

dr hab. Elżbieta Stephan
Instytut Fizyki
Uniwersytet Śląski
ul. 75 Pułku Piechoty
41-500 Chorzów
tel. (32) 349 7646
elzbieta.stephan@us.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej Anjali Aggarwal:
Methods to control systematic uncertainties in search of EDM in storage ring.

Dysertacja dotyczy przygotowania do pomiaru elektrycznego momentu dipolowego (Electric Dipole Moment, EDM) protonu i deuteronu z wykorzystaniem pierścienia akumulacyjnego i jest częścią programu badawczego grupy JEDI (Jülich Electric Dipole Moment Investigation) oraz będącego w fazie projektów CPEDM. Docelowo eksperyment ma dostarczyć wartości lub górnego limitu na wartość EDM protonu i deuteronu. Obserwacja ta łamie symetrię parzystości i odwrócenia czasu, a jej wartość przewidywana przez Model Standardowy jest poza granicą mierzalności we współczesnych eksperymentach. Różne rozszerzenia Modelu Standardowego przewidują jednak większe i różne wartości EDM, stąd możliwa będzie weryfikacja przynajmniej niektórych z nich. Pomiar EDM należy więc do obszaru poszukiwań tzw. nowej fizyki poprzez niezwykle precyzyjne testy symetrii oddziaływań. Wnioski z pomiarów EDM mogą rzucić światło na jedną z największych zagadek współczesnej fizyki, tj. asymetrię między liczbą barionów i antybarionów we wszechświecie.

Warunkiem sukcesu planowanych eksperymentów jest ich niezwykła precyzja, co oznacza konieczność kontrolowania wszelkich efektów systematycznych, w szczególności tych prowadzących do powstania fałszywego sygnału EDM. Ponieważ pomiary typu storage ring EDM opierają się na określaniu polaryzacji, stąd głównym zagrożeniem ich precyzji są zaburzenia ruchu cząstek oraz precesji ich spinów związane z oddziaływaniem ze sterującymi polami elektrycznymi i magnetycznymi pierścienia. Tym kluczowym zagadnieniem jest w całości poświęcona praca doktorska pani mgr Anjali Aggarwal. Praca jest napisana w języku angielskim, składa się z sześciu rozdziałów, dodatku oraz bibliografii. Po krótkim wstępie w rozdziale 1, w rozdziale 2 została przedstawiona motywacja teoretyczna prowadzonych badań, definicja istotnych obserwacji i ich transformacje względem operacji parzystości i odwrócenia czasu, a także status pomiarów EDM dla cząstek naładowanych. Rozdział 3 jest poświęcony opisowi dynamiki wiązki i spinu w pierścieniu akumulacyjnym oraz możliwym metodom pomiaru EDM. Dwa następne rozdziały przedstawiają badania wykonane przez doktorantkę dla metody Quasi-Frozen Spin (QFS). W rozdziale 4 została przedstawiona analiza zachowania spinu protonów i deuteronów w dedykowanym pierścieniu akumulacyjnym, a rozważania w rozdziale 5 odnoszą się do istniejącego akceleratora COSY. Ostatni rozdział stanowi podsumowanie i zawiera wnioski płynące z uzyskanych wyników. W Dodatku zostały zebrane analityczne wzory na pochodne pola magnetycznego w soczewce kwadrupolowej dla tzw. funkcji pół-symetrycznej. Bibliografia zawiera 91 pozycji.

Praca doktorska mgr Anjali Aggarwal ma logiczny układ i zawiera wiele cennych informacji wprowadzających w tematykę prowadzonych badań. Można jedynie odczuwać pewien niedosyt odnośnie prezentacji dotychczasowych pomiarów EDM. Wymienione zostały jedynie

pomiary z wykorzystaniem pierścieni akumulacyjnych. Ma uzasadnienie w tematyce pracy, niemniej referencje do pomiarów „pułapkowych” mogłyby ułatwić orientację czytelnikowi mniej od Autorki obeznanemu z zagadnieniami pomiarów EDM. Ponadto pomocne byłoby wyjaśnienie, dlaczego ważne są pomiary różnych cząstek w sektorze hadronowym, w tym układów złożonych, jak deuteron. O ile w rozdziale 2 wspomniane zagadnienia są potraktowane bardzo skrótowo, to rozdział 3 stanowi bardzo konkretną bazę wiedzy dotyczącą dynamiki wiązki, polaryzacji, oddziaływania pól z momentami elektrycznymi i magnetycznymi cząstek i wreszcie metod pomiaru elektrycznego momentu dipolowego. Doktorantka korzystała z wielu źródeł i na tej podstawie udało jej się stworzyć spójny opis. Należy docenić bardzo dydaktyczny opis ruchu cząstki w polu, poczynając od przypadku najbardziej ogólnego, poprzez różne uproszczenia, aż do wersji najłatwiejszej do opisu analitycznego. Pewne wątpliwości i uwagi związane z opisem wzorów dotyczących precesji spinu przedstawiam w dalszej części recenzji, ale są one niewielkie wobec bogatego materiału prezentowanego w rozdziale 3. Ważnym wnioskiem płynącym z analizy wzorów jest podobieństwo efektów wywołanych oddziaływaniem z polami poszukiwanego EDM oraz dwu innych, niezerowych momentów: elektrycznego momentu kwadrupolowego (EQM) oraz magnetycznego momentu dipolowego (MDM). Doktorantka opisuje też metody pomiarowe nastawione na maksymalizację efektów EDM w stosunku do MDM oraz proponowany układ elementów sterowania pędem i spinem wiązki, zoptymalizowany dla potrzeb pomiaru metodą QFS.

Informacje zebrane w rozdziale 3 są wprowadzeniem do dwu rozdziałów, 4 i 5, najważniejszych w tej pracy, bo przedstawiających analizy efektów systematycznych przeprowadzone przez mgr Aggarwal. Zastosowane metody to połączenie obliczeń analitycznych i symulacji. Takie dwutorowe podejście pozwala na zrozumienie elementarnych efektów oraz kontrolę docelowych symulacji prowadzonych dla złożonych układów wielu elementów prowadzenia wiązki. W rozdziale 4 analiza odnosi się do deuteronów o energii 270 MeV w dedykowanym układzie QFS. Układ ten ze wszystkimi elementami zakrzywienia i ogniskowania wiązki oraz filtrami Wiena został zaprogramowany w pakiecie do symulacji wiązki BMAD, który pozwala na śledzenie cząstki i jej spinu. BMAD musiał do tego celu zostać wzbogacony w oddziaływania momentów elektromagnetycznych z gradientami pola. Kolejną komplikacją było wprowadzenie realistycznych rozkładów pola z ich rozmyciem na krawędziach magnesów i pojawieniem się tym samym dodatkowych składowych. Wymagało to w pierwszej kolejności obliczeń analitycznych i kontroli spójności w układach dwu- i trójwymiarowych. Po zaimplementowaniu wszystkich elementów, doktorantka przeprowadziła analizę czasowego przebiegu składowej pionowej polaryzacji dla tzw. układu symetrycznego, nastawionego na pomiar EDM. W tym przypadku zachodzi tłumienie efektu pochodzącego od EQM. Zmiana parametrów filtrów Wiena prowadzi do sytuacji odwrotnej: tłumienia wpływu EDM oraz pojawienia się efektu od EQM. Daje to unikalne możliwości kontroli przyczynku od znanego EQM oraz sprawdzenie, w jakim stopniu są pod kontrolą gradienty pól w pomiarze EDM, czyli określenie związanych z tym niepewności systematycznych.

Ponieważ optymalny pierścień do pomiaru EDM jeszcze nie istnieje, potrzebny był inny układ doświadczalny do testowania idei pomiarowych i pierwszych pomiarów EDM. W przypadku projektu JEDI bazą był istniejący w Centrum Badawczym Juelich COSY – Cooler Synchrotron, który został uzupełniony o filtr Wiena oraz dodatkowy polarymetr. Jest on źródłem wiarygodnych informacji dotyczących dokładności pól elektromagnetycznych, ma też wbudowane systemy chłodzenia elektronowego i stochastycznego oraz korekty trajektorii wiązki. Układ COSY został zaprogramowany w BMAD w celu zbadania wpływu niedokładności ustawienia poszczególnych elementów. Doktorantka przeprowadziła również obliczenia analityczne dla uproszczonego przypadku oraz ich analizę fourierowską, wykorzystując program Mathematica. Pozwoliło to na zrozumienie wpływu składowych pól na wynik, a w szczególności pokazało koherentne sumowanie się efektu od EDM oraz od niedokładności pozycji magnesów. Analiza fourierowska

okazuje się bardzo pożytecznym narzędziem separacji tych informacji, co zostało potwierdzone przez szczegółowe symulacje.

Doktorantka przeprowadziła analizę niepewności systematycznych pomiaru EDM w pierścieniu akumulacyjnym, udowadniając, że założona dokładność wyniku jest możliwa przy spełnieniu szeregu warunków. Pierwszy z nich to odpowiedni projekt pierścienia dla deuteronów oparty na metodzie QFS i pomiarze referencyjnym znanego EQM. Drugi zestaw warunków dotyczy określonej precyzji ustawienia pozycji oraz kątów magnesów w połączeniu z odpowiednim działaniem systemów korekty orbity. Zostało pokazane, że obecnie istniejący synchrotron COSY spełnia te warunki w stopniu wystarczającym do przeprowadzenia pomiaru EDM z dokładnością 10^{-19} e·m. Wiadomo też, które elementy muszą być szczególnie precyzyjnie ustawione w przyszłych projektach. Wreszcie niezbędnym i skutecznym narzędziem do separacji przyczynków od EDM oraz od pól wynikających z niedokładności pozycjonowania magnesów jest zaawansowana analiza fourierowska, w tym analiza czasowa związana z narastaniem polaryzacji pionowej. Wnioski uzyskane w pracy mają bardzo duże znaczenie dla projektu pomiarów EDM.

Jakość edytorska pracy jest bardzo dobra, zarówno pod kątem jakości ilustracji, jak i starannej edycji licznych wzorów. Tekst jest praktycznie wolny od literówek, natomiast pojawiają się miejscami niedociągnięcia językowe, np. niekompletne zdania lub powtórzenia.

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

1. Wzory 3.89 i 3.90 wg opisu w pracy odnoszą się do częstości precesji spinu i są uproszczeniem wzorów 3.77 i 3.78. Jednak ich postać wskazuje, że są to raczej wzory typu 3.84 (z ograniczeniem do składowych prostopadłych), opisujące różnicę częstości precesji spinu i pędu. To podejrzenie potwierdza warunek na zamrożenie spinu, który sprowadza się do zerowania wzoru 3.89.
2. Opis wzorów na częstość oscylacji spinu wokół pędu, 3.97 i 3.100, jest nieco zagmatwany i sugeruje normalizację do, odpowiednio, wzorów 3.95 i 3.98. W rzeczywistości wydaje się, że pierwszy przypadek to różnica 3.95 i 3.96 znormalizowana do 3.96, natomiast drugi: różnica 3.98 i 3.99 znormalizowana do 3.99.
3. Pierścień QFS wg opisu w pracy składa się z dwu łuków i dwu sekcji prostych. Na rysunku widzimy natomiast cztery łuki i cztery sekcje proste, z czego dwie „bierne” jeśli chodzi o warunki częściowego zamrożenia spinu, a dwie czynne, czyli wyposażone w filtry Wiena. Wydaje się, że autorka pisząc o częściach prostych odnosi się czasem do sekcji biernych, a czasem do czynnych. W odniesieniu do rysunku 4.2 nasuwa to kolejne wątpliwości: wg komentarza sekcje proste mają zerową dyspresję, natomiast sekcje z filtrami Wiena ewidentnie wykazują dużą dyspersję. Bardziej jednoznaczne zdefiniowanie nazw sekcji byłoby ułatwieniem dla czytelnika.
4. Moje wątpliwości budzą znaki w pochodnych 4.10-4.13 w stosunku do wzorów 4.6 i 4.7.
5. W tekście pracy pojawiają się różne docelowe dokładności: 10^{-31} e·m (str. 78 i 79) lub 10^{-29} e·m (np. str. 2, 22, 56). Które z nich są rzeczywiście celem badań eksperymentalnych CPEDM?
6. W tekście pojawiają się odniesienia do protonów i deuteronów oraz rozróżnienia między nimi. Czasem jednak nie jest jasne, które metody i wnioski mają zastosowanie w obu przypadkach i czy spodziewane dokładności będą identyczne. Czy na podstawie badań prowadzonych w pracy można oszacować dokładności możliwe do osiągnięcia przez JEDI dla protonów i deuteronów? O ile dokładniej trzeba pozycjonować elementy prowadzenia wiązki w układzie QFS, by uzyskać wymaganą dokładność dla deuteronów w przyszłych eksperymentach? Która metoda jest preferowana dla protonów?

Powyższe uwagi krytyczne i pytania nie wpływają na jednoznacznie pozytywną ocenę pracy doktorskiej, która z sukcesem podejmuje kluczowe problemy dokładności pomiaru elektrycznego momentu dipolowego protonu i deuteronu. Projekt, do którego istotnym przyczynkiem jest prezentowana praca, należy do frontu badań symetrii oddziaływań i docelowo może osiągnąć ekstremalnie wysoką precyzję wyniku, pozwalającą na poszukiwanie nowej fizyki i testy jej modeli. Zaprezentowane w pracy metody są całkowicie nowatorskie.

Na podstawie przedłożonej do recenzji rozprawy doktorskiej Pani mgr Anjali Aggarwal pt. *Methods to control systematic uncertainties in search of EDM in storage ring* stwierdzam, że spełnia ona warunki stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie doktorantki do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Elżbieta Stephan