego wykorzystania zmienności rozkładu dwuwymiarowego pozwala też oczekiwać suboptymalnej czułości w zastosowaniu do badanego problemu.

Rozdział 7 poświęcony jest ciekawemu porównaniu czułości metod  $S_{CP}$  oraz Testu Energii. Jest ona oparta na generatorze przypadków typu „toy” z zadaniem stopniem asymetrii przestrzenno-ładunkowej wahającym się od 0% do 20%. Nieoczywistym jest dla czytelnika interpretacja dwóch diagramów Dalitza przedstawionych na Ryc. 56. Z opisu wynika, że jedyną różnicą pomiędzy lewym i prawym rozkładem jest statystyka (odpowiednio 200k i 1700k). Jednak cechy widoczne na diagramach są jakościowo różne. To wymaga dodatkowego komentarza. Do oszacowania czułości Autor posłużył się statystycznie poprawnym testem  $p$ -value, przy czym w przypadku metody  $S_{CP}$  był on łatwy do przeprowadzenia ( $\chi^2$ ), a w przypadku Testu Energii konieczne było wyznaczenie rozkładu testu statystycznego dla hipotezy zerowej. Zostało to wykonane za pomocą przypadkowych permutacji losowanych z mieszanki próbek cząstek i antycząstek. Nie wydaje się zaskoczeniem fakt, że obie metody demonstrują podobną dyskryminację. Niestety, metoda KDE nie dostarcza łatwego sposobu szacowania czułości i chyba dlatego została pominięta w tym rozdziale.

Rozdział 8 przedstawia rezultaty zastosowania trzech omawianych wcześniej metod statystycznych do obszaru kontrolnego  $\Lambda_c^+ \rightarrow pK\pi^+$ , charakteryzującego się tym samym trzycząstkowym stanem końcowym, dla którego jednak nie przewiduje się mierzalnych efektów łamania symetrii CP. Metoda  $S_{CP}$  zastosowana została dodatkowo do obszarów spoza piku masy  $\Xi_c^+$  zdominowanych przez tło kombinatoryczne. Konkluzją tego wieńczącego rozprawę rozdziału jest stwierdzenie, że w wszystkich wypadkach nie zaobserwowano statystycznie znaczącego odstępstwa od hipotezy zerowej, czyli zgodności kinematycznej diagramów Dalitza dla cząstek i odpowiadających im antycząstek. Pewien niedosyt pozostawia brak próby oszacowania ograniczenia na wielkość łamania symetrii ładunkowo-przestrzennej. Brak też analizy możliwych błędów systematycznych takiego oszacowania.

Rozdział 9 zawiera zwięzłe podsumowanie rozprawy. Wyjaśnienia wymaga jedynie zdanie „The results indicated that higher sensitivity was shown by ET and the absence of CP asymmetries in the control samples, which was the expected outcome.”, który wydaje się nie być zgodnym z konkluzją zawartą w podrozdziale 7.3.

Jak przyznaje sam Autor, w pracy osiągnięte zostały dwa cele, to jest zademonstrowano na pomocą modelowania Monte Carlo, że stosowane metody mają potencjał identyfikacji efektów pochodzących od łamania symetrii CP w trójcząstkowych rozpadach barionów powabnych, oraz wykazano, że pomiary na danych wykonane na próbkach kontrolnych w których nie spodziewamy się efektów łamania symetrii CP są w ramach błędów statystycznych zgodne z hipotezą zerową. Ten drugi rezultat świadczy o tym, że obciążenie zaproponowanych estymatorów jest mniejsze niż obecny błąd statystyczny testu. Z drugiej strony wiadomo, że poziom łamania CP w rozważanych rozpadach spodziewany jest na poziomie promila lub mniej. Przeprowadzona analiza nie daje możliwości wnioskowania o obciążeniu metody na tym poziomie. Stanie się to istotne, gdy eksperyment LHCb będzie dysponował zdecydowanie większą statystyką zdarzeń dostępnych do analizy. Niezależnie od możliwych niewielkich różnic w statystycznej czułości proponowanych metod, ich systematyczne niepewności mogą okazać się decydujące w przyszłym wyborze strategii. Z lektury rozprawy można wnosić, że przedstawione elementy analizy danych znajdują zastosowanie w przygotowywanej publikacji współpracy LHCb. Niestety, ze względu na przyjętą zasadę „zasłaniania danych” przed zamrożeniem całej procedury eksperymentalnej, w pracy nie znajdziemy wyników analizy statystycznej danych dla badanego rozpadu  $\Xi_c^+ \rightarrow pK\pi^+$ .



INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ  
im. Henryka Niewodniczańskiego  
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

Praca jest poprawnie napisana, choć Autor nie ustrzegł się wzmiankowanych wcześniej uchybień redakcyjnych. Zauważyłem też drobne błędy edycyjne. Na przykład wielkości T i P nie są zdefiniowane we wzorze 8, nie jest jasne które referencje zawierają asymetrie CP cytowane we wzorach 11 i 12, a legendy niektórych rysunków są nieczytelne (np. Ryc. 79). W dyskusji warunków Sacharowa na stronie 7 zaplanowana referencja nie została uzupełniona, a pierwsze zdanie dotyczące tego ważnego fundamentu dalszej dyskusji obarczony jest błędnym sformułowaniem. Na stronie 11 fraza „mean time decay” miała zapewne brzmieć „mean decay time”, a na str. 14 pisząc „luminosity” Autor musiał mieć na myśli „integrated luminosity”. Staranniejsza redakcja mogłaby poprawić odbiór całości, jednakże, nie zmienia to jednoznacznie pozytywnej oceny rozprawy, dokumentującej rzetelnie wykonaną pracę i świadczącą o samodzielności doktoranta i szczegółowym zrozumieniu problemów oraz opanowaniu narzędzi na wszystkich etapach analizy.

Podsumowując, pan mgr inż. Jakub Ryżka przedstawił ciekawą i nowatorską analizę zmierzającą do pomiaru asymetrii ładunkowo-przestrzennej (CP) w trzyciałowych rozpadach barionów powabnych  $\Xi_c^+ \rightarrow pK\pi^+$ . Wkład autorski doktoranta na wstępie obejmuje pełną selekcję danych i jej optymalizację ze względu na statystyczną znaczącość pomiaru oraz maksymalną eliminację możliwych efektów systematycznych. Następnie, Autor dokonał szczegółowej analizy znaczącości pomiaru przy zastosowaniu trzech różnych metod statystycznych. Metoda KDE w jej obecnym kształcie (wersja 1D) nie może być wprawdzie bezpośrednio porównana ilościowo z pozostałymi dwoma ( $S_{CP}$ , Test Energii) ale, jak sam Autor sugeruje, może okazać się bardzo przydatna w przyszłości do eksperymentalnego wyznaczenia rozkładów gęstości prawdopodobieństwa bezpośrednio z danych i tym samym wspomóc na przykład bardzo obiecującą metodę Testu Energii. Ponadto, metoda KDE została w pracy po raz pierwszy zastosowana do tego typu analizy.

Dokumentując swoją pracę doktorant wykazał się dogłębnym zrozumieniem badanych zjawisk jak i zaproponowanych metod statystycznych. Jego wiedzę ekspercką oraz własny wkład w omawianą tematykę potwierdzają prezentacje i artykuły postkonferencyjne które Autor opublikował w czasie przygotowania pracy doktorskiej. Bez wątplenia przedstawiona praca spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim i wnioskuję do Rady Dyscypliny Nauki Fizyczne AGH o dopuszczenie pana mgr inż. Jakuba Ryżki do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Z poważaniem  
Paweł Brückman de Renstrom