



Chorzów, 22 sierpnia 2023

dr hab. Elżbieta Stephan prof.UŚ  
Instytut Fizyki  
Uniwersytet Śląski  
ul. 75 Pułku Piechoty 1  
41-300 Chorzów  
tel. (32) 349 7646  
elzbieta.stephan@us.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Swathi Karanth  
*Novel method to search for axion-like particles in storage rings.*

Dysertacja dotyczy poszukiwania cząstek aksjonopodobnych (ang. axion-like particles, ALPs) przy użyciu pierścienia akumulacyjnego. Te hipotetyczne cząstki są potencjalnymi kandydatami na cząstki tzw. Ciemnej Materii i mogą, przy spełnieniu pewnych warunków, tłumaczyć problem małego łamania CP w oddziaływaniach silnych. Temat pracy wiąże się więc z bardzo istotnymi problemami dotyczącymi naszego zrozumienia budowy materii i oddziaływań fundamentalnych. Opisane badania wpisują się w aktualny trend intensywnych poszukiwań aksjonów oraz ALP, demonstrując możliwości nowatorskiej metody takich badań z wykorzystaniem pierścieni akumulacyjnych.

Zaproponowana metoda rejestrowania cząstek aksjonopodobnych opiera się na pomiarze zmiany spinu hadronów, w opisywanym przypadku deuteronów, krążących z prędkościami relatywistycznymi w pierścieniu akumulacyjnym. Jest to jednocześnie bardzo interesująca propozycja wykorzystania badań oryginalnie motywowanych pomiarem elektrycznego momentu dipolowego (ang. electric dipole moment, EDM), realizowanych przez zespół badawczy JEDI (Jülich Electric Dipole Moment Investigation). Ten ambitny projekt wymagał wypracowania metod kontroli pól elektrycznych i magnetycznych pierścienia akumulacyjnego na bardzo wysokim poziomie. Wykorzystanie pierścienia COSY było niezwykle istotnym etapem rozwoju metody badawczej, niezbędnym do zaprojektowania układu o właściwych parametrach, ale nie mogło jeszcze dostarczyć precyzyjnego ograniczenia dla (stacjonarnego) EDM. Zastosowana aparatura, w tym polarymetr i filtr Wiena, okazały się bardzo właściwe do badań przedstawionych w pracy S. Karanth, dostarczając zarówno wyniku fizycznego, jak i szeregu informacji istotnych dla optymalizacji przyszłych poszukiwań ALP tą metodą.

Praca doktorska jest napisana w języku angielskim, ma logiczny układ i składa się ze streszczenia, dziesięciu rozdziałów, dodatku i obszernej bibliografii (129 pozycji). Rozdział 1 stanowi wprowadzenie do tematu pracy. Rozdział 2 przedstawia motywację podjętych badań, teoretyczne podstawy oddziaływań aksjonów ze „zwykłą” materią oraz, co bardzo istotne, prezentuje krótki przegląd różnego rodzaju eksperymentów poszukujących aksjonów i cząstek aksjonopodobnych. Stanowi on bardzo dobre wprowadzenie w tematykę pracy i bazę do zrozumienia proponowanej metody, szerzej opisanej w rozdziale 4. W rozdziale 3





znalazł się krótki i przejrzysty opis polaryzacji cząstek i metody jej pomiaru w rozpraszaniu na jądrach atomowych. Opisane zostały także związki precesji spinu cząstek krążących po orbicie z polami magnetycznymi i elektrycznymi pierścienia akumulacyjnego. Są to zarówno oddziaływania o znanej i znacznej wielkości, jak w przypadku magnetycznego momentu dipolowego oddziałującego z polem magnetycznym, jak i potencjalnie istniejące, ale bardzo niewielkie efekty związane z elektrycznym momentem dipolowym, czy też tzw. wiatrem aksjonowym. Rozdział 4 opisuje w sposób poglądowy spodziewane efekty tych oddziaływań i warunki eksperymentalne, które wpływają na potencjalną rejestrację sygnału od oddziaływań ALPs, w tym kwestię fazy między rotacją polaryzacji a oscylacją EDM. Rozdziały 5 i 6 zostały poświęcone eksperymentowi, który stanowi podstawę pracy, a rozdział 7 – dedykowanym symulacjom. Analiza zebranych danych, w tym metody statystyczne użyte w celu uzyskania ograniczenia na oscylacyjny EDM, zostały opisane w rozdz. 8. W rozdziale 9 autorka tłumaczy ten wynik na wartości ograniczenia sprzężenia ALP z materią i prezentuje je w połączeniu z wynikami innych eksperymentów. W tym miejscu bardzo uzasadnione okazuje się wcześniejsze wprowadzenie przeglądu takich badań eksperymentalnych. Rozdział 10 zawiera podsumowanie wyników, podkreślenie unikalności metody i potencjału jej zastosowania w innych, istniejących i projektowanych, pierścieniach akumulacyjnych. Dod. A zawiera spis pomiarów wykonanych w poszczególnych warunkach.

Doktorantka wykonała szereg zadań, które były kluczowe dla uzyskania wyniku fizycznego i pokazania skuteczności metody pomiarowej. Pierwsze zagadnienie dotyczyło optymalizacji wiązki, m.in. zbadania wpływu chłodzenia elektronowego na czas depolaryzacji. Kolejne to udział w pomiarze, dedykowane symulacje oraz analiza danych. Symulacje dotyczyły wpływu poszczególnych elementów prowadzenia wiązki w COSY, elementów manipulacji spinem, jak Solenoid RF i filtr Wiena, oraz efektów od ALP na zmianę polaryzacji wiązki w jej układzie odniesienia. Zostały przeprowadzone w oparciu o „no-lattice method” dla czterech paczek wiązki poruszających się w równych odległościach w obszarze pierścienia. Symulacje były niezbędne do weryfikacji założeń metody badawczej, analizy wpływu efektów systematycznych i powiązania zmierzonego skoku polaryzacji (lub jego górnego limitu) z amplitudą oscylującego EDM.

Eksperyment wymagał bardzo starannej optymalizacji wiązki, zarówno pod kątem jej prowadzenia (przy zmiennym pędzie) jak i uzyskania i utrzymania wysokiej polaryzacji w płaszczyźnie ruchu cząstek. Jednym z istotnych elementów samego eksperymentu było zbadanie czułości układu, tj. jego zdolności do rejestracji skoku polaryzacji pionowej. Taki efekt, oczywiście drastycznie większy od spodziewanego w przypadku aksjonów, można było uzyskać z wykorzystaniem filtra Wiena, który zachowuje tory cząstek o danej prędkości, rotując ich polaryzację. Pomimo pewnych różnic, np. zlokalizowanego, niemal punktowego elementu oddziaływania w przypadku filtra Wiena, w odróżnieniu od rozciągniętego obszaru oddziaływania pól cząstek, test z filtrem Wiena był bardzo przydatny do sprawdzenia metody detekcji rezonansu. Doktorantka pokazała, że taki rezonans może być zidentyfikowany zastosowaną metodą analizy. Ponadto wykorzystwała pomiary z filtrem Wiena do weryfikacji wyżej wspomnianych symulacji.

Kolejnym wyzwaniem była analiza danych w kierunku detekcji skoku polaryzacji, zwłaszcza w związku z nieznaną (lecz wzajemnie przesuniętą o 90 stopni) fazą dla poszczególnych paczek wiązki. Przyjęta strategia była nastawiona na wykrycie każdego





potencjalnego efektu, a w kolejnym kroku weryfikacji istotności statystycznej wyniku. Ostatecznie uzyskano wynik zgodny z brakiem sygnału od polaryzacji pionowej. Wynik ten został przeniesiony na ograniczenie wartości oscylacyjnego EDM i efektu wiatru aksjonowego.

Praca została przygotowana starannie od strony edytorskiej. Na szczególne docenienie zasługuje jakość ilustracji, zwłaszcza w rozdziale 4, gdzie rysunki w sposób poglądowy wyjaśniają zasadę pomiaru, oraz w rozdziale 8, gdzie liczne wykresy prezentują rozkłady statystyczne i ich analizę. Niewątpliwie przygotowanie takich ilustracji było czasochłonne, ale stanowią one nieocenioną pomoc w zrozumieniu skomplikowanych zagadnień będących przedmiotem rozprawy. W tekście pojawiły się pewne uchybienia, ale nie rzutują one na zrozumienie treści. Jest jedno oczywiste przejęzyczenie, które ma znaczenie merytoryczne. Na str. 59 pod wzorem (6.3.1) jest informacja dotycząca tłumienia oscylacji: „In an ideal case of infinite SCT, the decay constant would be  $\tau=0$ ”. Zapewne Autorka miała na myśli: „In an ideal case of infinite SCT, the decay constant would be 0, or, its inverse  $\tau$  would be infinite”.

Poniżej przedstawiam kilka uwag i pytań, które nasunęły mi się podczas czytania pracy:

1. W eksperymencie wiązka przebiegała pod grubą tarczą węglową i zastosowano „podgrzanie wiązki” aby doprowadzić do zderzeń dC na krawędzi tarczy. Jaki jest cel takiego rozwiązania? Czy takie podgrzanie nie pogarsza parametrów wiązki?
2. Symulacje przeprowadzono metodą no-lattice. Z tego co wiem, istnieje odwzorowanie pierścienia COSY ze wszystkimi elementami zakrzywienia i ogniskowania wiązki oraz filtrami Wiena zaprogramowane w pakiecie do symulacji wiązki BMAD. Dlaczego nie zastosowano go w tym przypadku?
3. W którym miejscu COSY jest mierzona intensywność wiązki przedstawiona na rysunku 6.2? Dlaczego faza dla poszczególnej paczki jest stała?
4. Opis analizy danych z polarymetru jest dosyć skrótowy. Nie jest dla mnie jasne, jakie obszary kątowe detektora zostały wykorzystane do analizy polaryzacji góra-dół i prawo-lewo. Wybrany zakres kątowy wpływa na uśrednianie asymetrii.
5. Wzór 8.3.4 wydaje się mieć zastosowanie tylko do przypadku prawej kolumny na rys. 8.13. Dla przypadków asymetrycznych R, dla których mamy tylko górny limit, jak w lewej kolumnie dla  $P=1$ , nie można go już zastosować. Jak otrzymano wtedy górny limit?
6. Co było ograniczeniem na tak wąski zakres przebadanych częstotliwości  $f_{AC}$ : czy tylko dostępny czas pomiaru, czy parametry pierścienia COSY?
7. Przez większość rozprawy omawiane są ALP, choć w początkowej dyskusji pojawiły się aksjony. Czy powodem koncentracji na ALP jest znaczna odległość 2-wymiarowej zależności dla QCD axion od zakresu czułości JEDI (rys. 9.3, 9.4)?

Powyższe wątpliwości i pytania nie wpływają na ocenę rozprawy doktorskiej, która jest jednoznacznie pozytywna. Praca podejmuje niezwykle ważne zagadnienie fizyki, jakim jest pochodzenie Ciemnej Materii. Należy podkreślić, że eksperyment mający na celu wykazanie skuteczności samej metody nie tylko z sukcesem spełnił to zadanie, ale również doprowadził do uzyskania w krótkim pomiarze istotnego wyniku fizycznego. Otrzymane ograniczenia na sprzężenia dotyczą wprawdzie bardzo małego zakresu mas ALP, ale za to





w zakresie dużych wartości tej masy, nieosiągalnym dla wielu innych eksperymentów laboratoryjnych. Wyniki przedstawione w pracy zostały już opublikowane, przy czym mgr S. Karanth jest pierwszym autorem dwóch prac: jednej o charakterze bardziej technicznym, „Influence of electron cooling on the polarization lifetime of a horizontally polarized storage ring beam” w Nucl. Instr. Meth. A, a drugiej dotyczącej stricte otrzymanego rezultatu: „First Search for Axionlike Particles in a Storage Ring Using a Polarized Deuteron Beam”. Opublikowanie pracy w Physical Review X świadczy dodatkowo o wyżej wspomnianym nowatorstwie i potencjale metody. Wobec faktu, że publikacja na wielu autorów, wybór doktorantki jako pierwszego autora pokazuje na jej bardzo znaczący wkład w opublikowane badania.

Na podstawie przedłożonej do recenzji rozprawy doktorskiej Pani mgr Swathi Karanth pt. *Novel method to search for axion-like particles in storage rings*. stwierdzam, że spełnia ona warunki stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie doktorantki do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Signed by /  
Podpisano przez:

Elżbieta Stephan  
Uniwersytet  
Śląski

Date / Data:  
2023-08-22 16:36

Elżbieta Stephan

