

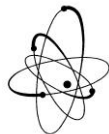
prof. dr hab. inż. **Tomasz Szumlak**
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH
szumlak@agh.edu.pl

11.05.2024, Kraków

**Recenzja rozprawy doktorskiej przygotowanej przez magistra Nikodema
Krawczyka pt.:
„Studies of quantum entanglement in pair of high energetic photons from e^+e^-
annihilation”**

Praca doktorska, której autorem jest Nikodem Krawczyk, pt. „**Studies of quantum entanglement in pair of high energetic photons from e^+e^- annihilation**”, przygotowana pod kierunkiem prof. Pawła Moskala dotyczy analizy danych zebranych przez detektor J-PET. Dane te reprezentują przypadki rozpadów para-pozytronium z parą fotonów anihilacyjnych w konfiguracji back-to-back. Układ taki może być splątany, co można wykorzystać w praktyczny sposób do poprawienia jakości rekonstrukcji obrazów w przypadku medycznego zastosowania detektora J-PET.

Przedstawiona rozprawa napisana jest w języku angielskim i zawiera 54 strony, nie wliczając przypisów literaturowych. Struktura tej zwięzłej pracy jest spójna i stanowi dobrze skomponowaną całość. Wstęp opisuje motywację do wykonania analizy oraz wprowadza najważniejsze wielkości fizyczne, które zostały zmierzone i przeanalizowane przez Autora rozprawy. W szczególności, opisano w tej części kinematykę rozpraszania Comptona oraz kluczową obserwabłę, kąt φ , która jest kątem pomiędzy płaszczyznami rozpraszania fotonów pochodzących z anihilacji para-pozytronium (p-Ps). Zmienna ta jest również estymatorem kąta względnego pomiędzy początkowymi płaszczyznami polaryzacji fotonów anihilacyjnych. Wstęp zawiera również jasno opisany wkład Autora do prac zespołu J-PET, kierowanego przez promotora rozprawy prof. Pawła Moskala. Na pierwszym miejscu wymieniono wkład do rozwoju platformy oprogramowania J-PET, w szczególności do pakietu symulacyjnego opartego o silnik



GEANT4. Autor wziął również udział w przygotowaniu detektora oraz zbieraniu danych. Przedstawiona analiza została wykonana w całości przez Autora pracy.



Rozdział drugi opisuje skrótowo kilka znaczących eksperymentów, których celem był pomiar korelacji pomiędzy płaszczyznami polaryzacji fotonów pochodzących z rozpadów p-Ps. Fundamentalny opis teoretyczny dotyczący korelacji azymutalnych polaryzacji dwóch fotonów został sformułowany przez Wheelera w 1946 roku a następnie zmodyfikowany przez Pryce'a oraz Warda. Eksperymentalnie, najwygodniej jest wykorzystać rozpraszania Comptona do weryfikacji tej teorii, przy czym kluczową zmienną, która podlega obserwacji jest stosunek $\frac{N_{\perp}}{N_{\parallel}}$, gdzie licznik oznacza przypadek, gdy względny kąt azymutalny φ pomiędzy rozproszonymi fotonami wynosi 90° a mianownik reprezentuje przypadek, gdy ten kąt wynosi 0° . Autor wymienia trzy najważniejsze eksperymenty: „York”, „Moscow” oraz „Zagreb”. Choć wyniki przeprowadzonych eksperymentów są zbieżne, to uzyskane przez poszczególne grupy rezultaty pokazują interesujące różnice.

Rozdział trzeci zawiera wyczerpujący wstęp teoretyczny dotyczący rozpadów para- oraz orto-pozytronium, jak również opis splątania kwantowego, które jest możliwe z uwagi na specyfikę matematycznego sformułowania mechaniki kwantowej, w szczególności zasadę linowej superpozycji stanów. Argument przedstawiony przez Einsteina, Podolskiego oraz Rosena, zakwestionowały poprawność interpretacji teorii kwantowej, jako łamiącej zasadę lokalności (local-realism). Szereg eksperymentów, przeprowadzonych w latach 80 ubiegłego wieku pokazało, że teoria kwantowa łamie klasyczne założenia znane jako paradoks EPR. Autor wprowadza ścisły opis rozpadu p-Ps w wiodącym rzędzie opisanym przez diagram Feynmana $e^{+}e^{-} \rightarrow \gamma\gamma$. Różniczkowy przekrój czynny na taki proces opisany jest przez formułę Klein-Nishina, którą zwyczajowo można przedstawić na płaszczyźnie (θ, η) , gdzie θ to kąt rozpraszania Comptona, natomiast η reprezentuje kąt pomiędzy płaszczyzną rozproszenia oraz płaszczyzną polaryzacji fotonu rozpraszanego. W przypadku ustalenia konkretnej wartości dla kąta rozpraszania możliwe jest przedstawienie modulacji przekroju czynnego w funkcji kąta η . Maksymalna modulacja spodziewana jest dla kąta rozpraszania $\theta \approx 82^{\circ}$. W przypadku prowadzonych przez Autora pomiarów, analizę najwygodniej jest prowadzić na płaszczyźnie wyznaczonej przez kąty rozpraszania obu fotonów anihilacyjnych (pierwotnych). Reprezentację tę Autor nazywa „visibility”. W rozdziale tym wyznaczono również formuły opisujące przekroje czynne dla stanów splątanych oraz separowanych poprzez zastosowanie reprezentacji operatorów Krausa (dla formuły Klein-Nishina). Rozważania teoretyczne doprowadziły do zdefiniowania rejonów zainteresowania na płaszczyźnie „visibility” oraz wyznaczenia rozkładów kąta azymutalnego φ , w tych rejonach dla przypadków splątanych i separowalnych funkcji falowych fotonów anihilacyjnych. Rozkłady te stanowią kluczowe wielkości analizowane przez Autora rozprawy. Treść rozdziału jest przejrzysta i łatwa do zrozumienia dla czytelnika posiadającego podstawową wiedzę z zakresu mechaniki kwantowej a przedstawione wnioski są



niezbędne dla zrozumienia strategii zastosowanej w algorytmach selekcji przypadków omawianych w dalszej części pracy.



Rozdział czwarty opisuje układ eksperymentalny oparty o detektor J-PET, który docelowo ma mieć praktyczne zastosowanie w diagnostyce medycznej. Specjalnie przygotowane źródło, zawierające sód Na^{22} było wykorzystane jako generator pozytonów. Obudowa poliamidowa zapewnia niską atenuację fotonów oraz pomaga w szybkiej termalizacji pozytonów. Detektor J-PET użyty w zbieraniu danych składał się ze 192 modułów scyntylacyjnych ułożonych koncentrycznie w trzy warstwy. Sygnały są odczytywane po obu stronach modułów przy użyciu fotopowielaczy Hamamatsu. Sygnały elektryczne próbkowane są następnie w celu pomiaru wielkości Time-over-Threshold (TOT), która jest proporcjonalna do zdeponowanej energii przez oddziałujące fotony anihilacyjne. Próbkowanie sygnału analogowego odbywa się z częstotliwością około 30 ps. W rozdziale tym omówiono również dokładnie dwie najważniejsze zmienne niskiego poziomu, które są kluczowe dla całego łańcucha pomiarowego oraz analizy danych: pozycja oddziaływania fotonów z materiałem czynnym detektora J-PET (przy użyciu pomiaru różnic czasu rejestracji sygnałów na końcach modułu scyntylacyjnego) oraz wspomnianej powyżej zmiennej TOT.

Rozdział piąty opisuje szczegółowo przygotowaną przez Autora symulację procesów sygnałowych, które zawierały dwa fotony anihilacyjne w konfiguracji back-to-back. Przypadki symulacyjne zawierały pozycje oddziaływania fotonów pierwotnych oraz zrekonstruowane wartości zmiennych $d_{1/2}$, które reprezentują odległości pomiędzy pozycjami wtórnych i pierwotnych oddziaływań dla obu fotonów anihilacyjnych. Próbką symulacyjna zawierała 10^{11} rozpadów sygnałowych, które zostały następnie odpowiednio sformatowane przy użyciu platformy oprogramowania J-PET. Symulacja została skalibrowana w sposób bezwzględny zakładając, że rozpady pochodziły ze źródła o aktywności 1 MBq. Procedura symulacji uzupełniona została również o informację na temat rzeczywistych rozdzielczości zmierzonych przy użyciu detektora J-PET (w szczególności rozdzielczość położenia wzdłuż osi Z, rozdzielczość czasową oraz energetyczną). Tak przygotowane przypadki symulacyjne przeszły procedury selekcji podobne do tych, jakim podlegają rzeczywiste przypadki rejestrowane przez detektor J-PET. W trakcie rekonstrukcji uzyskano rozkłady zdeponowanej energii, zrekonstruowanej pozycji źródła anihilacji w płaszczyźnie XY układu współrzędnych modelowanego detektora oraz zrekonstruowaną pozycję źródła na osi Z. Procedura symulacyjna zawierała również część opisującą splątanie fotonów anihilacyjnych. W celu porównania wyników rzeczywistych z obiema hipotezami (stany splątane lub separowalne) symulacja została również wyposażona w możliwość modelowania obu typów przypadków. Dzięki temu możliwe było wygenerowanie spodziewanych rozkładów kąta azymutalnego φ dla wybranych kątów rozpraszania pierwotnych fotonów anihilacyjnych.

Rozdział szósty jest kluczową częścią rozprawy i zawiera opis analizy danych zebranych przez detektor J-PET. Cały łańcuch przetwarzania jest podobny do tego, który został



przedstawiony w części opisującej analizę próbek symulacyjnych. Z uwagi na to, że system akwizycji detektora zbiera dane w trybie „trigger-less” znaczącym problemem jest odpowiednie sformatowanie strumienia danych. Następne kroki selekcji to cięcia na pozycję zrekonstruowanego wierzchołka oddziaływania fotonu wzdłuż osi Z (uwzględniające część aktywną modułu scyntylacyjnego J-PET), cięcia na zdeponowaną energię (wyrażoną jako TOT) oraz wybór par fotonów pochodzących z anihilacji p-Ps. Następnie algorytm selekcji przyporządkowuje wierzchołki oddziaływań wtórnych do odpowiednich wierzchołków oddziaływań pierwotnych (wierzchołków opisujących pierwotne rozpraszanie Comptona fotonów anihilacyjnych) używając zmiennych Δ_i oraz cięć eliptycznych zdefiniowanych przy użyciu próbek symulacyjnych. Przypadki, które przeszły powyższą procedurę selekcji podlegają poprawkom aparaturowym wyznaczonym przy użyciu danych Monte-Carlo. Następnie Autor wyznacza rozkłady kąta pomiędzy płaszczyznami rozpraszania fotonów, aby porównać wyniki z hipotezami reprezentującymi przypadki splątane oraz separowalne dla czterech obszarów na płaszczyźnie „visibility”. Dyskusja wyników przeniesiona jest do następnej części pracy, gdzie Autor prezentuje rozkłady wydajności (poprawek aparaturowych) oraz uzyskane wyniki pomiarów kąta φ .

Praca zakończona jest krótkim rozdziałem opisującym przyszłość detektora J-PET, który jest ciągle intensywnie rozwijany przez grupę prof. Moskala. Autor stwierdza również, że uzyskane wyniki wskazują na to, że obserwowany układ fotonów anihilacyjnych pochodzących z rozpadów p-Ps jest splątany.

Podsumowując, przedstawiona praca jest napisana w sposób spójny i przejrzysty. Tekst pracy zawiera sporo błędów edycyjnych, ale nie wpływają one na przesłanie merytoryczne rozprawy. Przedstawiona analiza stanowi niezwykle ekscytujący przyczynek do rozwoju samego detektora J-PET, który może wykorzystywać jedną z fundamentalnych cech mechaniki kwantowej do polepszenia rekonstrukcji danych oraz wskazuje na jego znaczący potencjał w badaniach fundamentalnych symetrii natury. Niemniej jednak mam kilka uwag związanych z analizą danych. W przypadku rejonów zainteresowania na płaszczyźnie „visibility” Autor niewystarczająco uzasadnia dobór ich rozmiarów. Jedyne uzasadnienie to „optymalizacja liczby przypadków”, jednakże to stwierdzenie nie jest poparte żadną analizą. Może wybór wartości 20° byłby już wystarczający? Ciekawa byłaby analiza wpływu rozmiaru obszaru zainteresowania na uzyskane rozkłady kąta φ . Równie skromnie opisany jest wybór cięć eliptycznych – Autor cytuje tabelę z parametrami bez szczegółowego wyjaśnienia ich wartości. Dodatkowo przypadki na płaszczyźnie $\Delta_{1,i} - \Delta_{2,i}$ wewnątrz obszarów eliptycznych posiadają specyficzną strukturę (dwa maksima), której Autor nie wyjaśnił. Czy znane jest źródło drugiego maksimum? W przypadku porównania rozkładów kąta φ , można użyć znacznie bardziej zaawansowanych metod porównania rozkładów, w szczególności gdy znana jest postać analityczna obu krzywych (równania 3.20 i 3.21).



Przedstawiona rozprawa jest rzetelnie przeprowadzoną pracą badawczą z zakresu eksperymentalnej fizyki cząstek i oceniam ją pozytywnie. Nie mam żadnych wątpliwości, że przedstawiona praca całkowicie spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę do Rady Dyscypliny Nauk Fizycznych Uniwersytetu Jagiellońskiego o dopuszczenie Pana mgr Nikodema Krawczyka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Tomasz Szumlak

