

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr Aleksandra Gajosa p.t. „Investigations of fundamental symmetries with the electron-positron systems”

Przedstawiona do recenzji praca dotyczy bardzo fundamentalnego zagadnienia w fizyce, a mianowicie poszukiwania łamania symetrii dyskretnych w układach dostępnych w oddziaływaniach elektron - pozyton. Próba została przeprowadzona w dwóch eksperymentach różnych w sensie pochodzenia danych i idei pomiaru. Bezpośredni test symetrii względem odwrócenia w czasie został wykonany dla kwantowo splątanych par neutralnych kaonów wytworzonych procesach $e^+e^- \rightarrow \phi \rightarrow K_S K_L$ i zarejestrowanych w eksperymencie KLOE na zderzaczu DAΦNE w Laboratorium Narodowym we Frascati. Druga część pracy, w zasadzie tylko metodyczna, miała na celu poszukiwania niezerowych korelacji kątowych dla trzech fotonów pochodzących z anihilacji orto-pozytonium, układu zbudowanego również z leptonów e^+e^- , przy użyciu detektora J-PET – Jagiellońskiego Pozytonowego Emisyjnego Tomografu. Warto zaznaczyć, że urządzenie to zostało zaprojektowane i zbudowane w Instytucie Fizyki UJ dla diagnostyki medycznej w celu nieinwazyjnego obrazowania wnętrza człowieka, a jego znakomite własności pozwalają na użycie w badaniach podstawowych fizyki.

Wartością pierwszej części analizy są: dane uzyskane z unikatowego w skali światowej urządzenia dedykowanego badaniom fizyki kaonów, perfekcyjne opracowanie metodyki pomiaru, która będzie pożyteczna do powtórzenia testu na danych z eksperymentu KLOE2 przy zmodernizowanym detektorze i większej statystyce przypadków. Druga próba atakująca to samo zagadnienie fizyczne w układzie lepton-antylepton różni się aparaturą i obszarem energii, ale główne elementy metodyki pomiaru w dużym stopniu można uznać za wspólne. Szczególne znaczenie w obu eksperymentach odgrywa opracowanie dedykowanej techniki rekonstrukcji opartej na trilateracji.

Praca stanowi więc spójną, o szerokim horyzoncie próbę włączenia się w światowe dalekosieżne plany badawcze prowadzące, być może, nawet do tak fundamentalnego zagadnienia jakim jest naruszenie symetrii między materią a antymaterią w ewolucji Wszechświata. Ten walor pracy można uznać za zasługę promotora, natomiast warsztatowo perfekcyjny i świadczący o dojrzałości naukowej doktoranta ważny przyczynek do badań decyduje o mojej wysokiej ocenie rozprawy.

Praca mgr Aleksandra Gajosa składa się ze wstępu, ośmiu rozdziałów, trzech dodatków, bardzo starannie dobranej bibliografii zawierającej 108 pozycji i liczy 135 stron.

We wstępie autor osadza pod względem merytorycznym i historycznym tematykę pracy, określa użyty materiał doświadczalny z eksperymentu KLOE oraz dane pochodzące z urządzenia J-PET i uzasadnia w rozsądny sposób połączenie tych dwóch analiz w jedną rozprawę. Standardowo na końcu wprowadzenia przedstawiona jest zawartość rozdziałów. To, czego mi brakuje we wstępie, to skrótowego wyszczególnienia, które elementy analizy zostały wykonane samodzielnie przez doktoranta. W przypadku prac wykonywanych w

dużych zespołach badawczych naturalnym jest korzystanie np. z bazy eksperymentu zawierającej zrekonstruowane oddziaływania lub z wygenerowanych próbek Monte Carlo dla określonej kategorii przypadków. Drugim, moim zdaniem, mankamentem utrudniającym ocenę jest brak we wstępie informacji o udziale autora w pracach kolaboracji KLOE i o tym jaką rolę odegrał w zespole J-PET, bo niewątpliwie każdy członek eksperymentu uczestniczy w bardziej lub mniej rutynowych zadaniach. Są to uwagi czysto redakcyjne odnośnie konstrukcji rozdziału wstępnego i nie umniejszają wartości analizy.

Rozdział pierwszy zawiera omówienie najważniejszych zagadnień teoretycznych dotyczących symetrii względem odwrócenia w czasie (T), relację z dotychczasowych poszukiwań naruszenia tej symetrii oraz zestawienie własności układu neutralnych kaonów używanych do bezpośredniego testu symetrii T. W rozdziale zwraca uwagę bardzo dobra orientacja autora zarówno na temat historycznych już eksperymentów użyciem kaonów, jak i wyników eksperymentu CPLEAR, ale także znajomość testów naruszenia symetrii T dla neutralnych mezonów B, przeprowadzonych przez eksperyment BaBar. (Dla kompletu korelacjami typu Einstein-Podolsky-Rosen dla zapachowo splątanych neutralnych mezonów B zajmował się też eksperyment Belle (PRL 99,131802 (2007))).

Równie kompetentnie przedstawia się rozdział drugi rozprawy traktujący o zasadzie bezpośrednich testów symetrii odwrócenia w czasie dla kwantowo splątanych neutralnych kaonów i możliwości ich realizacji w eksperymencie KLOE. W oparciu o pracę J. Bernabeu et al., (Nucl.Phys. B868 (2013)) precyzującą nową metodę przeprowadzenia bezpośredniego testu symetrii odwrócenia w czasie dla układu kwantowo splątanych kaonów w „fabrykach Φ ”, autor wprowadza definicje niezbędnych obserwabli i przedstawia strategię pomiarów.

Rozdział trzeci poświęcony jest podstawom testów symetrii dyskretnej dla rozpadu ortopozytonium przeprowadzonych i planowanych w eksperymencie J-PET. W zestawieniu własności ortopozytonium (podrozdział 3.1) średnie czasy życia para- i orto-pozytonium są zamienione więc wartości są sprzeczne z wywoływaniem na temat możliwości pomiaru. Rozdział trzeci zawiera również wprowadzenie do pomiaru kątowych korelacji ortopozytonium na 3 fotony co jest postawą testu symetrii. Rozdział czwarty jest poświęcony aparaturze detekcyjnej tj. eksperymentowi KLOE i tomografowi J-PET. Autor skrupulatnie opisuje elementy detektorów z rozsądnym podkreśleniem tych ich właściwości, które są istotne dla pomiarów będących przedmiotem pracy. Dwa kompletnie różne systemy detekcyjne łączy wspólny algorytm rekonstrukcji przedstawiony w rozdziale piątym. Rozdział ten, jeden z najważniejszych w rozprawie, zawiera opis metody trilateracji użytej dla rozpadów $K_L \rightarrow 3\pi^0 \rightarrow 6\gamma$ w pomiarach z eksperymentu KLOE, ale także zaadaptowanej do przypadku anihilacji atomów orto-pozytonium na 3 fotony w eksperymencie J-PET. Generalnie metoda pozwala dla fotonów zarejestrowanych w detektorze na określenie punktu i czasu rozpadu. Idea trilateracji jest znana i powszechnie używana w GPS (Global Positioning System). Takie matematyczne podejście zostało wykorzystane przez krakowskich fizyków w eksperymencie KLOE do opracowania dedykowanej techniki rekonstrukcji rozpadu $K_L \rightarrow 3\pi^0$. W rozdziale piątym prezentowana również jest adaptacja tej metody do przypadku rejestracji anihilacji orto-pozytonium na 3 fotony w detektorze J-PET. Szczegółowy, matematycznie poprawny opis procedury jest argumentem za użyciem jej w obu eksperymentach będących przedmiotem rozprawy. W tekście pracy tego nie znalazłam, ale podejrzewam na podstawie publikacji (NIM A819, 54 (20016), Acta Phys. Pol., 13 (2015)) i referatów doktoranta, że jego udział w przygotowaniu i wytestowaniu obu odmian metody trilateracji był bardzo znaczący. Kluczowymi rozdziałami pracy są rozdziały szósty i siódmy. Rozdział szósty zawiera pełną analizę próbki danych eksperymentu KLOE zebranych w okresie 2004-2005 o scałkowanej świetłości $\sim 1.7 \text{ fb}^{-1}$. Poczynając od selekcji i rekonstrukcji przypadków procesów $K_S K_L \rightarrow \pi^\pm e^\mp \nu 3\pi^0$ poprzez wszystkie etapy analizy: rekonstrukcję $K_L \rightarrow 3\pi^0$, oszacowanie pędu K_S , selekcję semileptonowych rozpadów K_S , analizę czasu przelotu dla cząstek

naładowanych i dyskusję możliwych przypadków tła po kinematyczny fit pozycji wierzchołka i czasu rozpadu, relacja zawiera logiczny, perfekcyjnie wykonany i bardzo dobry opis procedury. Podobnie, również wyczerpująco, przedstawione są operacje dla kanału $K_S K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^\pm e^{\mp} \nu$. O wartości wyniku oprócz statystyki użytych przypadków waży określenie wydajności różnego typu selekcji przypadków użytych w analizie oraz oszacowanie błędów systematycznych. To także zostało w oparciu o symulacje Monte Carlo wykonane bardzo skrupulatnie i z dużym wyczuciem fizycznym. Wynikiem tej części analizy, są krotności obserwacji procesów $K_S K_L \rightarrow \pi^- e^+ \nu 3\pi^0$ i $K_S K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi e \nu$ wyrażone w funkcji różnicy czasów własnych rozpadów obydwu kaonów. Zostały one wykorzystane do wyznaczenia asymptotycznego poziomu dwóch stosunków krotności podwójnych rozpadów neutralnych kaonów. O efekcie łamania symetrii T w tym przypadku mają świadczyć dwie wielkości R_2 i R_4 , których wyznaczone wartości w granicach błędów nie różnią się od jedności. W tym sensie wynik pierwszego eksperymentu jest niewystarczający do stwierdzenia łamania symetrii T. Nie oznacza to negatywnego rezultatu pracy. Przeprowadzona analiza wykazała, że pomiar możliwy jest do przeprowadzenia, rekonstrukcja jest wykonalna i przy większej statystyce przypadków i usunięciu niektórych niepewności systematycznych, które zostały zidentyfikowane, eksperyment KLOE2 ma szansę na statystycznie znaczący test symetrii T.

Rozdział siódmy poświęcony jest studiom możliwości użycia tomografu J-PET do poszukiwania niezerowych korelacji kątowych w rozpadach orto-pozytonium na trzy fotony, co może służyć badaniom zachowania symetrii dyskretnych. Badania zostały wykonane przy pomocy symulacji Monte Carlo i realnych pomiarów w detektorze. Wynikiem jest sprawdzenie skuteczności zastosowania metody trilateracji do rekonstrukcji. Wynik ten jest istotny ze względu na możliwość wykorzystania do wyznaczenia kierunku spinu pozytonów tworzących orto-pozytonium i kontroli polaryzacji w eksperymencie. W teście przy pomocy zebranej próbki danych stwierdzono możliwość identyfikacji anihilacji na trzy fotony i rekonstrukcji tego procesu. Ten pionierski wynik uważam również za sukces pracy.

Rozdział ósmy rozprawy to podsumowanie i perspektywy. Z przyjemnością stwierdzam, że wnioski autora w większości pokrywają się z moją oceną wyników pracy.

Za najwartościowsze aspekty pracy uważam:

- Ciekawe zestawienie dwóch kompletnie różnych eksperymentów do próby ambitnych badań fundamentalnych zagadnień w fizyce,
- Zastosowaną metodę badawczą i opracowanie własnej techniki analizy pozwalającej na wypracowanie schematu analizy dla eksperymentu KLOE2, a także zidentyfikowanie tych źródeł błędów systematycznych z którymi trzeba się będzie zmierzyć,
- Wkład w rozpracowanie metody trilateracji do rekonstrukcji i jej adaptację do eksperymentów fizycznych,
- Dobrą orientację w zagadnieniach teoretycznych i jak na młodego naukowca, dojrzały warsztat doświadczalny,
- Bardzo dobrze napisaną i starannie zredagowaną pracę doktorską

Rozprawę p. mgr Aleksandra Gajosa oceniam wysoko biorąc pod uwagę: interesujący, o szerokim horyzoncie temat, dojrzałą pod względem doświadczalnym analizę i bardzo staranną redakcję pracy.

Jeżeli chodzi o uwagi krytyczne to oprócz przedstawionych już zastrzeżeń do zawartości wstępu pracy (które tak naprawdę odnoszą się do Pana Promotora, bo doktorant redagował

rozprawę po raz pierwszy), zauważyłam błąd w wartościach czasów życia pozytonium i nieliczne literówki.

Z pełnym przekonaniem stwierdzam, że przedstawiona rozprawa spełnia wszelkie wymogi stawiane pracom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie mgr Aleksandra Gajosa do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

W moim przekonaniu rozprawa powinna być wyróżniona.

Donata Kucelarska