

Recenzja pracy doktorskiej mgr. Michała Drągowskiego
pt. *Polarization Effects in Scattering of Relativistic Electrons*

Temat i motywacja rozprawy

Rozprawa doktorska mgr. Michała Drągowskiego dotyczy pomiaru przekazu polaryzacji od elektronu spolaryzowanego do elektronu w stanie początkowo niespolaryzowanym, w rozpraszaniu elastycznym Møllera, jak również korelacji spinowych między dwoma elektronami w stanie końcowym po rozpraszaniu elektronów. Jest to praca eksperymentalna, w której użyto wiązki elektronów o energii 3 MeV, pochodzących z akceleratora *Mainzer Microtron* (MAMI) Uniwersytetu Johanna Gutenberga w Moguncji. Polaryzacja elektronu w stanie końcowym jest określana dzięki rozpraszaniu Motta elektronu na jądrze atomowym, gdy następuje separacja kątowa stanów elektronów o różnych polaryzacjach. Cały pomiar wykonano przy pomocy stosunkowo małego spektrometru, składającego się z dwóch tarcz: elektronowej do rozproszenia Møllera i jądrowej do rozpraszania Motta. Ponadto w układzie pomiarowym znajdują się dwa detektory umieszczone za tarczą Motta i mierzące natężenia elektronów w różnych stanach spinowych.

Zainteresowanie tym pomiarem ma co najmniej dwa źródła. Pierwszym jest potrzeba zweryfikowania przewidywania relatywistycznej mechaniki kwantowej, dotyczącego przekazu polaryzacji w zderzeniach elektronów. Drugim – zmierzenie spinowych korelacji kwantowych dla cząstek obdarzonych masą, aby móc zweryfikować przewidywania mechaniki kwantowej i badać naturę splątania kwantowego.

Zawartość rozprawy i wyniki

Praca zaczyna się wstępem teoretycznym, dotyczącym rozpraszania Møllera, rozpraszania Motta oraz funkcji korelacji spinowych dwóch elektronów. Ta ostatnia została wcześniej obliczona, przedyskutowana i opublikowana przez autorów z Uniwersytetu Warszawskiego i Uniwersytetu Łódzkiego, gdzie w części prac tej serii uczestniczył też mgr Michał Drągowski. Korelacje te wykazują ciekawe zależności od pędów elektronów, co prowadzi np. do niemonotonicznego zachowania odstępstw od nierówności Bella. Są one kompetentnie przedyskutowane w części I dysertacji, gdzie pokazuje się sposób wyliczenia funkcji korelacji spinowej, a następnie dyskutuje jej zależności od stopnia polaryzacji, pędów i pędów względnych elektronów oraz kątów rozpraszania. Część dotycząca rozpraszania Møllera i Motta jest opisana zwięźle, ale wystarczająco jasno do celów całej pracy i zawiera odpowiednie odnośniki literaturowe.

Część eksperymentalna dysertacji zawiera definicje wielkości mierzonych, opis detektorów składających się na spektrometr oraz dokładny opis elektroniki odczytu i całego systemu akwizycji danych. Przedyskutowano także użyte konfiguracje polaryzacji: (i) konfigurację A, gdzie polaryzacja wiązki elektronowej jest w płaszczyźnie rozpraszania Møllera i prostopadła do płaszczyzny rozpraszania Motta, (ii) konfigurację B, w której polaryzacja wiązki elektronowej jest w płaszczyźnie rozpraszania Møllera oraz płaszczyzna rozpraszania Motta jest pod kątem 45° do

płaszczyzny rozpraszania Møllera. Użycie dwóch konfiguracji pozwalało lepiej kontrolować zawartość tła w danych.

Do detekcji elektronów służyły scyntylatory, z których sygnał odczytywano za pomocą wielopikselowych (4 x 4) fotopowielaczy krzemowych SiPM. Są one nowoczesnym i czułym detektorem, mającym wiele przewag nad tradycyjnymi fotopowielaczami. Szczegółowy opis sensorów zawiera charakterystyki amplitudowe i czasowe SiPM-ów, wraz z wynikami testów dla poszczególnych detektorów i całości układu. Logika układu wyzwalania odczytu (czyli *trygera*), oparta na sygnałach z licznika oznaczającego rozpraszania Møllera (czyli tzw. *taggera*), sygnałów z separatora Motta i sygnałów bramkujących, wbudowana jest sprzętowo w układ scalony z programowalną macierzą FPGA.

Duża część pracy poświęcona jest symulacjom Monte Carlo, mającym na celu wymodelowanie numeryczne rozpraszania Motta i oddziaływań w detektorze oraz optymalizacji samego detektora. Przyjęta metoda pomiaru polaryzacji elektronów w rozpraszaniu Motta polega na pomiarze asymetrii spinowej z okresowo odwracaną polaryzacją wiązki. Dzięki temu w asymetrii wyznaczonej doświadczalnie upraszcza się wiele obciążeń systematycznych. Powiązanie asymetrii polaryzacyjnej z polaryzacją elektronu wymaga znajomości tzw. *efektywnej funkcji Shermana*, zależnej od energii i kąta rozpraszania, która opisuje tzw. *analyzing power* rozpraszania Motta. Obliczenie tej funkcji dla realnej tarczy jest dość skomplikowanym zagadnieniem, do rozwiązania którego używa się specjalnego pakietu oprogramowania o nazwie ELSEPA. Doktorant opisał swoją pracę nad poprawieniem tego oprogramowania, które w oryginalnej wersji dawało częściowo niespójne lub niestabilne numeryczne wyniki dla niektórych kątów i energii. Efektywna funkcja Shermana opisuje *analyzing power* dla konkretnych warunków doświadczalnych, tj. uwzględniając skład i geometrię tarczy. Wymaga to użycia efektywnych parametryzacji, dobieranych i sprawdzanych przy pomocy symulacji Monte Carlo oraz danych doświadczalnych, zarówno zebranych przy akceleratorze MAMI, jak i w innych urządzeniach, przy różnych energiach. Opis tych prac w rozdz. 5 rozprawy jest bardzo szczegółowy, pokazujący realnie wykonaną pracę i bardzo dobre zrozumienie problemu fizycznego przez Michała Drągowskiego. Symulacje Monte Carlo, potrzebne do optymalizacji detektora, wykonano przy użyciu wzbogaconego i zmodyfikowanego pakietu GEANT4, który jest w fizyce cząstek standardowym narzędziem stosowanym do tego celu. Przy jego pomocy wykonano optymalizację geometrii detektora, oszacowano tło i niektóre efekty systematyczne oraz zoptymalizowano wiązkę.

Szczegółowe omówienie pomiaru przekazu polaryzacji zawarte jest w rozdz. 7. Jest ono systematyczne i kompletne. Zawiera opis struktury czasowej zbiorów danych, opis digitalizacji danych, sposobu wyznaczania poprawek na cechy trygera (w szczególności uwzględniania tzw. czasu martwego). Dużo uwagi poświęcone jest analizie zdarzeń z przekryciami dwóch lub więcej sygnałów w oknie czasowym w taggerze i polarymetrze (tzw. *pile-ups*). Zdarzenia typu *pile-ups*, których było 16% w liczniku tagującym i poniżej jednego procenta w polarymetrze, były usuwane z próbki. Analiza sygnałów zrobiona jest dla charakterystyk czasowych i amplitudowych, zarówno sygnałów z taggera jak polarymetru. Wyraźnie oddzielone są amplitudy sygnałów pochodzących od elektronów z rozpraszania Møllera i Motta, gdzie z dopasowań kształtów do sygnałów i ekstrapolacji kształtu tła z obszaru mniejszych amplitud można dobrze oszacować wkłady tła, które okazują się być nieduże. Przeanalizowane są poszerzenia temperaturowe maksimów sygnałowych, widzianych w zależności czasowej amplitud. Kalibracja energetyczna, czyli zależność amplitudy sygnału od energii, wykonano na podstawie dwóch energii, 1.5 MeV i 3 MeV, i dopasowano do nich prostą zależność (liniową lub kwadratową). Dodatkowo zbadano też stabilność położenia pików od rozpraszania Møllera w funkcji czasu.

Pomiar polaryzacji wiązki wykonano w dwóch konfiguracjach polaryzacyjnych, A i B, mierząc asymetrie o wartościach na poziomie 4-7%, i odejmując asymetrie tła. Elektrony rozproszone

møllerowsko rejestrowano jako koincydencje z licznika tagującego i z licznika polarymetru. Bardzo szczegółowo omówiono kryteria selekcji przypadków z użyciem amplitud i czasów oraz sposoby odejmowania tła. Wyznaczone zostały asymetrie Møllera, o wielkości na poziomie 2-3%, na ogół z błędami względnymi kilkunastoprocentowymi i tłem na poziomie kilku procent. Pełny rozdział pracy poświęcony jest wyznaczeniu i dyskusji błędów systematycznych do asymetrii wiązki i asymetrii Møllera, na które składają się: błędy pochodzące z *analyzing power*, z cięć, pozycjonowania wiązki, rozpraszania na kolimatorach wiązki, jak również rozmaite źródła tła zależnego od polaryzacji i składające się na tzw. fałszywe asymetrie, które należy odjąć od asymetrii sygnałowych. Sumaryczne błędy systematyczne są podobnego rzędu jak statystyczne, lecz przekraczają nieco wartości błędów statystycznych. Pokazuje to ograniczenie metody i tłumaczy, dlaczego w eksperymencie nie było potrzebne zbieranie większej ilości danych.

Ostatecznie otrzymano wartości polaryzacji wiązki 0.85 ± 0.04 (konfiguracja A) i 0.83 ± 0.05 (konfiguracja B), zaś polaryzacji Møllera, odpowiednio, 0.34 ± 0.04 i 0.26 ± 0.04 . Przekaz polaryzacji, zdefiniowany jako względna długość składowej poprzecznej w stanie końcowym w rozpraszaniu Møllera, odniesiona do polaryzacji wiązki, wyniósł 0.40 ± 0.05 (A) i 0.31 ± 0.05 (B), co mieści się w granicach jednego (A) lub dwóch (B) odchyłeń standardowych od wartości teoretycznej, obliczonej i podanej w pracy autorów M. Włodarczyk, P. Caban, J. Ciborowski, M. Drągowski i J. Rembieliński, opublikowanej w Phys. Rev. A 95, 022103 (2017), gdzie – co warto zaznaczyć - doktorant jest także współautorem.

Powyższe wyniki pozwoliły otrzymać ograniczenia dolne na funkcję korelacji spinów między dwoma elektronami po rozproszeniu Møllera. Ograniczenia te są dobrze zgodne z wynikami rachunku teoretycznego w teorii relatywistycznej oraz wykluczają przybliżenie nierelatywistyczne, to ostatnie z wysokim poziomem istotności.

Dyskusja i uwagi

Wyniki otrzymane w tej pracy mają istotną wartość naukową. Po pierwsze, stanowią eksperymentalną weryfikację nierówności wiążących korelacje spinowe dwóch elektronów w przypadku relatywistycznym. Wynikiem tej pracy jest wprowadzenie tylko jednego punktu doświadczalnego, tj. dla jednej energii 3 MeV, obciążony stosunkowo dużym błędem. Doktorant pokazał w swojej pracy, że wielkość tego błędu jest zdominowana przez błąd systematyczny. Jest to w tej chwili ograniczenie samej metody, które – co wynika z dyskusji źródeł błędów systematycznych – wynika przede wszystkim z dużego błędu na *analyzing power* w rozpraszaniu Møllera. Ten ostatni prawdopodobnie może być poprawiony dzięki lepszej znajomości funkcji Shermana, która musi pochodzić z eksperymentu, oraz zmniejszeniu błędu na grubości tarczy. W ten sposób w rozprawie zostały wskazane kierunki, w których można szukać poprawy dokładności w dalszych badaniach. Zależność funkcji korelacji od energii elektronu, która zamieszczona jest na rys. 9.2 w rozprawie, pokazuje, że nierówności ograniczające funkcję korelacyjną dają najwęższy przedział dopuszczalnych wartości funkcji korelacji właśnie przy energii kilku MeV, tj. tam, gdzie został wykonany pomiar. Dla niższych energii przedział bardzo gwałtownie poszerza się z góry i z dołu, a dla wyższych dolne ograniczenie pozostaje mniej więcej stałe, lecz szybko podnosi się górne ograniczenie. Z tego więc punktu widzenia energia wiązki w opisanym eksperymencie jest dobrze dobrana.

Bardzo wartościowym wkładem pracy mgr. Michała Drągowskiego w całą problematykę od strony doświadczalnej jest zaimplementowanie w GEANT4 kodu Monte Carlo służącego do symulacji zależnego od spinu rozpraszania Motta. Wyniki tych symulacji zostały zweryfikowane przy pomocy danych doświadczalnych. Ponadto uczyniono postęp w kierunku poprawienia znajomości funkcji Shermana i jej zależności od grubości tarczy i od kąta rozpraszania elektronu.

Wyniki w przedstawionej pracy są ważnym krokiem ku weryfikacji nierówności kwantowo-mechanicznych, badających naturę splątania kwantowego. W szczególności, wersja znanych nierówności Bella w postaci Clausera-Horna-Shimony-Holta (CHSH), nadaje się bardzo dobrze do badań doświadczalnych nad podstawami mechaniki i informatyki kwantowej dla cząstek masywnych. Mgr Drągowski przewiduje kontynuację badań nad korelacjami relatywistycznych elektronów, które dadzą możliwość zweryfikowania nierówności CHSH. Do realizacji tego potrzebny będzie nowy eksperyment, w którym możliwy będzie jednoczesny pomiar polaryzacji stanu początkowego i końcowego, przypadek po przypadku. Z punktu widzenia doświadczalnego, potrzebna będzie także większa polaryzacja wiązki. Obliczenie pełnej korelacji spinowej zostało przez doktoranta przedstawione w Uzupełnieniu A. Co więcej, znajduje się tam obszerna dyskusja konfiguracji eksperymentu, który pozwoli ją zmierzyć.

Konkluzje

Nie ulega dla mnie wątpliwości, że dysertacja mgr. Michała Drągowskiego jest dobrą podstawą do nadania mu stopnia naukowego doktora i wnoszę o dopuszczenie doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Praca przedstawia wartościowy wynik naukowy, będący obecnie w polu zainteresowania wielu aktywnych badaczy i grup naukowych, zarówno doświadczalnych jak teoretycznych. Odzwierciedla to tematyka bieżących konferencji naukowych oraz bibliografia cytowana przez doktoranta. Doktorant jest świadom, że prace te powinny być kontynuowane. W pracy tej nie doszukałem się istotnych usterek. Jej dużą wartością jest staranność dyskusji części eksperymentalnej. Doktorant dobrze rozumie całość zagadnienia fizycznego, zaczynając od podstaw teoretycznych, a kończąc na szczegółach aparatury i analizy danych. Z powyższych powodów uważam, że praca zasługuje na wyróżnienie i dlatego proponuję jego przyznanie.

