

Prof. Antoni Szczurek
Institute of Nuclear Physics (PAN)
ul. Radzikowskiego 152
31-345 Kraków

Recenzja rozprawy doktorskiej Darii Kisielewskiej zatytułowana: "Studies of CPT symmetry violation in matter-antimatter systems"

Praca pani Darii Kisielewskiej zatytułowana: "Studies of CPT symmetry violation in matter-antimatter systems" dotyczy badania jednej z najbardziej podstawowych symetrii współczesnej fizyki – symetrii CPT (złożenie trzech podstawowych symetrii: parzystości ładunkowej, odbicia przestrzennego i odbicia strzałki czasu).

Praca składa się z dwóch części. Część pierwsza dotyczy wyznaczenia asymetrii z rozpadów $K_s \rightarrow \pi^- e^+ \nu$ and $K_s \rightarrow \pi^+ e^- \bar{\nu}$. Dopiero porównanie z rozpadami K_L może dostarczyć informacji na temat łamania symetrii CPT. Te badania zostały wykonane w oparciu o dane eksperymentalne zgromadzone przez grupę badawczą KLOE. Część druga dotyczy badań możliwości użycia detektora J-PET. Badaną obserwabłą może być korelacja pomiędzy wektorami pędu kwantów gamma pochodzących z anihilacji ortopozytronium a jego wektorem spinu. Ta część przedstawia symulacje typu Monte Carlo oparte o urządzenie budowane w Uniwersytecie Jagiellońskim.

Cała praca jest stosunkowo krótka (poniżej 70 stron) co jest moim zdaniem jej zaletą. Napisana jest dobrym językiem bez zbędnych nieistotnych dodatków. Autorka aktywnie uczestniczyła w badaniach grupy badawczej KLOE. Niestety nie wiem czy miała swój wkład w budowę detektora J-PET i ewentualne pomiary.

Praca składa się z raczej krótkiego wstępu i dwóch części zasadniczych.

Wstęp dotyczy tylko dwóch rozważonych w pracy przykładów poszukiwania łamania symetrii CPT - rozpadów semileptonowych krótkożyjących kaonów (K_s) i rozpadów ortopozytronium. Pokróctce przedstawiono rozważania teoretyczne i wprowadzono zmienne które w sposób ilościowy mogą być miarą łamania symetrii CPT ale również oddzielnie CP i T . Asymetria ładunkowa rozpadu została wyrażona przez te wielkości pomocnicze. Rozważono funkcje spinowe para- i orto-pozytronium. Przedstawiono podstawowe wzory na szerokość obu tych stanów. Wprowadzono zmienną, typu korelacyjnego, która powinna zniknąć w przypadku zachowania symetrii CPT, a której analiza mogłaby być potencjalnie użyta do stwierdzenia łamania CPT. Przedyskutowano pokrótce efekty które mogą udawać łamanie CPT.

W rozdziale pierwszym części pierwszej opisano eksperyment KLOE. Opis rozpoczął od krótkiego opisu kompleksu akceleratora DAFNE. Następnie opisano sam detektor KLOE. Opisano zarówno komorę dryfową jak i kalorymetr

elektromagnetyczny. Nieco uwagi poświęcono systemowi trygerowania. Na koniec przedyskutowano algorytm klasyfikacji zdarzeń.

Rozdział drugi (najciekawszy) poświęcony jest analizie wyników uzyskanych w eksperymencie KLOE. Zdefiniowano jak wyliczana jest eksperymentalnie asymetria ładunkowa wybranego rozpadu semileptonowego uwzględniając wydajności eksperymentalne. Pokazano jak wybiera się długożyciowe mezony K_L , które w dużej części docierają do kalorymetru. Wybiera się te klastry w kalorymetrze które nie są związane ze śladami (ang. track) w komorze dryfowej. Krótki podrozdział poświęcony jest wyznaczaniu pędu mezonów K_L . Pomiar eksperymentalny powiązany jest z symulacjami typu Monte Carlo. Selekcji rozpadów $K_S \rightarrow \pi e \nu$ poświęcony jest inny podrozdział. Głównym tłem jest proces $K_S \rightarrow \pi^+ \pi^-$ z błędną identyfikacją π jako e co jest związane z 10^4 większym stosunkiem rozgałęzień. Pokazano jak redukować niepożądane tło. Pokazano jak pomagać sobie zależnościami czasowymi do dalszej redukcji tła. Przedstawiono konkretne parametry cięć wynikające z doświadczenia. Przedstawiono wiele wykresów dwuwymiarowych jak dokonywać cięć. Równoległe badania Monte Carlo stały się w tym kontekście bardzo użyteczne. Podrozdział 3.5 poświęcony jest metodzie wyciągnięcia sygnału. Pokazano jak uzyskać rozpady K_L jako próbkę kontrolną. Wyznaczono asymetrię ładunkową dla długożyciowych kaonów. Uzyskany wynik jest dużo gorszy niż ten uzyskany przez grupę badawczą KTeV. Brakuje mi tutaj komentarza (dlaczego i czy można używać wyniku grupy KTeV).

Ostatni rozdział pierwszej części poświęcony jest przedstawieniu wyników asymetrii ładunkowej dla rozpadów semileptonowych krótkożyjących kaonów neutralnych. Podsumowano krótko analizę wydajności. Uwzględniono szereg efektów takich jak te związane z trygerem i klasyfikacją zdarzeń, tagowaniem i samą analizą. Tę ostatnią, spowodowaną różnymi przyczynami omówiono nieco dokładniej. Wyniki zestawiono w Tabeli 4.1. Na koniec przedstawiono całkowitą asymetrię rozważonej próbki. Uzyskano asymetrię rzędu 10^{-3} z niepewnością pomiarową podobnego rzędu. Stosunkowo duża niepewność statystyczna nie pozwala na zidentyfikowanie znaku asymetrii. Przeanalizowano stabilność wyniku od czasu, dzieląc całą próbkę na 10 podpróbek o podobnej statystyce. W ramach błędu statystycznego uzyskane wyniki wydają się niezależne od próbki (czasu). Pokazano to również dla zależności "czasowej" różnych wydajności. Tu również nie zaobserwowano żadnego niepokojącego efektu. Rozdział zawiera również szczegółową analizę przyczyn niepewności systematycznych. Wypadkowa niepewność systematyczna dla asymetrii ładunkowej okazała się nieco mniejsza niż niepewność statystyczna. Do analizy włączono również starszą próbkę danych uzyskanych przez grupę badawczą KLOE. Połączona próbka dała nieco mniejszą (negatywną) asymetrię ładunkową. Obniżył się nieco błąd statystyczny. Przedstawiono szczegółową analizę przyczyn do błędu systematycznego. Według autorki wiele przyczyn prowadzi do podobnego wkładu do

błędu systematycznego. Na koniec, włączając podobną asymetrię dla długożyjących kaonów wyznaczono niepewności pewnych wielkości zdefiniowanych we wstępie, które są miarą łamania symetrii CPT. Wyznaczono pasmo niepewności tych wielkości. Wynik jest konsystentny z zerem to znaczy nie znaleziono łamania CPT. Odkrycie takiego łamania byłoby oczywiście sensacyjne ale nikt go nie oczekiwał. W wyznaczeniu niepewności użyto A_L uzyskane przez grupę badawczą KTeV. Autorka (autorzy) mogli się pokusić o użycie własnej wartości uzyskanej dla A_L i przedstawionej w obecnej rozprawie. Rozumiem, że wielkość uzyskana przez KTeV jest dużo dokładniejsza i wskazuje na niezerową wartość A_L . W końcowej analizie użyto bardzo dokładnie uzyskanej wielkości A_L i znacznie gorzej wyznaczonej wielkości A_S (to oczywiście nie jest zarzutem). Brakuje trochę dyskusji czy inne eksperymenty (na przykład KTeV) mogły uzyskać podobne lub bardziej precyzyjne A_S . Będę prosić o to wyjaśnienie podczas publicznej obrony.

Rozdział 5 (pierwszą część drugiej) poświęcony jest opisowi detektora J-PET (positron emission tomograph) konstruowanego w ostatnich latach w Uniwersytecie Jagiellońskim. Nowym pomysłem tego projektu jest użycie polimerów plastikowych zamiast zwykle używanych kryształów scyntylicyjnych. Prototyp (z jednym paskiem) wydaje się wskazywać lepszą przestrzenną zdolność rozdzielczą. Również czasowa zdolność rozdzielcza wydaje się lepsza niż tego typu urządzeń komercyjnych. W połączeniu z dużą granularnością stwarza to możliwość badania ilościowego rozpadu ortopozytronium. Autorka przedstawiła niektóre szczegóły projektu. Cały układ składa się z trzech warstw pasków. Przedstawiła pokrótce zasadę działania. Informacja czasowa jest tu bardzo ważna. Przedstawiono jak wyliczać położenie na pasku. Przypomniano wzór na przekrój czynny na rozpraszanie Comptona. Detektor mierzy energię zdeponowaną. Na rysunku 5.5 przedstawiono schemat działania software-u.

Rozdział 6 poświęcony jest pakietowi symulacyjnemu Monte Carlo przygotowanemu do interpretacji wyników z detektora PET. Część symulacyjna dotycząca rozpadu ortopozytronium na trzy fotony została wykonana, o ile dobrze zrozumiałem, przez autorkę dysertacji. Schemat procesowania danych przedstawiony został na schemacie pokazanym na rysunku 6.1. Krótki rozdział poświęcono procesowi formowania się pozytronium (para lub orto). Przedstawiono równanie na prawdopodobieństwo anihilacji na trzy fotony. Następnie przedstawiono wyniki symulacji na dwa (podrozdział 6.3) i trzy (podrozdział 6.4) fotony. Dla rozpadu trzyciałowego przedstawiono wzór z kwantowej elektrodynamiki na różniczkowy przekrój czynny w funkcji energii dwóch fotonów w środku masy ortopozytronium. Wygenerowano rozkłady jedno i dwuwymiarowe (typu rozkładu Dalitza). Przedstawiono również rozkłady zdeponowanej energii kwantów gamma z rozpadu ortopozytronium. Nie udało mi się zrozumieć rysunku 6.6 (b) przedstawiającego wydajność rejestracji kwantów gamma. Poproszę o wyjaśnienie o co chodzi podczas publicznej obrony.

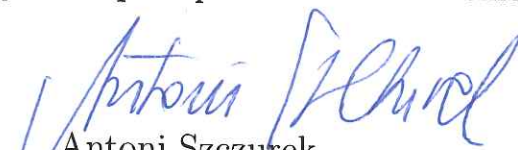
Rozdział 7 dyskutuje możliwość analizy łamania CPT przy użyciu detektora J-PET. Autorka przedstawia najpierw taką analizę przy pomocy detektora Gammasphere wykonaną wcześniej przez Vettera i Friedmana w roku 2003. Idea polega na pomiarze asymetrii liczby zliczeń względem kierunku zgodnego i przeciwnego do kierunku spinu ortopozytronium, które jest spolaryzowane, a polaryzację potrafimy wyliczyć. Wielkością mierzoną jest stosunek asymetrii do polaryzacji ortopozytronium. (równanie (7.2)). Lepsza zdolność kątowna i czasowa J-PET w stosunku do Gammasphere pozwala przypuszczać, że wynik uzyskany przez J-PET powinien być zdecydowanie lepszy niż dotychczasowy. Podrozdział 7.1 poświęcony jest możliwości kontroli stanu polaryzacji ortopozytronium. Emitowane promieniowanie β^+ ze źródła jest spolaryzowane względem swojego kierunku pędu. Polaryzacja ortopozytronium może być otrzymana używając argumentu statystycznego. Zaproponowane zostało użycie cylindrycznej tarczy o promieniu 10 cm. Podrozdział 7.2 poświęcony jest redukcji tła. Dominującym przyczynkiem jest rozpad na dwa fotony stowarzyszony z dodatkowym rozproszeniem przynajmniej jednego fotonu w detektorze. Rysunek 7.4 świetnie pokazuje jak rozdzielić sygnał od tła w przestrzeni dwóch kątów rozwarcia. Nałożone cięcia pozwalają zredukować tło o kilka rzędów wielkości. Trudno jest zrozumieć skąd się wzięły górne ograniczenia na tło w równaniu (7.4) i (7.5). Krótka dyskusja wydajności detektora przedstawiona jest w podrozdziale 7.3. Dyskusja i perspektywy kończą rozdział siódmy. Na rysunku 7.5 pokazano niepewność wyniku jako funkcję liczby zarejestrowanych zdarzeń ortopozytronium. Dla porównania na rysunku pokazano wynik Vettera i Friedmana. Nie powiedziano jasno jaką statystykę można oczekiwać w przyszłym eksperymencie z J-PET. Nie do końca jest dla mnie jasne co jest na osi y, a to jest tu kluczowe.

Rozdział 8 zawiera krótkie podsumowanie działalności. Trochę brakuje mi przedstawienia perspektyw, w tym czasowych, dotyczących badania rozpadu ortopozytronium.

Spis referencji obejmuje prawie sto pozycji do których autorka odniosła się w swojej rozprawie.

Praca doktorska jest starannie zredagowana i napisana dobrym językiem. Rysunki są czytelne i starannie przygotowane.

Podsumowując, przedstawiona mi rozprawa doktorska jest interesująca i spełnia wszystkie wymogi stawiane rozprawom doktorskim. Wnoszę o dopuszczenie pani Darii Kisielewskiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego, w tym do publicznej obrony.


Antoni Szczurek
Kraków, 31.12.2018