



Prof. dr hab. Piotr Salabura
Instytut Fizyki im. M. Smoluchowskiego
ul. Prof. Łojasiewicza 11
Uniwersytet Jagielloński
30-348 Kraków

27.02. 2023
Kraków

Recenzja pracy doktorskiej mgr. „Michała Drągowskiego „Polarization Effects
in Scattering of Relativistic Electrons”

Praca doktorska mgr. Michała Drągowskiego „Polarization Effects in Scattering of Relativistic Electrons” przedstawia koncepcje, realizacje oraz wyniki eksperymentu rozpraszania spolaryzowanych elektronów na elektronach przy energii kinetycznej wiązki 3 MeV, przeprowadzonego na akceleratorze MAMI w Moguncji. Głównym osiągnięciem pracy jest otrzymanie pierwszych wyników eksperymentalnych wykazujących istotność efektów kwantowo-relatywistycznych dla opisu transferu polaryzacji w rozpraszaniu elektronów. Przewidywania teoretyczne dla transferu polaryzacji elektronów porównano z wynikami pomiaru podwójnego rozproszenia Moellera (e-e) i Motta (e-jądro), dla dwóch względnych orientacji płaszczyzn rozproszeń Moellera i Motta, uzyskując bardzo dobrą zgodność (publikacja w Phys. Rev. D [31]). Uzyskane wartości uśrednionych polaryzacji rozproszonych elektronów pozwoliły również na oszacowanie granic na funkcje korelacji spinów elektronów, które są interesujące z punktu widzenia badań splątania kwantowego. Kluczem do osiągnięcia tych interesujących wyników był pomiar bardzo rzadkiego procesu (rzędu 10^{-11} na padający elektron) rozpraszania e-e z jednoczesnym wyznaczeniem polaryzacji elektronów poprzez pomiar asymetrii w rozpraszaniu Motta. Zaprojektowano dedykowany układ pomiarowy i przeprowadzono jego pełną symulację Monte Carlo opartą na pakiecie GEANT4. Dużą wagę przywiązano do optymalizacji grubości tarczy dla rozpraszania Moellera oraz Motta i minimalizacji niepożądanych efektów systematycznych. Autor pracy opracował dedykowany

generator zdarzeń uwzględniający zależności przekrojów czynnych od polaryzacji i zintegrował go z pakietem GEANT4. Przeprowadzone w ten sposób symulacje eksperymentu uwzględniły oddziaływania elektronów z materiałem tarczy i jego wpływu na pomiar polaryzacji. Poprawność modelowania polaryzacji elektronów w rozproszeniu Motta została sprawdzona przez porównanie z wynikami wcześniejszych pomiarów. Opis obliczeń oraz wyniki symulacji zostały przedstawione w dwóch pracach opublikowanych w Nucl. Instr. and Methods, Section B (prace [33,34]). We wszystkich wymienionych publikacjach mgr. Drągowski jest pierwszym autorem, co świadczy o jego wiodącym wkładzie, a przedstawione wyniki są podstawą pracy doktorskiej. Praca ma charakter kompletny i obejmuje wszystkie etapy eksperymentu: począwszy od projektu układu pomiarowego, jego optymalizacji, testów komponentów i kończąc na przeprowadzeniu pomiaru na akceleratorze MAMI i wykonaniu analizy danych. Całość wieńczy publikacja wartościowych wyników w renomowanych czasopismach. Uważam że te osiągnięcia uzasadniają wyróżnienie pracy.

Praca jest napisana po angielsku, bardzo starannie, i w zasadzie nie znalazłem żadnych błędów edytorskich. Sformułowania są czytelne a zaprezentowane rysunki odpowiednio dobrane do ilustracji kluczowych elementów opisu. Poniżej zamieszczam opis poszczególnych rozdziałów pracy z uwagami.

Rozdział pierwszy zawiera wprowadzenie do podstaw teoretycznych rozpraszania elektron-elektron (Moellera) oraz elektro-jądro (Motta) i formułuje cele pracy. Rozdział drugi rozwija opis teoretyczny przedstawiając zależności przekrojów czynnych na rozproszenie elektronów od zmiennych Mandelstama, definicję polaryzacji elektronu poprzez macierze gęstości spinów, funkcje korelacyjne spinów. Z punktu widzenia eksperymentu najważniejsze są rozważania wielkości transferu polaryzacji od kąta rozproszenia elektronów (rys.2.3), uzasadniające wybraną geometrię pomiaru, oraz funkcji korelacji spinów (rys 2.7) i jej ograniczeń (rys. 2.10). Następnie przedstawione są zależności przekrojów czynnych dla rozpraszania Motta, które są podstawą wyznaczania polaryzacji elektronów w polarymetrze. Przedstawiona jest metoda obliczeń zdolności analizującej rozpraszania poprzez funkcje Shermana w oparciu o pakiet ELSEPA. Amplitudy rozpraszania są obliczane metodą fal parcjalnych.

Rozdział trzeci przedstawia metodę eksperymentalną wyznaczania polaryzacji rozproszonych elektronów opartą na pomiarze asymetrii azymutalnych w rozpraszaniu Motta. Omówiona jest konfiguracja systemu pomiarowego składającego się z dwóch tarcz, berylowej do rozpraszania elektronów, i złota do rozpraszania Motta, umieszczonych w próżniowych komorach rozprośzeń połączonych przez kolimatory. Do rejestracji elektronów z rozproszenia Moellera użyto detektora tagującego a asymetrię w rozproszeniu Motta zmierzono w dwóch detektorach polarymetru. Użyte zostały dwie konfiguracje polarymetru do pomiarów, z polaryzacją wiązki w płaszczyźnie rozproszenia (A) i do niej prostopadłej (B) (rys. 3.4). W przypadku B

płaszczyzna Motta jest zorientowana pod kątem 45 stopni względem płaszczyzny rozproszenia a w przypadku A pod kątem 90 stopni. Omówiony jest system monitorowania pozycji wiązki na tracy, dyskutowany dalej w kontekście systematyki określenia katów rozproszenia i odejmowania tła. Nie do końca jest dla mnie jasne czy, i ewentualnie jak, był monitorowany kat padania i dywergencja wiązki na tarczy berylowej. Sama kontrola pozycji wiązki na tarczy nie jest wystarczająca do określenia osi wiązki względem której liczone są kąty rozproszenia.

Rozdział czwarty zawiera opis systemu akwizycji danych, systemu wyzwalania (tryger) i budowy detektorów ze szczególnym naciskiem na testy fotopowielaczy opartych na macierzach sensorów krzemowych (SiPM16 padowy), i jednorodność ich odpowiedzi. Przedstawiony system odczytu został oparty na karcie rozwojowej DRS4 z szybko próbkującym czterokanałowym ADC (4 GHz), układem logicznym FPGA, złączem do transmisji danych USB 2.0. Układ ma dość duży czas martwy ale do pomiaru intensywności rzędu 200 Hz wydaje się dobrze nadawać. Czego brakowało w zestawie, a myślę że byłoby użyteczne w celu lepszej kontroli czasów martwych, to zestawu niezależnie zliczających liczników. W opisie systemu brakło mi także informacji jak realizowany został warunek logiczny rejestracji sygnałów w detektorach. Czy elektronika czołowa miała dyskryminator z ustawianym progiem określający stan przyjścia sygnału czy było to w jakiś sposób realizowane w układzie DRS4?. Warto dodać iż system akwizycji i kontroli (napięcie SiPM), sterowanie tarczami, elektro-zaworami stworzony został przez autora pracy.

Rozdział piąty przedstawia autorskie rozwinięcie klasy w GEANT4 inicjalizującej symulację rozpraszania elektron-jadro i uwzględniające efekty polaryzacyjne w oparciu o amplitudy rozpraszania obliczane przez model ELSEPA. Walidacja symulacji została dokonana przez porównanie wyników obliczeń z danymi eksperymentalnymi dla różnych grubości tarczy w obszarze od 1-3.5 MeV (rys.5.14-5.15) (obszar energetyczny eksperymentu), bardzo małych energii 100 keV (rys 5.7), i dużej energii 14 MeV . Uzyskano dobrą zgodności w tym szerokim zakresie energetycznym, z wyjątkiem 1 MeV dla grubych tarcz. Dokonano także porównania z analitycznymi parametryzacjami efektywnej funkcji Shermana. Rozdział zawiera szczegółową dyskusję wpływów skończonej apertury detektorów, straty energii wiązki oraz optymalizacji systemu pomiarowego w kontekście pomiaru transferu polaryzacji (paragraf 5.3). Główna trudność pomiaru to znacznie mniejsza intensywność rozproszeń Motta elektronów pochodzących z rozpraszania Moellera w stosunku do tła. W celu minimalizacji tła zostały wykonane osłony detektorów oraz zastosowano warunki ich redukcji w analizie. Trochę zastrzeżeń może budzić przedstawiona optymalizacja istotności statystycznej pomiaru polaryzacji ze względu na grubość tracy oraz kąta rozproszenia (wartość F wz.5.15 i rysunek 5.18/5.19) która została wykonana bez ilościowego uwzględnienia tła. Nasuwa się więc

pytanie na ile jest ona realistyczna i czy nie można było jej przeprowadzić z estymacją tła, przedstawiona w następnym rozdziale.

Rozdział szósty opisuje symulacje Monte Carlo konfiguracji eksperymentu, przeprowadzoną w GEANT4, obejmującą generację sygnału oraz tła w detektorach. Przeprowadzono optymalizację konfiguracji pomiarowej przez zmniejszenia wkładu tła ze względu na rozpraszanie w tarczy berylowej oraz w kolimatorach. Istotnym badanym aspektem były obliczenia zmiany polaryzacji elektronów wiązki i elektronów rozproszenia przy przejściu przez tarczę berylową. Efekt został oszacowany dla zastosowanej tarczy na $<0.5\%$. Zbadano także wpływ pozycji wiązki na trączy na koincydencje przypadkowe i ich wpływ na pomiar asymetrii (istotny wkład do błędów systematycznych).

Rozdział 7 (sekcje 7.1-7.5) przedstawia szczegóły przeprowadzonego pomiaru z dwoma przeciwnymi polaryzacjami wiązki, opis selekcji danych, warunki zastosowane w analizie do wyboru podwójnego rozpraszania Moellera i Motta oraz poprawki na czas martwy systemu. Do tej części pracy mam parę pytań: dlaczego rozkład czasu pomiędzy zdarzeniami ma postać eksponentialna? Jaki był rozkład liczby zaliczeń trygera nieobciążonego czasem martwym, jaka była struktura czasowa wiązki elektronów. Skąd się bierze pusta przestrzeń pomiędzy dwoma grupami na rys 7.2a,b. Odrzucanie zdarzeń z nakładającymi się sygnałami zostało wykonane poprzez warunek na minimalną wartość średniej amplitudy sygnału w pierwszych 20 ns oraz liczbę znalezionych pików w oknie około 60 ns (brak opisu tego algorytmu-czy może być częścią oprogramowanie DRS4?). Moją wątpliwość budzi możliwość nakładania się sygnałów o dużej amplitudzie na ujemnym przerzucie sygnału (rys. 7.4) które będą miały uśrednione napięcie dodatnie i nie zostaną odrzucone przez zastosowany w analizie warunek. Myślę że pomocne i pouczające byłoby pokazanie rysunku z rozkładem amplitudy (typu 7.13) dla zdarzeń zaklasyfikowanych jako pile-up dla detektora tagującego, gdzie pile-up jest znaczący.

Ostatecznie sygnatury podwójnego rozpraszania Moellera i Motta (po odjęciu tła z pomiaru na pustej tarczy) są bardzo klarowne i widoczne w: (a) widmach depozycji energii w detektorach scyntylacyjnych (rys. 7.13 –detektor tagujący) , (rys. 7.17-detektory Motta), oraz w widmach różnic czasu tych detektorów, szczególnie po warunku energetycznym na peak Moellera w detektorze tagującym (rys. 7.23). Szerokość pików w widmie czasowym jest rzędu 0.5 ns co uważam jest zgodne z oczekiwaniami. Dodatkową supresję tła w widmach energetycznych detektorów polarymetru uzyskano po nałożeniu warunku energetycznego na pik rozproszenia Moellera w detektorze tagującym oraz na różnice czasów obu detektorów (rys. 7.32) (przy czym ten drugi warunek ma decydujące znaczenie). Tło stanowi jedynie małą kontrybucję do sygnału ($<5\%$). Tabele 7.7 i 7.8 przedstawiają wyniki końcowe asymetrii dla rozpraszania Moellera z błędami statystycznymi dla pięciu analiz, których definicji nie mogłem się doszukać w tekście.

Sekcja 7.5 przedstawia finalne wyniki dotyczące polaryzacji wiązki poprzez obliczenia asymetrii rozproszeń dla konfiguracji A i B, otrzymane z pomiarów z zastosowaniem trygera wiązki. W wyznaczeniu asymetrii uwzględniono tło otrzymane na podstawie dopasowania widm energetycznych osobno dla detektorów (R i L) polarymetru oraz poprawki na czas martwy (tabele 7.4/7.5 oraz rysunki 7.27,7.30).

Rozdział 8 przedstawia szczegółową analizę błędów systematycznych wartości polaryzacji wiązki i rozproszonych elektronów oraz głównych ich źródeł. Oszacowane zostały niepewności wynikające z : (a) obliczeń zdolności analizującej wynikające z grubości tarczy i modelowania funkcji Shermana w MC (przedstawione w rozdziale 5) (b) zależności od cięć energetycznych w analizie (rys. 8.4, rys. 8.5) (c) oddziaływania elektronów z materiałem detektora, wpływające na średnią energię elektronów w detektorach (d) skończonej apertury kolimatorów (e) straty energii oraz wielokrotnego rozpraszania w tarczach złota (10 mu) i berylu (100 mu) (zaniedbywalne) oraz (f) depolaryzacji wiązki elektronów w tarczy berylowej pochodzące z rozproszenia z jądrem (zaniedbywalny 0.1%). Oszacowano wpływ zmian natężenia wiązki w czasie pomiaru, mierzonej przez natężenie prądu wiązki (rys. 8.8) na ilość odejmowanego tła i w konsekwencji jego wpływ na obliczone asymetrie. Miały one znikomy wpływ na wyznaczone asymetrie. Przedyskutowano także zależności od pozycji wiązki na tarczy berylowej (+- 1mm i szerokość około 1.5 mm). Ostateczne wyniki są podane w tabeli 8.1. Z analizy tych niepewności wynika iż dla rozpraszania Moellera przyczynki do błędów wynikające ze statystyki oraz systematyki są porównywalne dla obu konfiguracji pomiaru (A i B). W przypadku polaryzacji wiązki dominuje błąd systematyczny. Całkowity wkład błędu to około 5% wyznaczonej wartości polaryzacji wiązki (tabela 9.1) oraz 11-14% dla polaryzacji elektronów rozproszonych dla konfiguracjach A i B , odpowiednio (tabela 9.2). Największy wkład do błędu systematycznego obu wielkości pochodzi od określenia zdolności analizującej (efektywnej wartości funkcji Shermana) przedstawiony w 8.2. Notabene, nie było dla mnie jasne dlaczego jego wartość przedstawiona na stronie 128 różni się do wartości w tabeli 8.1. Rozdział 9 przedstawia ostateczny wynik pomiaru polaryzacji elektronów rozproszonych (tabela 9.2) i transferu polaryzacji (tabela 9.3) oraz polaryzacji wiązki, który jest zgodny z niezależnym pomiarem przy pomocy polarymetru MAMI. Wyznaczona wartość transferu polaryzacja została porównana z obliczeniami teoretycznymi (rys. 9.1) i wykazuje bardzo dobrą zgodność dla konfiguracji A. W przypadku B obserwuje się odchylenie na poziomie 1.5σ . Oszacowania funkcji korelacji są przedstawione na rys.9.2 i są ułożone w pobliżu dolnych granic. Kwestią przyszłości pozostaje wykonanie bezpośredniego pomiaru tej wartości poprzez wyznaczenie polaryzacji obu elektronów.

Podsumowując, stwierdzam iż przedstawiona do recenzji praca mgr. Michała Drągowskiego zawiera bardzo wartościowe wyniki, uzyskane po raz pierwszy na świecie i wnoszące istotny wkład do dyscypliny. Praca spełnia warunki ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym doktora w sposób ponad przeciętny i dlatego też proponuję o jej wyróżnienie.

Wnoszę do Rady Dyscypliny Nauk Fizycznych o dopuszczenie mgr. inż. Michała Drągowskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Prof. dr hab.

Piotr Salabura

A handwritten signature in blue ink, reading "Piotr Salabura". The script is cursive and fluid, with the first name "Piotr" and last name "Salabura" clearly distinguishable.