



Dr hab. Adam Kozela
tel. 12 6628290
NZ24 IFJ PAN

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Anjali Aggarwal
pt. „Methods to control systematic uncertainties in search
of EDM in storage ring”

Rozprawa doktorska magister Anjali Aggarwal została złożona na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego w maju 2022 roku. Jest napisana w języku angielskim, składa się z sześciu rozdziałów, jednego appendiksu, liczy 116 stron. Tematem pracy jest oszacowanie błędów systematycznych pomiaru elektrycznego momentu dipolowego protonu i deuteronu z wykorzystaniem pierścienia akumulacyjnego. Promotorem pracy jest Prof. dr hab. Andrzej Magiera.

Skończona wartość elektrycznego momentu dipolowego cząstek niezdegenerowanych, obdarzonych spinem dotyka jednego z najważniejszych problemów współczesnej fizyki – obserwowanej asymetrii pomiędzy materią i antymaterią. Problem ten stanowi motywację szerokiej klasy eksperymentów, wśród których pomiar elektrycznego momentu dipolowego zajmuje poczesne miejsce. Wyznaczenie niezerowej wartości tej obserwacji miałyby fundamentalne znaczenie dla teorii, pozwalając potencjalnie zidentyfikować nowe źródło łamania symetrii względem odwrócenia kierunku czasu, efekt nie ujęty w obecnym kształcie Modelu Standardowego. Do tej pory nie udało się tego dokonać dla żadnej z badanych cząstek, a poprawa niezwykle już wyśrubowanych dokładności pomiarów okupiona jest olbrzymim kosztem nowych układów eksperymentalnych oraz walką z coraz wymyślniejszymi źródłami błędów systematycznych.

Na tym tle obecne ograniczenia na elektryczny moment dipolowy protonów i deuteronów nie wydają się imponujące. Oczywiście ma to związek z faktem, że są to cząstki naładowane. W ich przypadku adekwatną metodą pomiaru elektrycznego momentu dipolowego może być wykorzystanie pierścienia akumulacyjnego, w którym cząstki te, o pierwotnej polaryzacji podłużnej, poprzez oddziaływanie elektrycznego momentu dipolowego ze składową radialną pola elektrycznego, krążąc w ringu nabierają składowej polaryzacji prostopadłej do płaszczyzny ringu.

Tą metodę, oraz infrastrukturą akceleratora COSY w Juelich, proponuje wykorzystać kolaboracja JEDI. W ramach tej kolaboracji magister Anjali Aggrawal przeprowadziła badanie dwóch zupełnie różnych efektów odnoszących się do niepewności systematycznych ingerujących w pomiar elektrycznego momentu dipolowego. Pierwszy wykorzystuje oddziaływanie dobrze znanego co do wartości elektrycznego momentu kwadropolowego deuteronu (lub magnetycznego momentu dipolowego w przypadku protonu) z gradientami pól w pierścieniu akumulacyjnym. Oddziaływanie to powoduje analogiczny efekt jak niezerowy elektryczny moment dipolowy. Drugi efekt jest konsekwencją skończonej dokładności pozycjonowania elementów optyki wiązki pierścienia akumulacyjnego.

Konstrukcja pracy bardzo dobrze odpowiada jej tematyce. Po skrótowym przedstawieniu motywacji, proponowanej metody pomiaru elektrycznego momentu dipolowego oraz podjętych w pracy problemów, w rozdziale drugim magister Anjali Aggrawal w sposób bardziej szczegółowy lecz jednocześnie całkiem przystępny wyjaśnia motywację poszukiwania skończonej wartości elektrycznego momentu dipolowego dla różnych cząstek. W pracy chyba zabrakło jasnego stwierdzenia, przynajmniej w jednym miejscu, że dla zaistnienia łamania symetrii T i CP (zakładając prawdziwość twierdzenia CPT) konieczna jest koincydencja trzech warunków, czyli braku degeneracji, posiadania spinu i elektrycznego momentu dipolowego. W rozdziale tym Autorka używa stwierdzenia „EDM is a possible source of CP violation...”. Zastosowanie tutaj słowa źródło jest trochę nieszczęśliwe. Oczywiście skończona wartość elektrycznego momentu dipolowego cząstki obdarzonej spinem łamie symetrię CP, ale źródła tej wartości należy szukać w modyfikacji oddziaływań, nowych cząstkach proponowanych w którymś z licznych rozszerzeń Modelu Standardowego, o czym zresztą Autorka pisze w innym miejscu. Inną niezręcznością jest umieszczenie w tabeli 2.1 przestarzałych wartości EDM dla wszystkich cząstek z wyjątkiem mionu (względem Particle Data Group z 2020 roku), podczas gdy koledzy z niemal sąsiedniego pokoju brali udział w najdokładniejszym obecnie pomiarze tej wartości otrzymując prawie dwukrotnie lepsze ograniczenie na elektryczny moment dipolowy neutronu niż zaprezentowano w tabeli.

Rozdział trzeci wprowadza narzędzia pozwalające opisać zachowanie cząstek w pierścieniu akumulacyjnym. Wychodząc z podstawowych wzorów na siłę Lorentza, Autorka wyprowadza równanie ruchu cząstki naładowanej w specyficznym, dogodnym do opisu układzie odniesienia, poruszającym się wraz z cząstką wzdłuż tak zwanej orbity referencyjnej. Rozdział ten jest niezwykle wartościowy dla osób rozpoczynających swoje zaangażowanie w tej tematyce. Przeprowadzone tu rozumowania i zdefiniowane pojęcia pozwolą lepiej zrozumieć dalszą część pracy, a także poznać liczne przybliżenia prowadzące do ostatecznej postaci równań stosowanych do opisu dynamiki wiązki i ewolucji spinu. W samym tym rozdziale znajdziemy 104 wzory. Zdarzają się w nich błędy, mają one jednak charakter edytorski, co jest jasne, gdyż nie propagują się dalej. Oczywiście dla wyniku pracy ważne jest to co zostało użyte w programach. Pani Anjali Aggrawal używała biblioteki procedur BMAD, standardowego i tym samym doskonale sprawdzonego oprogramowania używanego do projektowania akceleratorów. Ważną częścią pracy było jednak uzupełnienie tej biblioteki o procedury pozwalające na policzenie efektu oddziaływania elektrycznego momentu kwadropolowego oraz magnetycznego momentu dipolowego z gradientami pól. Oprócz dodania nowych członów charakteryzujących to oddziaływanie, wymagało to poprawy definicji pól elektrycznych i

magnetycznych, tak aby uwzględnione zostały także pola rozproszone, czyli de facto przejście od problemu dwu- do trzy-wymiarowego. To rzecz jasna bardzo istotna ingerencja, wymagająca starannego sprawdzenia. Bardzo przekonującą metodą sprawdzenia zastosowaną w pracy jest porównanie z obliczeniami analitycznymi, uzyskanymi z użyciem programu Matematica dla mocno uproszczonego modelu – metody wykorzystanej wcześniej i opublikowanej przez promotora jej pracy.

Taką walidację oraz szczegóły przejścia do w pełni trójwymiarowej definicji pól dla każdego z elementów optyki wiązki możemy znaleźć w rozdziale czwartym. Wyliczając realistyczne rozkłady pól magister Aggrawal oparła się na pracy Muratori et al. z 2015 roku, która podaje wyrażenia analityczne dla magnesów o dowolnej połowości. Dlatego trochę zdziwiło mnie, że magnesy sekstupolowe pozostawiono w wersji dwuwymiarowej. Rozszerzona wersja pakietu BMAD, zastosowana do konfiguracji ringu działającej w modzie QFS (Quasi Frozen Spin) z realistyczną definicją pól, pozwoliła na porównanie efektów od elektrycznego momentu dipolowego i kwadrupolowego na tempo przyrostu pionowej składowej polaryzacji deuteronu. Pomiaru te są niezależne, bo pomiar EDM wymaga zastosowania symetrycznej konfiguracji ringu, natomiast pomiar EQM asymetrycznej, przy czym zmienia się tylko wartość pola filtrów Wien'a po jednej stronie, bez ingerencji w hardware. Okazało się, że indukowane sygnały są podobnej wielkości przy założeniu elektrycznego momentu dipolowego rzędu 1.4×10^{-31} . Biorąc pod uwagę, że elektryczny moment kwadrupolowy znany jest z dokładnością promilową można wnioskować, pomiar tej wartości jest czuły na efekty systematyczne do poziomu 10^{-34} , co przekłada się na możliwość zmierzenia skończonej wartości EDM wynikającej z Modelu Standardowego.

Tutaj muszę zauważyć, że w podsumowaniu wyników w rozdziale szóstym Autorka podaje liczby o dwa rzędy wielkości mniejsze. Byłoby wskazane wyjaśnić tę rozbieżność.

Posiadając realistyczną, w pełni trójwymiarową definicję pól elektrycznych i magnetycznych w całym ringu, oraz oprogramowanie pozwalające precyzyjnie śledzić ruch cząstek i ewolucję ich spinu z uwzględnieniem zaniedbywanych dotąd efektów od gradientów pól, w rozdziale piątym magister Aggrawal pokusiła się o oszacowanie kolejnego efektu systematycznego. Wynika on ze skończonej dokładności pozycjonowania elementów optyki wiązki i jest nie do uniknięcia w realnym pierścieniu akumulacyjnym. Badanie to przeprowadziła dla konfiguracji istniejącego akceleratora COSY. Sama metoda została zaproponowana przez promotora pracy i opiera się na dokonaniu transformacji Fouriera przebiegu mierzonej wartości składowej pionowej polaryzacji indukowanej przez niezerowy EDM i nieidealne pozycjonowanie elementów optyki wiązki. Okazuje się, że w rozkładzie współczynników Fouriera można wyodrębnić dwa dominujące maksima: jedno przy częstotliwości precesji spinu, zawierające wkład od EDMu i niedoskonałości pozycjonowania, i drugie przy częstotliwości zależnej także od częstotliwości obiegu wiązki w ringu, związane niemal wyłącznie z pozycjonowaniem magnesów.

W przeprowadzeniu tego badania istotnym problemem do rozwiązania jest określenie wielkości możliwych odchylenia elementów od pozycji idealnej. Magister Aggrawal rozwiązała tym problem wykonując obliczenia dla dużych zestawów losowo generowanych odchylenia dla wszystkich sześciu stopni swobody każdego z elementów. Użyte do losowań rozkłady gaussa były wycentrowane w zerze, a do określenia ich szerokości Autorka posłużyła się dedykowanymi pomiarami wykonanymi przez wyspecjalizowaną firmę oraz wynikami procedury użytej do poprawy pozycji wiązki

przy pomocy zestawu 59 monitorów pozycji wiązki sprzężonych z 41 magnesami korekcyjnymi. Ostatecznie użyto rozkłady o sigma 0.2 mm dla translacyjnych i 0.2 mrad dla rotacyjnych stopni swobody. W kontekście przeprowadzonych analiz te wartości wydają się być realistyczne, choć biorąc pod uwagę rozmiary elementów i całego systemu, bardzo wyśrubowane.

Otrzymane wyniki pokazują, że najistotniejszy wpływ na wartość błędu pomiaru elektrycznego momentu dipolowego z wykorzystaniem pierścienia akumulacyjnego ma translacyjny stopień swobody pozycjonowania kwadrupoli w kierunku pionowym. Dominuje on całkowicie przyrost składowej pionowej polaryzacji. W dalszej kolejności, o prawie rząd wielkości mniejszy efekt generują rotacyjne stopnie swobody dla magnesów dipolowych. Wielkość sumarycznego efektu może być określona z wysokości maksimum rozkładu współczynników Fouriera dla częstości $\omega_0 - \omega_s$.

Analogiczną analizę magister Aggrawal przeprowadziła dla wybranych wartości elektrycznego momentu dipolowego deuteronu z zakresu $10^{17} - 10^{20}$ dochodząc ostatecznie do wniosku, że obecny poziom dokładności pozycjonowania elementów ringu w COSY pozwala na pomiar EDM z dokładnością 10^{-14} . W podsumowaniu tego wyniku zabrakło mi komentarza kreślącego drogę do docelowej dokładności na poziomie 10^{-29} , ewentualnie stwierdzenia, że ten cel jest jednak nieosiągalny.

W mojej niefachowej opinii praca napisana jest bardzo dobrym językiem angielskim. Natknąłem się na bardzo nieliczne błędy, których nie warto nawet wymieniać. Stronę graficzną pracy także należy pochwalić: rysunki są wykonane bardzo dobrze i wraz z bogatą literaturą (91 pozycji), znakomicie ułatwiają czytelnikowi zrozumienie prezentowanych treści.

Reasumując: przedstawiona mi do recenzji praca dotyczy problemu o fundamentalnym znaczeniu dla fizyki. W jej ramach jeden z podstawowych pakietów do śledzenia cząstek naładowanych w polach elektrycznych i magnetycznych, także w kontekście liczenia optyki wiązek w akceleratorach, został wzbogacony o dodatkowe funkcjonalności o podstawowym znaczeniu dla pomiaru elektrycznego momentu dipolowego. Wykorzystując tak wzbogacone oprogramowanie magister Aggrawal zaprezentowała działanie dwóch niezależnych metod pozwalających określić wielkość niepewności systematycznej pomiaru elektrycznego momentu dipolowego protonu i deuteronu z wykorzystaniem pierścieni akumulacyjnych. Zakres i jakość pracy, osiągnięte wyniki oraz ich potencjalna użyteczność dla kolaboracji JEDI, a także innych eksperymentów korzystających z podobnych metod, skłaniają mnie do podjęcia decyzji o wnioskowaniu o dopuszczeniu magister Anjali Aggrawal do dalszej części przewodu doktorskiego.

Kraków, 23.08.2022

Adam Korzec