Prof. dr hab. Tomasz Matulewicz
Zakład Fizyki Jądrowej
Instytut Fizyki Doświadczalnej
Wydział Fizyki
Uniwersytet Warszawski

Łomianki, 7 września 2022

Recenzja rozprawy doktorskiej
zatytułowanej:
Methods to control systematic uncertainties in search of EDM in the storage ring
autorka: **Anjali Aggarwal**
promotor: prof. dr hab. Andrzej Magiera (Uniwersytet Jagielloński)

Mgr Anjali Aggarwal przedstawiła napisaną po angielsku pracę zawierającą sześć rozdziałów poprzedzonych streszczeniem, uzupełnioną o spis literatury i jeden dodatek. Razem rozprawa liczy 116 stron. Rozprawa jest uzupełniona o streszczenie w języku polskim, toteż spełniony jest formalny wymóg ustawy[1], która w Artykule 13 ust. 6 stwierdza: *Rozprawa doktorska powinna być opatrzona streszczeniem w języku angielskim, a rozprawa doktorska przygotowana w języku obcym również streszczeniem w języku polskim.* Kilka pojedynczych liter brakujących w niektórych słowach („dipolowego", „niepewności") można oczywiście wybaczyć Autorce, dla której język polski jest językiem zapewne słabo znanym.

Rozprawa doktorska dotyczy nietypowego aspektu badań w zakresie fizyki. Niepewności systematyczne to nie jest wdzięczne zagadnienie badawcze, takie jak badanie efektu fizycznego i (ewentualnie) zaobserwowanie nowej i nieoczekiwanej zależności. Niemniej jednak, szczególnie w fizyce subatomowej, prawidłowe wyznaczenie niepewności systematycznej danego pomiaru jest poważnym zagadnieniem fizycznym, wymagającym często znacznie większego zakresu analiz niż otrzymanie wyniku podstawowego. Dopiero jednak prawidłowa ocena niepewności systematycznej nadaje znaczenie samemu wynikowi. Jest to szczególnie ważne, gdy oczekiwany teoretycznie wynik jest zerowy, a ewentualne odstępstwa od takiego mają poważne znaczenie interpretacyjne. Zwłaszcza wtedy określenie niepewności systematycznej związanej z użytą metodą eksperymentalną ma kapitalne znaczenie. Trzeba jeszcze podnieść wagę rozważań zawartych w dysertacji i ich znaczenie dla planowanego eksperymentu. Podczas gdy typowe podejście fizyka-eksperymentatora to raczej droga typu: koncepcja pomiaru → realizacja pomiaru → wynik → wyznaczenie niepewności statystycznych i systematycznych, to droga przedstawiona w rozprawie jest typu koncepcja pomiaru → wyznaczenie niepewności systematycznych (przed realizacja samego pomiaru). Pozwala to na lepsze zrozumienie eksperymentu i poszukiwanie optymalnych rozwiązań doświadczalnych przed, a nie po realizacji pomiarów.

Krótki pierwszy rozdział rozprawy zawiera wstępną motywację przeprowadzonych badań i zapowiada treść pozostałych rozdziałów. Podstawowe aspekty teoretyczne i poszerzoną

[1] Ustawa o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuk, tekst ujednolicony: Dz. U. poz. 882 z 2018 roku.

motywację można znaleźć w rozdziale drugim. Jest napisany w sposób pokazujący zrozumienie problemu oraz obecny stan wiedzy, w tym obecne limity doświadczalne dipolowego momentu elektrycznego niektórych cząstek elementarnych. Tym niemniej, mam kilka zastrzeżeń do tego opisu, bowiem:

a) Ważna dla zjawiska łamania symetrii sprawa niezerowej masy neutrin została całkowicie pominięta. Czytelnik pozostaje tylko w wyidealizowanym obrazie lewoskrętnych neutrin i prawoskrętnych antyneutrin, tymczasem stan wiedzy o tych cząstkach nie jest już tak dwubiegunowy.
b) Autorka cytuje ważne dla dziedziny artykuły, które opisują eksperymenty, w których istotne dla sprawy symetrii badania zostały po raz pierwszy przeprowadzone. Kilkadziesiąt lat minęło od czasu realizacji tych pionierskich badań i przedstawienie czytelnikowi współczesnej literatury zagadnienia byłoby przydatne, zwłaszcza pod kątem ich zrozumienia w Modelu Standardowym oraz jego rozszerzeniach. Krytyczny przegląd wiedzy z tego zakresu zawiera choćby standardowy Review of Particle Physics[2], są też liczne opracowania książkowe.
c) Podobnie, iloraz liczby barionów do liczby fotonów (wzór 2.1), którego wartość jest podana z prawie 1% dokładnością, powinien też być oparty o bibliografię tematu. Na wspomnianą wartość wpływ mają wyniki pomiarów parametrów kosmologicznych zrealizowanych przy użyciu satelity Planck i warto byłoby sprecyzować, które (2018 rok[3] czy wcześniejsze).

Na zakończenie dyskusji treści tego rozdziału pozwolę sobie na komentarz dotyczący jednostek używanych w opisie wartości elektrycznego momentu dipolowego (EDM). Autorka, tak jak i cała literatura przedmiotu, używa mikroskopowo-makroskopowej wartości $e \cdot cm$, która nie oddaje subatomowego charakteru tej wielkości. Jednostka typu $e \cdot fm$ wydaje się, że lepiej by opisywała skalę poszukiwanego efektu w typowych jednostkach fizyki subatomowej. Dopiero przykładowe skalowanie do rozmiaru Ziemi[4] lepiej uwidacznia, jak mały efekt jest poszukiwany w tych badaniach.

Rozdział trzeci rozprawy to przedstawienie równań kinematycznych stosowanych w optyce wiązek cząstek naładowanych. Szczególne przypadki ruchu cząstki w polu magnetycznym, przedstawione w nieinercjalnym układzie wiązki, są precyzyjnie omówione. Wprowadzając w rozdziale 3.2.2 oscylacje betatronowe i funkcję $\beta(s) = u^2(s)$ można było pominąć stosowanie oznaczenia β we wzorze 3.2, skoro potem to oznaczenie zanika w dalszych rozważaniach tego rozdziału.

W tym rozdziale jest też zawarty opis metodyki pomiaru, ważny dla zrozumienia badanego procesu. Jest napisany w sposób przejrzysty, aczkolwiek przy tak dużej liczbie wzorów Autorka nie ustrzegła się drobnych niekonsekwencji. Na przykład we wzorze 3.88 zabrakło wektora nad S, jak również kolejność składników iloczynu wektorowego jest inna niż w poprzednio wprowadzonym wzorze 3.76. Nie ma to konsekwencji co do zjawiska precesji (tylko zmiana kierunku), niemniej jednak identyczna konwencja powinna być stosowana. Pozytywnie oceniam sposób przedstawienia różnych typów pomiarów i ich stosowalności dla różnych

[2] https://pdg.lbl.gov/2019/reviews/rpp2019-rev-cp-violation.pdf, R.L.Workman et al., [Particle Data Group], Review of Particle Physics, to be published (2022)

[3] Astronomy & Astrophysics 641, A6 (2020)

[4] https://www.fe.infn.it/orientamento_fisica/?page_id=3510 [dostęp 8.07.2022]

cząstek, jak również podawanie przez Autorkę typowych wartości pól elektrycznych i magnetycznych, jak również skali przestrzennej urządzenia (rysunek 3.7).

Wyniki przeprowadzonych badań (kluczowy element rozprawy) są zawarte w rozdziale czwartym i piątym. Autorka przedstawiła w nich wyniki oceny wpływu dwóch czynników eksperymentalnych:

1) ciągłość pola magnetycznego w elementach optyki jonowej, oraz
2) wpływ skończonej precyzji umiejscowienia tych elementów.

Trzeba zauważyć, że są to zjawiska występujące w praktyce eksperymentalnej, ale zasadniczo ignorowane w analizach, gdy wynik eksperymentalny jest zdominowany przez inne zjawiska. W rozważanym eksperymencie precyzja jest podstawowym kryterium, bo też poszukiwany efekt jest niesłychanie mały.

Wpływ niejednorodności pola magnetycznego w detektorach służących do pomiaru pędu cząstek (poprzecznego do kierunku pola magnetycznego) jest oczywiście uwzględniany dzięki tworzeniu map pola magnetycznego, które są używane przy rekonstrukcji toru. Dotyczy to urządzeń w skali rzędu wielu metrów, znacznie większej niż skala elementów optyki jonowej. Autorka ilustruje to dobrze na Rysunku 4.4. Skończony gradient pola magnetycznego wpływa na podstawowy tu wzór opisujący precesję (wzór 4.1). Autorka zastosowała opis pola magnetycznego w postaci różnicy dwóch funkcji tangens hiperboliczny (wzór 4.2). Oczekiwałbym tu nieco szerszej dyskusji nad dokonanym wyborem parametryzacji. Weryfikacja precyzji obliczeń numerycznych wobec analitycznych (Tabela 4.2) pozwala zaufać dalszym wynikom otrzymanym przez Autorkę metodami numerycznymi. Należy docenić nietrywialny wkład Autorki rozprawy w rozbudowanie metodyki modelu numerycznego, co uważam za wartościowy element Jej dorobku naukowego. W ilustracjach (np. Rysunek 4.6 i 4.7) zabrakło opisu jednostek na osiach. Konkluzje tego rozdziału dotyczące efektów dipolowych i kwadrupolowych są dobrze przedstawione, a dyskusja pozwala docenić ich znaczenie.

Kolejny rozdział przedstawia szczegółowe omówienie wpływu precyzji geometrycznego umiejscowienia elementów optyki jonowej pierścienia COSY na pomiar Elektrycznego Momentu Dipolowego. Autorka, po przedstawieniu szczegółów funkcjonowania pierścienia COSY, w tym chłodzenia elektronowego i stochastycznego wiązki, uzasadnia jak dobrym urządzeniem jest COSY dla realizacji zaplanowanych pomiarów. Wprowadzając stochastyczne odchylenia położenia i kierunku magnesów (z zerową wartością średnią i rozsądnie przyjętymi odchyleniami) Autorka zrealizowała obliczenia pozwalające na ocenę wpływu ruchu cząstek po trajektoriach odbiegających od centralnej. Ciekawe są korelacje współczynnika nachylenia i amplitudy analizy Fourierowskiej (Rys. 5.12), prowadzące do wyznaczenia górnego ograniczenia czułości na poziomie $D=10^{-19}$ e cm. To kolejny ważny i dobrze uzasadniony wynik rozprawy.

Wysoki poziom czułości otrzymany w obliczeniach przeprowadzonych z założonym Gaussowskim kształtem odchylenia nasuwa pytanie, czy wynik byłby może niższy przy założeniu rozkładu ograniczonego (z małym prawdopodobieństwem rozkład Gaussowski dopuszcza bardzo duże odchylenia, do których inżynierowie COSY raczej by nie dopuścili).

Rozprawę kończy podsumowanie (Rozdział 6), w którym autorka zwięźle przedstawiła zrealizowane badania oraz ich konkluzje.

Rozprawa jest napisana w języku angielskim, dzięki czemu będzie użyteczna dla społeczności fizyków zaangażowanej w realizacje zaplanowanych badań. Nie mam specjalnych uwag do stylu tego naukowego tekstu, w którym z rzadka znalazły się drobne nieprawidłowości, o których nie warto wspominać. Autorka posługuje się dużą liczbą skrótów literowych, które są objaśnione w tekście. W tak obszernym dokumencie przydałby się jednak spis i wytłumaczenie tych skrótów.

Z aspektów formalnych chciałbym wspomnieć o dwóch:

1) W rozdziale 4 jest podrozdział 4.1, który z kolei ma sekcję 4.1.1. Nie ma dalej sekcji 4.1.2, a więc numeracja 4.1.1 wydaje się nadmiarowa.
2) Zawartość Dodatku A jest opisana jedynie przez tytuł tego dodatku. Uważam, że można było uzupełnić ten Dodatek o definicję pola **B**, którego pochodne są tam przedstawione, czyli o wzory 4.22, 4.23 i 4.24., lub powołać się na te wzory.

Rozprawa doktorska pani Anjali Aggarwal pokazuje zalety pierścienia COSY jako narzędzia do pomiarów elektrycznego momentu dipolowego oraz oczekiwaną czułość i jej przyczyny. Jest to ważne i aktualne zagadnienie naukowe jako możliwość poszukiwania efektu o nietrywialnych konsekwencjach dla fizyki. Postawiony cel naukowy został dogłębnie zbadany i uzyskano rezultat o poważnym znaczeniu dla planowanego eksperymentu, przy okazji rozbudowując zaawansowane narzędzia numeryczne i weryfikując poprawność tego rozszerzenia.

Stwierdzam, że rozprawa przedstawiona przez Panią mgr Anjali Aggarwal jest oryginalnym rozwiązaniem problemu naukowego, spełnia ustawowe i zwyczajowe wymagania, a tym samym stawiam wniosek o dopuszczenie Pani Anjali Aggarwal do dalszych etapów postępowania doktorskiego.