

Warszawa, 4 05 2019

prof. dr hab. Mikołaj Misiak
Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego
ul. Pasteura 5, 02-093 Warszawa

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Varvary Batozskaya
pt. "Measurements of CP observables in $B_s^0 \rightarrow J/\psi\varphi$
decays at LHCb."**

Rozprawa doktorska mgr Varvary Batozskaya poświęcona jest pomiarowi asymetrii CP w procesie $B_s^0 \rightarrow J/\psi\varphi$ w eksperymencie LHCb, przy czym cząstka J/ψ identyfikowana jest w kanale rozpadu $J/\psi \rightarrow e^+e^-$, a cząstka φ w kanale rozpadu $\varphi \rightarrow K^+K^-$. Zmierzona wartość naruszającej CP fazy ϕ_s wynosi

$$\phi_s = \left[-0.18 \begin{matrix} +0.37 \\ -0.39 \end{matrix} (\text{stat.}) \pm 0.25 (\text{syst.}) \right] \text{ rad.} \quad (1)$$

Proces $B_s^0 \rightarrow J/\psi K^+K^-$ z J/ψ identyfikowanym w kanale rozpadu $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ oraz z parą K^+K^- pochodzącą głównie z rozpadów φ był przedmiotem analizy opublikowanej przez LHCb w artykule [1] (pozycja [39] w spisie literatury pracy doktorskiej), gdzie otrzymano

$$\phi_s = [-0.058 \pm 0.049(\text{stat.}) \pm 0.006(\text{syst.})] \text{ rad.} \quad (2)$$

W obu przypadkach analizowano dane zebrane w latach 2011-2012 (Run 1), w zderzeniach proton-proton o energii w środku masy 7 i 8 TeV, odpowiadające wycałkowanej świetlności 3 fb^{-1} . Inne pomiary ϕ_s podsumowane w podrozdziale 1.3.5 pracy doktorskiej prowadzą do średniej światowej

$$\phi_s^{\text{w.a.}} = [-0.021 \pm 0.031] \text{ rad,} \quad (3)$$

która zgodna jest zarówno z zerową wartością tej fazy, jak i z przewidywaniem Modelu Standardowego

$$\phi_s^{SM} = \left[-0.0367 \begin{matrix} +0.0007 \\ -0.0008 \end{matrix} \right] \text{ rad.} \quad (4)$$

Stosunkowo mała wartość fazy ϕ_s^{SM} sprawia, że jest ona interesującym parametrem umożliwiającym nakładanie ograniczeń na takie rozszerzenia SM, w których hipotetyczne, nieodkryte jeszcze cząstki wpływają na naruszenie CP w mieszanii $B_s^0-\bar{B}_s^0$ i/lub w rozpadach tych mezonów.

Praca składa się z pięciu rozdziałów, spisu literatury oraz trzech dodatków. W rozdziale pierwszym oraz dodatku A autorka przedstawia podstawy teoretyczne zjawisk związanych z naruszeniem CP w układzie neutralnych mezonów, rozpoczynając od definicji macierzy Cabibbo-Kobayashi-Maskawy oraz jej standardowych parametryzacji (Chau-Keunga i Wolfensteina). Opisuje związek tych parametryzacji z tzw. trójkątami unitarności dla układów $B^0-\bar{B}^0$ oraz $B_s^0-\bar{B}_s^0$. Wyznaczanie w tych układach stanów własnych masy, ich szerokości rozpadów oraz innych parametrów związanych z mieszaniami opisane jest zgodnie z powszechnie używaną notacją Particle Data Group. Asymetria CP będąca przedmiotem pracy określana jest jako indukowana przez mieszanie, tj. staje się obserwowalna dzięki interferencji amplitud mieszania i rozpadu $B_s^0 \rightarrow J/\psi\varphi$. Związek fazy ϕ_s z rozkładami kątowymi ostatecznych produktów rozpadu ($e^+e^-K^+K^-$) opisany jest w końcowej części pierwszego rozdziału.

Rozdział drugi poświęcony jest zwięzłemu przedstawieniu podstawowych elementów detektora LHCb: systemu detekcji śladów, detektorów promieniowania Czerenkowa, kalorymertrów, detektorów mionowych oraz systemu trygerowania. Końcowa część tego rozdziału zawiera krótki opis oprogramowania służącego do rekonstrukcji sygnałów, a także kodów do symulacji Monte Carlo.

Rozdział trzeci oraz dodatek B poświęcone są testom geometrycznego dopasowania położenia stacji rejestrujących ślady cząstek w detektorze LHCb na podstawie pomiaru sygnałów od konkretnych procesów. Ta część pracy dotyczy problemów o charakterze technicznym, które mają znaczenie nie tylko dla głównego przedmiotu pracy (rozpadu $B_s^0 \rightarrow J/\psi\varphi$), ale w zasadzie dla wszystkich pomiarów wykonywanych w LHCb. Rozbudowany charakter tej części sugeruje, że doktorantka miała znaczący wkład własny do rozważanych testów.

Rozdział 4 oraz dodatek C zawierają szczegółowy opis analizy będącej podstawowym tematem pracy, tj. pomiaru fazy ϕ_s w rozpadzie $B_s^0 \rightarrow J/\psi(e^+e^-)\varphi$. Przedstawione są metody selekcji danych, pochodzenie tła o podobnych rozkładach mas inwariantnych, dopasowania tych mas, wymagania dotyczące czasów rozpadu i rozkładów kątowych oraz tagowanie zapachu. Zależne od czasu rozkłady kątowe służą do dopasowania najbardziej praw-

dopodobnych parametrów rozkładu przedstawionych w tabeli 4.21. Błędy systematyczne oszacowane są w podrozdziale 4.7. Ostateczny wynik pomiaru fazy ϕ_s (r-nie (1) powyżej) oraz bardzo krótkie uwagi dotyczące jego interpretacji przedstawione są w podrozdziale 4.8.

Rozdział 5 zawiera podsumowanie oraz oszacowanie niepewności wyznaczenia ϕ_s w przyszłych analizach LHCb, po udoskonaleniach detektora w latach 2021-2029. Lista literatury umieszczona jest nietypowo między głównym tekstem pracy a dodatkami.

Praca napisana jest dobrym językiem, przejrzystie i skrupulatnie, z bardzo szczegółowym opisem aspektów fizycznych i technicznych przeprowadzanych pomiarów. Autorka pracy i promotor pomocniczy, jako jedyni autorzy tej analizy w ramach ponad tysiącosobowej kolaboracji LHCb, niewątpliwie dołożyli starań, aby wszechstronnie przetestować wyniki i zminimalizować błędy systematyczne. Dla recenzenta będącego fizykiem-teoretykiem podstawowym mankamentem jest zbyt zwężony charakter podrozdziału 4.8.1 dotyczącego interpretacji wyników (11 linii druku w liczącej 181 stron pracy). Interpretacja ogranicza się do stwierdzenia, że ostateczny wynik (r-nie (1)) jest zgodny w granicach błędów z przewidywaniem SM (r-nie (4)) i wcześniejszymi pomiarami LHCb, a także do porównania z opublikowaną w 2012 pracą [2] (pozycja [120] w spisie literatury). Praca ta dotyczyła również rozpadu $B_s^0 \rightarrow J/\psi\varphi$ w LHCb, ale z J/ψ rozpadającym się na parę $\mu^+\mu^-$, a nie e^+e^- . Doktorantka stwierdza, że analiza ta oparta była na tej samej wycalkowanej świetłości (3 fb^{-1}), co jest sprzeczne ze streszczeniem pracy [2], w którym deklarowane jest wykorzystanie jedynie 0.37 fb^{-1} wycalkowanej świetłości. Moim zdaniem właściwym porównaniem byłaby analiza [1] oparta na tej samej wycalkowanej świetłości. Oczekiwałbym wyjaśnienia jaka jest główna przyczyna faktu, że niepewności obecnego pomiaru (1) są o około rząd wielkości większe niż w r-niu (2). Czy odpowiada za to przede wszystkim mniejsza efektywność identyfikacji J/ψ w kanale e^+e^- w porównaniu z kanałem $\mu^+\mu^-$ w LHCb, czy też istotne jest również wykorzystanie w analizie [1] par K^+K^- nie pochodzących z rozpadu φ ?

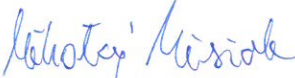
Kilka mniej istotnych uwag krytycznych do tekstu pracy wymienionych jest poniżej.

- Stwierdzenie nad tabelą 1.2 “The Higgs boson H is not related to a fundamental force” możnaby kwestionować, gdyż oddziaływanie dwóch fermionów (np. kwarków top) przez wymianę bozonu Higgsa nie różni się w swojej fundamentalności od ich oddziaływania przez wymianę

bozonu Z .

- Strona 3: "Due to charge conservation, it (Z^0) couples only to fermion-antifermion pairs". Istotne jest, że są to pary fermion-antyfermion tej samej generacji, a nie pary fermion-antyfermion różnych generacji, jak w przypadku bozonu W . Brak sprzężeń generacyjnie pozadiagonalnych dla Z^0 nie wynika jedynie z zasady zachowania ładunku, lecz z uniwersalności sprzężeń bozonów cechowania do fermionów różnych generacji.
- Rys. 1.1: Kąty α i γ powinny być zamienione, aby była zgodność ze standardową notacją i równaniami (1.12)-(1.14).
- Powyżej r-nia (1.38) kaony w fali S są opisane jako pochodzące od mezonu $f_0(980)$. Czy kaony w fali S kreowane bez pośrednictwa żadnego ze znanych rezonansów są zaniechwalne?
- Rys. 1.9 ilustrujący dopuszczalne eksperymentalnie wkłady od nowej fizyki do mieszania $B-\bar{B}$ pochodzi z pracy opublikowanej w 2012. Czy jest on nadal aktualny?
- Rys. B.36: Mamy dwie krzywe (czerwoną i czarną) oraz dwa procesy, ale nie wiadomo co odpowiada czemu.
- Dodatek C.8: "The distributions of both modes are in agreement except for the lower decay time". Jaka jest interpretacja tego ostatniego wyjątku?
- Lista literatury: pozycja [84] dotyczy części technicznej pracy opisanej w rozdziale 3. Brak jest podobnego odniesienia do zasadniczej analizy opisanej w rozdziale 4. Warto byłoby również zacytować wystąpienia konferencyjne doktorantki dotyczące pomiarów fazy ϕ_s , np. [3].

Pomimo powyższych uwag moja ogólna ocena pracy jest pozytywna. Stwierdzam, że praca doktorska mgr Varvary Batozskaya spełnia wymagania merytoryczne stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie jej do dalszych etapów postępowania.


Mikołaj Misiak

Literatura

- [1] R. Aaij *et al.* (LHCb Collaboration), Phys. Rev. Lett. **114** (2015) 041801 [arXiv:1411.3104].
- [2] R. Aaij *et al.* [LHCb Collaboration], Phys. Rev. Lett. **108** (2012) 101803 [arXiv:1112.3183].
- [3] V. Batzskaya, EPJ Web Conf. **182** (2018) 02009.

