

## Recenzja pracy doktorskiej mgr Swathi Karanth

Praca doktorska pod tytułem „*Novel method to search for axion-like particles in storage rings*” została wykonana pod opieką prof. dr hab. Andrzeja Magiery oraz dr Aleksandry Wrońskiej na Uniwersytecie Jagiellońskim w 2023 roku.

Praca jest napisana w języku angielskim, ma 125 stron oraz zawiera 10 rozdziałów, dodatek, spis literatury, polskie i angielskie streszczenie. Pod względem formalnym praca prezentuje bardzo wysoką jakość.

Ze strony merytorycznej główny wkład autorki zawarty jest w rozdziałach 7 i 8. Dotyczy on symulacji oraz analizy danych z eksperymentu związanego z poszukiwaniem sygnału od egzotycznych cząstek tzw. aksjonów. Stwierdzenie istnienia tych cząstek pozwoliłoby rozwiązać jedno z ważniejszych zagadek współczesnej fizyki cząstek elementarnych, takich jak praktycznie zerowa wartość parametru odpowiadającego za łamanie symetrii CP w oddziaływaniach silnych, czy też identyfikację cząstek odpowiedzialnych za niedobór masy inercyjnej we wszechświecie.

Poszukiwania aksjonów zostały przeprowadzone przy pomocy nowatorskiej metody wykorzystującej spin deuteronów zgromadzonych w pierścieniu akumulacyjnym COSY w Niemczech. Deuterony są cząstkami o spinie 1, które mogą mieć polaryzację tensorową lub wykorzystaną w tym eksperymencie, polaryzację wektorową.

Analiza eksperymentu została wykonana przez autorkę w oparciu o samodzielnie przygotowany zestaw programów. Wynik analizy stanowią nowe ograniczenia na stałe sprzężenia aksjonu z deuteronami.

Moje ogólne uwagi dotyczące strony merytorycznej odnoszą się do zastosowania przy prezentacji danych niestandardowych wykresów, niestosowanych w innych znanych eksperymentach. Końcowe wyniki są uzyskane w poprawny sposób, ale prezentacja wyników pośrednich jest czasem kontrowersyjna i niepotrzebnie skomplikowana. Brakuje mi też bardziej szczegółowej i ilościowej dyskusji efektów systematycznych. Większość z nich zapewne nie ma żadnego wpływu na ostateczny rezultat. Poza tym głównym celem pracy jest praktyczne wykazanie możliwości realizacji tego nowatorskiego eksperymentu. Pomimo to brakuje chociaż ogólnego komentarza dotyczącego znaczenia systematycznych efektów przykładowo związanych z pomiarem polaryzacji.

Ogólne, w kilku miejscach przydałoby się więcej szczegółowych informacji dotyczących eksperymentu i analizy. Zdaję sobie sprawę, że odpowiedź na część z tych pytań jest zawarta w załączonej literaturze, ale wydaje się, że znacznie ułatwiłoby zrozumienia czytelnikowi, gdyby te najważniejsze informacje były włączone do pracy.

Poniżej załączam listę ważniejszych pytań podzieloną na trzy grupy – dotyczące pomiaru polaryzacji (polarymetru), analizy statystycznej danych oraz wniosków dla przyszłych eksperymentów, w których będą zastosowane podobne metody pomiarów.

Podsumowując, w mojej opinii praca spełnia wszystkie wymagania nakładane na pracę doktorską.

### Główne uwagi i pytania:

#### *Polarymetr:*

1. Referencje są bardzo dobrze opracowane, jednakże dla niektórych brakuje odnośników DOI. Jednym z przykładów brakującego identyfikatora DOI jest praca zawierająca wartości *analysing power* dla oddziaływania deuteron-węgiel (ref. [93]). Nie udało mi się znaleźć tej publikacji w bazie INSPIRE-HEP. Chciałbym się więc dowiedzieć, jakie są to wartości i z jaką dokładnością są znane. Moje pytanie wynika z faktu, że *analysing power* dla oddziaływań proton- węgiel obarczone są bardzo dużą niepewnością.
2. W której warstwie detektora WASA FD zatrzymują się deuterony?
3. Czy występuje efekt przesypywania się zdarzeń między sektorami detektora?
4. Z rysunku 5.5 rozumiem, że tarcza węglowa jest sześcianiem o boku 2 cm i mierzone są cząstki o których zakłada się, że są elastycznie rozproszonymi deuteronami?
5. Rozumiem, że wartość 3 mm podana na str. 43 jest związana jakoś z poprzecznym rozmiarem wiązki?
6. Jak uzyskano obniżenie toru wiązki w obszarze oddziaływania z tarczą węglową? Czy poprzez standardowy zestaw magnesów pierścienia akumulacyjnego COSY?
7. Jak wykalibrowano polarymetr? Czy np. przy pomocy LEP? Jaka była typowa początkowa wartość polaryzacji wiązki?
8. Ile wynosi efektywność rejestracji dla deuteronów z kątami polarnymi w zakresie od 2 do 17 stopni?

#### *Analiza statystyczna wyników:*

1. Nie za bardzo rozumiem, jaki przekaz jest zawarty na rys. 8.4: Wszystkie trzy parametry ze wzoru 8.2.1 można wyznaczyć poprzez dopasowanie do danych np. metoda  $\chi^2$  czy binowana metoda największej wiarygodności. Zaznaczone na rysunku wartości  $A_{LR}$  i  $\Delta A_{LR}$  nie są poprawne, bo zostały uzyskane przy złych założeniach co do  $t_{step}$ . Poprawna wartość  $t_{step}$  jest wyznaczona metodą ilustrowaną na rysunku 8.5, gdzie przeprowadzono skan  $\chi^2$ . Prezentacja przy użyciu zwartości  $\chi^2$  na osi pionowej zamiast

redukowanej  $\chi^2$  byłaby znacznie prostsza, bowiem wtedy błąd dla  $t_{step}$  mógłby być wyznaczony z warunku  $\Delta\chi^2 = 1$ .

2. W pracy nie znalazłem wartości błędów parametrów  $A_{LR}$ ,  $\Delta A_{LR}$  i  $t_{step}$ .
3. Rysunek 8. o ile prawy panel wygląda na rzut na oś y funkcji sinus (wyraźne maksima przy wartościach  $\pm 1$  związane z Jakobianem) to rozkład w panelu lewym wygląda zupełnie inaczej.
4. Czy można prosić o ilustrację i wykresy weryfikujące zastosowaną metodę wyznaczenia „*maximum jump*”? Jaka jest wartość błędu statystycznego tej wielkości po zastosowaniu tej metody redukującej obciążenie estymatora?
5. Czy parametry  $A_{LR}$ ,  $\Delta A_{LR}$  i  $t_{step}$  dla danych zostały wyznaczone za pomocą standardowego programu MINUIT (np. w pakiecie CERN-root klasa TMinuit)? W tym kontekście nie rozumiem prezentacji z rysunku 8.8. Zgaduję, że pokazana jest tam zależność  $\chi^2$  od wartości  $t_{step}$ . Wydawałoby się, że znacznie prostszą prezentacją jest wykres nieredukowanej wartości  $\chi^2$  i pokazanie, że nie ma minimum o głębokości większej niż  $\Delta\chi^2 = 1$ .
6. Nie za jest jasne, jak zostały policzone błędy na rysunku 8.10. W szczególności, dlaczego są one symetryczne. Podejrzewam, że dla większości  $C_i$  gdzie  $C_i < \Delta C_i$  co oznacza, że standardowa metoda propagacji błędów wykorzystująca rozwinięcie w szereg Taylora nie może być stosowana. Zamiast tego trzeba przeprowadzić „*toy Monte Carlo*”.
7. O ile dobrze rozumiem poprawne wyznaczenie błędów i przedziałów ufności przeprowadzono w rozdziale 8.3 przy pomocy analitycznej postaci pdf jako rozkładu Rice zamiast „*toy Monte Carlo*”, stosowanego w znanych mi eksperymentach.
8. Nie rozumiem stwierdzenia na str. 96, że nie znaleziono efektu systematycznego, który by generował fałszywy sygnał, aczkolwiek w rozdziale 8.3 są wyłącznie dyskutowane efekty statystyczne.
9. Czy zastosowano metodę „*blind analysis*” pozwalającą na uniknięcie uprzedzeń co do wyniku? Metoda ta jest powszechnie stosowana, kiedy poszukuje się małych sygnałów np. od nowych cząstek czy też wykonuje precyzyjne pomiary takie jak anomalny moment magnetyczny mionu.
10. Czy uwzględniono w podanych granicach t.zw. „*look-elseswhere effect*”?
11. W eksperymencie, w którym pracuję *likelihood ratio* jest liczone numerycznie, ponieważ to pozwala na łatwe uwzględnienie zdolności rozdzielczej detektora oraz innych efektów systematycznych. Nie za bardzo rozumiem, czy można uwzględnić takie efekty przy użyciu analitycznych wzorów.
12. Czy wiadomo jakiej metody należy użyć aby wyznaczyć globalną wartość ograniczeń na masę i stałą sprzężenia aksjonu używając danych z tego oraz innych eksperymentów.

*Podsumowanie i dyskusja:*

1. Z tego co zrozumiałem ze wstępu (rozdział 2.2) aksjony mogą oddziaływać na cztery sposoby z normalną materią: poprzez sprzężenie z dwoma fotonami, sprzężenie z gluonami, oddziaływanie z dipolowym momentem elektrycznym nukleonu oraz sprzężenie z fotonem i nukleonem. Dotychczasowe eksperymenty poszukujące aksjonów były czułe na to pierwsze sprzężenie. Jestem ciekaw, czy są jakieś oszacowania, które z tych sprzężeń jest największe?
2. Mam pewien niedosyt dotyczący konkluzji pracy i komentarzy dotyczących przyszłych eksperymentów poszukiwania aksjonów w pierścieniach akumulacyjnych np. nie rozumiem czy ilość cząstek w ringu, jego obwód czy też wybór tarczy w polarymetrze mogły by mieć wpływ na czułość eksperymentu. Na przykład na rysunku 4.4 pokazano duży wpływ ciągłego chłodzenia elektronowego na SCT. Wspomniano tam, że pomimo tego w obecnym eksperymencie nie użyto tej metody, ponieważ wprowadza ona efekt systematyczny. Czy w przyszłych eksperymentach można uwzględnić poprawkę na ten efekt i zwiększyć czułość na aksjony?

*Dodatkowo kilka drobnych uwag:*

1. Rysunek 4.4: czy znormalizowana polaryzacja może przekroczyć wartość 1? Jeśli nie, to dlaczego błąd dla wartości 1 jest symetryczny
2. Strona 71 : wydaje się, że w trzeciej linii od dołu brakuje pochodnej po czasie.
3. Rysunek 7.3 dlaczego wyniki symulacji w panelu 7.3a są przedstawione ciągłą linią podczas gdy w panelu 7.3b tylko jako kilka punktów? Czy nie można zamiast dopasowania w panelu 7.3b pop prostu policzyć liniowy człon w szeregu MaLaurina z rys. 7.3a?
4. Po definicji wielkości  $t$  pod równaniem 8.1.1 nie za jest jasne, dlaczego  $t-t_0$  nie jest równe  $t$ ?
5. Rysunek 8.2: Nie rozumiem stwierdzenia „*Sloped phase histories*”
6. Rysunek 8.3: „first few bins” -> „first three bins”

Prof. dr hab. Andrzej Kupść

