



Kraków; 15.02.2024

dr hab. Krzysztof Pysz, prof. IFJ PAN
Instytut Fizyki Jądrowej PAN
Kraków

Recenzja pracy doktorskiej pana mgr Nikodema Krawczyka

"Studies of Quantum Entanglement in Pair of High Energetic Photons from e^+e^- Annihilation"

Praca doktorska pana mgr Nikodema Krawczyka dotyczy zagadnień fundamentalnych w badaniach i opisie zjawisk kwantowych, dyskutowanych od zarania powstania mechaniki kwantowej i dotyczących takich, wręcz filozoficznych, problemów jak zupełność (kompletność) mechaniki kwantowej, interpretacja jej przewidywań, interpretacja pomiaru na poziomie kwantowym, nielokalność zjawisk kwantowych. Zjawisko, które badane jest w recenzowanej pracy doktorskiej, dotyczy splątania stanów kwantowych dwóch fotonów emitowanych przy anihilacji para-pozytonium, czyli związanego układu e^+e^- będącego w stanie singletowym. W szczególności Autor bada występowanie korelacji w polaryzacji obu jednocześnie wykreowanych kwantów gamma. Ze względu na duże energie tych fotonów anihilacyjnych, pomiar ich polaryzacji metodami optycznymi jest niemożliwy. Do określenia ich polaryzacji wykorzystuje się więc zależność kąta rozpraszania fotonu na elektronach ośrodka rozpraszającego (efekt Comptona) od kierunku jego polaryzacji. Dla pojedynczego fotonu zależność ta dana jest wzorem Kleina-Nishiny opisującym kątową zależność różniczkowego przekroju czynnego na rozpraszanie fotonu na cząstce naładowanej. Autor udowadnia, że miarą kwantowego splątania polaryzacji pary fotonów wyemitowanych kolinearnie przy anihilacji para-pozytonium jest rozkład kąta pomiędzy płaszczyznami ich rozpraszania komptonowskiego. Pomiar tego kąta jest możliwy dzięki zastosowaniu pozytonowego tomografu emisyjnego (J-PET) zbudowanego w zakładzie kierowanym przez prof. P. Moskała, w którym wykonywana jest omawiana praca doktorska.

Splątanie kwantowe fotonów z anihilacji pozytonium jest przewidywane teoretycznie. Autor skrótowo referuje argumenty teoretyczne prowadzące do wniosku o maksymalnym splątaniu pary fotonów anihilacyjnych. Jednak wyniki dotychczas przeprowadzonych pomiarów nie są jednoznaczne. Autor przytacza historię pomiarów korelacji polaryzacji dwóch fotonów anihilacyjnych od końca lat czterdziestych XX wieku, omawiając krótko ich rezultaty, postęp w przewidywaniach teoretycznych co do spodziewanych wyników pomiarów, trudności eksperymentalne w pomiarze korelacji polaryzacji fotonów oraz trudności w interpretacji wyników doświadczalnych. W szczególności rozróżnienie przyczynków od rozpadów ze stanu splątanego od tych, w których polaryzacja co najmniej jednego fotonu uległa dekoherencji nastręczało trudności interpretacyjne.

Na tym tle widać zalety w zastosowaniu do pomiaru zjawiska splątania polaryzacyjnego tomografu J-PET, który charakteryzuje się symetrią osiową, dużą akceptancją kątową dla pierwotnych kwantów anihilacyjnych oraz dokładnością pomiaru pozycji rozpraszania komptonowskiego tych kwantów. Autor podaje techniczne aspekty budowy J-PET oraz źródła pozytonium składającego się z intensywnego źródła pozytonowego ^{22}Na zamkniętego w porowatym materiale zwiększającym prawdopodobieństwo wychwytu pozytonu na elektronie, i umieszczonego w małej komorze anihilacyjnej zrobionej z lekkiego plastiku.



Opisuje też krótko metody odczytu i procesowania sygnałów w celu pomiaru pozycji detekcji kwantów gamma oraz zdeponowanych przez nie energii w elementach scyntylacyjnych.

Z wzoru Kleina-Nishiny Autor wylicza rozkłady wartości przekroju czynnego na rozpraszanie Comptona dla kwantów gamma o energii 511 keV i zauważa, że dla takich fotonów największa czułość na pomiar zmienności kąta azymutalnego rozpraszania występuje przy ustalonej wartości kąta polarnego równej ok. 82° . Uogólnienie na rozpraszanie dwóch fotonów dokonuje się za pomocą tzw. operatorów Krausa i formalizmowi wprowadzonemu w (cytowanych) pracach B. Hiesmayr & P. Moskal. Formalizm ten pozwala na uzyskanie wzorów na różniczkowe przekroje czynne na emisje ze stanu całkowicie splątanego oraz całkowicie separowalnego. Zależności te wykorzystywane są w symulacjach Monte Carlo oraz do określenia najbardziej korzystnych konfiguracji zakresów kątowych komptonowsko rozproszonych, anihilacyjnych kwantów gamma.

Autor przeprowadził realistyczne symulacje przy użyciu pakietów Geant4 i GATE z uwzględnieniem geometrii i materiałów detektora J-PET, konstrukcji i położenia źródła pozytonium oraz rzeczywistych rozdzielczości pozycyjnych, czasowych i energetycznych tomografu J-PET. Generowane zdarzenia obejmowały wszystkie znaczące procesy fizyczne związane z używanym źródłem, a więc dwufotonowy rozpad para-pozytonium, trójfotonowy rozpad orto-pozytonium, anihilacje e^+e^- ze stanu niezwiązanego oraz emisję cząstki gamma ze źródła ^{22}Na . Polaryzacje par kwantów gamma generowanych przy rozpadzie para-pozytonium były wzajemnie ortogonalne. Wygenerowane dane zostały poddane selekcji i analizie z użyciem dedykowanego oprogramowania zwanego J-PET Framework wytworzonego i używanego przez grupę J-PET do symulacji i analizy danych dla tego tomografu. Poszczególne kroki selekcji danych są logiczne a narzucone kryteria są rozsądne i dobrze uzasadnione.

Eksperyment przeprowadzono z użyciem źródła ^{22}Na o aktywności 1 MBq. Dane zebrano w ciągłym pomiarze trwającym ok. 2.5 miesiąca. Należy zwrócić uwagę na trudność eksperymentu polegająca na niskiej wydajności detekcji interesujących zdarzeń. Mimo, że detektor J-PET ma stosunkowo dużą wydajność na detekcję par pierwotnych fotonów anihilacyjnych, to rejestracja dwóch kwantów wtórnych, obu rozproszonych komptonowsko pod dużym kątem, jest sporadyczna. Sama tylko wydajność detekcji takiej koincydencji jest na poziomie $10e-5$. Konieczne kryteria selekcji danych jeszcze tę wydajność rejestracji interesujących zdarzeń obniżają.

Po korekcji danych doświadczalnych uwzględniającej wydajności detekcji zależnej od mierzonego kąta rozproszenia, zastosowano metody selekcji, takie same, jak te użyte wcześniej do danych wygenerowanych w symulacjach. Uzyskano doświadczalne rozkłady kątów pomiędzy płaszczyznami rozproszenia obu fotonów anihilacyjnych. Oprócz obszaru o największej spodziewanej widoczności efektu splątania kwantowego, w okolicach polarnych kątów rozproszenia fotonów równych 82° , wyselekcjonowano też rozkłady dla par fotonów rozproszonych w okolicach kątów 92° , 100° oraz dla pełnego zakresu kątów rozproszenia. Rozkłady doświadczalne kąta między płaszczyznami rozproszenia przedstawiono w zakresie 0° - 180° z krokiem co 5° , co daje 36 punktów porównawczych. W granicach błędów pomiarowych rozkłady te są gładkie.



**The Henryk Niewodniczański
INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS
POLISH ACADEMY OF SCIENCES**

Porównano kształty odpowiednich rozkładów kątów pomiędzy płaszczyznami rozpraszania uzyskane doświadczalnie z teoretycznymi, wygenerowanymi przy założeniach, że stan fotonów z rozpadu para-pozytonium jest splątany albo, że jest separowalny. Wykonano testy zgodności χ^2 . Zredukowane wielkości χ^2 dla hipotezy stanu splątanego przyjmują wartości ok. 1.0 dla wszystkich czterech wyselekcjonowanych obszarów kątowych. Te wartości χ^2 są ok. dwa razy mniejsze niż w przypadku porównania rozkładów doświadczalnych z analogicznymi krzywymi, ale wygenerowanymi przy założeniu hipotezy o odseparowaniu kwantowym fotonów anihilacyjnych. Jest to główny wynik badań pana mgr Krawczyka, dostarczający mocnego argumentu za hipotezą, że wysoko energetyczne fotony pochodzące z anihilacji para-pozytonium są emitowane jako stan kwantowo splątany. Autor nie dokonuje żadnych dalszych interpretacji fizycznych uzyskanego wyniku.

Nie mniej ważnym wynikiem tej pracy jest wykazanie, że tomograf J-PET jest detektorem, który może efektywnie mierzyć wzajemną polaryzację par fotonów. Ta własność może być wykorzystana w innych badaniach podstawowych prowadzonych z użyciem tego detektora, a także do redukcji tła w samym obrazowaniu medycznym z użyciem tego urządzenia. Przeprowadzone badania oraz cechy samego tomografu będą mogły osiągnąć większą precyzję w kolejnej wersji tego detektora, która już została zbudowana przez grupę J-PET.

Mimo, że dysertacja napisana jest skrótowo, zawiera ona wystarczającą ilość informacji i materiału aby czytelnik mógł zrozumieć motywację, aktualny stan badań doświadczalnych, metodę użytą w opisywanym studium, oraz jego wyniki. Autor dostarczył również obszerną listę literatury odnoszącej się do zagadnień powiązanych z opisywanymi badaniami, w tym do wielu wartościowych prac opublikowanych przez całą grupę J-PET lub jej poszczególnych członków. Pan mgr Krawczyk jest współautorem 9 takich artykułów opublikowanych w bardzo prestiżowych czasopismach.

Oczywiście, w pewnych miejscach, doprecyzowanie opisywanych aspektów technicznych ułatwiłoby czytelnikowi lepsze zrozumienie opisywanego zagadnienia. Takim przykładem jest pomiar energii zdeponowanej w scyntylatorach J-PET. Kształty rozkładu wysymulowanego programem Geant4 (rys. 5.4) oraz uzyskanego doświadczalnie, ale za pośrednictwem metody czasu nad progiem (rys. 6.2) różnią się. Czy wynika to ze specyfiki estymacji energii w używanej metodzie pomiaru szerokości sygnałów?

Wartość edukacyjną pracy doktorskiej niewątpliwie podniosłoby przedstawienie przez jej Autora interpretacji fizycznej uzyskanego rezultatu.

Pomimo tych drobnych uwag moja ocena recenzowanej pracy doktorskiej pana mgr Nikodema Krawczyka jest bardzo wysoka. Stanowi ona bardzo wartościowy przyczynek do istotnych badań nad naturą świata kwantowego. Pokazuje też kolejne możliwości badawcze i techniczne nowatorskiego tomografu J-PET. Stwierdzam ponadto, że recenzowana dysertacja spełnia formalne wymagania stawiane pracom doktorskim w dziedzinie nauk fizycznych. Pozwala mi to z całym przekonaniem wnioskować o dopuszczenie pana mgr Nikodema Krawczyka do dalszych etapów przewodu doktorskiego, w tym do publicznej obrony.



Krzysztof Pysz

