

Kraków 31.12.2015

dr hab. Jerzy Łukasik
IFJ PAN

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgra Grzegorza Wyszyńskiego
pt. *Development of magnetic field control systems in the nEDM experiment*

Praca doktorska pana mgra Grzegorza Wyszyńskiego związana jest przygotowaniem układu eksperymentalnego do pomiarów elektrycznego momentu dipolowego neutronu w PSI w Villigen. Eksperymenty mające na celu pomiar zera, lub wielkości minimalnie od niego odbiegających z wysoką precyzją należą do najtrudniejszych w fizyce. Wynika to z potrzeby minimalizacji, kontroli i ewentualnie kompensacji czynników zaburzających pomiar i mających systematyczny wkład do niepewności pomiaru. Co więcej, aby wykluczyć zerową wartość pomiaru, jego niepewność musi być mniejsza od wartości bezwzględnej mierzonej obserwabli. Do tej klasy eksperymentów należy pomiar nEDM. Precyzyjny pomiar elektrycznego momentu dipolowego neutronu na poziomie wyższym niż przewidywany przez model standardowy ($\sim 10^{-32}$ e cm) miałby fundamentalne znaczenie nie tylko w fizyce cząstek, ale również w kosmologii. Świadom wagi przyszłych wyników eksperymentalnych, doktorant podjął się trudnego i odpowiedzialnego zadania maksymalnej redukcji i pełnej kontroli czynników wpływających na niepewność systematyczną pomiaru nEDM. W eksperymencie w PSI kluczowym czynnikiem, ze względu na niezerowy dipolowy moment magnetyczny neutronu, będzie zachowanie stałości i jednorodności pola magnetycznego w trakcie i między pomiarami oraz jego kontrola i kompensacja zaburzeń na poziomie nT.

Praca składa się z trzech części. W części pierwszej autor wprowadza podstawowe pojęcia, przedstawia krótką historię i stan bieżący pomiarów nEDM oraz wyjaśnia specyfikę metody i układów eksperymentalnych związanych z pomiarami elektrycznego momentu dipolowego neutronu. W tej części znajduje się też opis układu pomiarowego w PSI, analiza systematycznych efektów fałszujących lub maskujących pomiar nEDM, omówienie elementów systemu kontroli pola magnetycznego, oraz opis ulepszonej wersji układu pomiarowego do przyszłych pomiarów nEDM w PSI.

Część druga i trzecia zawierają główne wyniki badań autora. W części drugiej, na wstępie, przedstawione są wyniki pomiarów efektywności ekranowania zewnętrznych zaburzeń elektromagnetycznych przy pomocy istniejącego systemu SFC oraz przy pomocy prototypu systemu Merritt. Autor dokonuje także porównania modelowego obu systemów w oparciu o przeprowadzone symulacje. Porównując wyniki symulowanej efektywności ekranowania Δ (rys. 4.2 i 4.7) można by oczekiwać około rząd wielkości lepszej efektywności prototypu w stosunku do istniejącego systemu, zwłaszcza dla odległych źródeł zakłóceń. Wyniki porównań mierzonych efektywności obu systemów nie wskazują jednak na jakąś znaczącą przewagę systemu Merritt. Do porównań, rys. 4.3 i 4.20, wykorzystano tutaj inną obserwabłę, dynamiczny współczynnik ekranowania, DSF. DSF skonstruowany jest w oparciu o odchylenie standardowe Allana, σ_y . W pracy brakuje argumentacji dlaczego takie właśnie obserwabły zostały wybrane do określenia efektywności ekranowania. Na pewno bardziej miarodajny byłby pomiar eksperymentalnej wersji Δ , ale wymagałoby to przeprowadzenia pomiarów w bardziej kontrolowanym środowisku, ze znanym zaburzeniem, co w praktyce pewnie było niemożliwe. Standardowo, σ_y używa się do określenia szumu wprowadzanego do mierzonej, z założenia stałej, wielkości przez urządzenie pomiarowe. Pozwala ono określić optymalną ilość pomiarów, czy czas pomiaru, po którym szum generowany przez urządzenie pomiarowe jest maksymalnie redukowany. Odchylenie standardowe Allana miałoby więc zastosowanie

np. w optymalizacji pomiaru (stałego) pola z użyciem magnetometru. W pracy σ_y zastosowane jest do pomiaru szumu pola po kompensacji oraz szumu rekonstruowanego zakłócenia. Szum własny magnetometru można tu najprawdopodobniej pominąć. Jaki jest fizyczny sens używania tej obserwacji do określania efektywności ekranowania zewnętrznych zakłóceń o zmiennej skokowo w czasie średniej wartości? W szczególności, jak interpretować ewolucję σ_y w zależności od czasu całkowania, np. na rys. 4.19? (Nawiasem, rysunki 4.19 i 4.20 mogłyby być bardziej czytelne, stosując ten sam zakres skali na osi y i unikając przesłaniania wykresu przez legendę). Układ kompensacyjny ma działać w czasie rzeczywistym i istotna jest jego chwilowa efektywność, a nie uśredniona po czasie. Dlatego rys. 4.18 jest chyba lepszym podsumowaniem wyników. Z rysunku widać, zwłaszcza z panelu (c), że układ kompensacyjny tłumi amplitudę oscylacji ok. 4-krotnie na początku pomiaru, ale około godziny 3:00 układ wydaje się wprowadzać szum, bo amplituda po kompensacji jest jakieś 20-30% większa od zaburzenia. Czy jest to efekt braku niezależnego pomiaru zaburzenia? Zakłócenie nie jest mierzone niezależnie, ale jest rekonstruowane, co może być źródłem dodatkowych szumów i autokorelacji, chociaż w tym przypadku świadczy raczej o niedoszacowaniu amplitudy zakłócenia. DSF na rys. 4.20 osiąga maksymalną wartość ok. 10-11 po ok. 10 s, ale chyba w tym pomiarze nie chodziło o określenie po jakim czasie szumy się maksymalnie redukują i mają najmniejszy wpływ na dokładność pomiaru średniej wartości pola. Porównując rys. 4.3 i 4.20 widać, że układ SFC po 10 sekundach tłumi amplitudę oscylacji tylko 2-3 razy. (Nawiasem, na górnym panelu rys. 4.3 brakuje ciągłej linii dla monitorującego magnetometru). Tak więc, mimo niezbyt optymistycznej konkluzji autora pod koniec paragrafu 4.2.3 i w ogólnym podsumowaniu, DSF sugeruje, że prototyp zadziałał całkiem nieźle i pokazał przewagę nad istniejącym systemem. Widać, że rozkłady DSF można interpretować na różne, nawet sprzeczne, sposoby. Wydaje się, że największym problemem w pomiarach testowych, oprócz wymienionych przez autora – aparaturowych, uniemożliwiających kompensację ziemskiego pola magnetycznego i wymuszających względny pomiar efektywności tłumienia, był brak możliwości porównania obu urządzeń w tych samych kontrolowanych warunkach, brak niezależnego pomiaru zakłóceń i brak „solidnej” obserwacji pozwalającej na jednoznaczne porównanie wydajności obu urządzeń. Czy w teście SFC były obecne pasywne osłony? Niezależny pomiar zakłóceń, nawet w pewnej odległości od systemu, umożliwiłby stwierdzenie czy obserwowane nieciągłości na rys. 4.18 są realne, czy są np. efektem niestabilności systemu, a także określenie wkładu szumu własnego systemu do mierzonych zakłóceń.

Rozdział 4 demonstruje szeroki i godny uznania warsztat autora jako fizyka eksperymentatora, od opanowania matematycznych, numerycznych i statystycznych metod analizy danych, umiejętności programowania, włącznie z procesorami graficznymi i kontrolerami PID, przeprowadzania skomplikowanych symulacji komputerowych, konstruowania systemów elektronicznych do przetwarzania i akwizycji danych, po umiejętności konstruowania skomplikowanych urządzeń i przeprowadzania eksperymentów. Szczególną uwagę zwraca dążenie autora do perfekcji, do osiągania optymalnych wyników i poszukiwania najlepszych rozwiązań. Przykładem jest tu zastosowanie regularyzacji i jej optymalizacja przy konstruowaniu macierzy odpowiedzi G , a także pozostała część rozdziału 4 poświęcona poszukiwaniu optymalnej konfiguracji cewek zapewniających najlepszą kompensację zakłóceń.

W poszukiwaniu optymalnej konfiguracji cewek autor podejmuje się rozwiązania trudnego problemu wyliczenia takich konfiguracji prądów, które pozwoliłyby, przynajmniej teoretycznie, na wytworzenie z zadaną precyzją, dowolnego pola magnetycznego wewnątrz interesującego obszaru. Ideą autora jest zaprojektowanie układów cewek generujących składowe pola magnetycznego odpowiadające jego poszczególnym składowym harmonicznym. Każda cewka miałaby być mechanicznym odpowiednikiem jednego wyrazu w rozwinięciu zadanego pola B na jego składowe harmoniczne. W poszukiwaniu rozwiązania autor sięga po arsenał wektorowych harmonik sferycznych.

Przeprowadzając analogiczne rachunki jak w pracy [60], w której podobny problem rozwiązano dla pola na zewnątrz układu prądów, autor znajduje wyrażenie na indukcję $\mathbf{B}$ wewnątrz obszaru otaczanego przez rozkład prądów. Wykorzystując analogię pomiędzy funkcjami strumieniowymi generującymi określoną gęstość prądu a rolą skalarnych harmonik sferycznych w wyrażeniu na składową Φ gęstości prądu, autor rozwiązuje odwrotny problem źródła. Rozwiązanie zostaje znalezione poprzez identyfikację poszukiwanego rozkładu poszczególnych składowych prądu z izoliniami odpowiednich skalarnych harmonik sferycznych. Rysunek 4.24 należy niewątpliwie do najciekawszych i najważniejszych w pracy. Na podkreślenie zasługuje dbałość autora o sprawdzanie wyników obliczeń. W pracy przedstawiono wyniki porównań otrzymanych przybliżonych wartości z wynikami analitycznymi dla dwóch układów cewek mających rozwiązania analityczne. Na rysunkach 4.38 i 4.39 widać pewne nieregularności w funkcji $l_{\max}$. Dla niektórych $l_{\max}$ dodanie kolejnego wyrazu rozwinięcia wydaje się pogarszać zbieżność. Czy jest to efekt fizyczny, czy jakiś numeryczny problem? Dla pojedynczej cewki tego efektu nie ma.

Rozdział kończy porównanie efektywności czterech badanych w symulacjach układów cewek. Wyniki zdecydowanie preferują system cewek sferycznych będący efektem obliczeń autora. Jedyne problemy to techniczny dostęp do wnętrza ekranowanego obszaru. W dodatku B autor proponuje też uproszczoną wersję systemu cewek. Na uwagę zasługuje też system komórkowy oraz ulepszona wersja systemu Merritt.

Trzecia część pracy dotyczy problemu równie istotnego co osłona od zewnętrznych zakłóceń, a mianowicie precyzji pomiaru pola magnetycznego wewnątrz komory precesji. Tutaj również ujawniają się wymienione wcześniej atrybuty autora jako fizyka z pasją, zmysłem analitycznym i odpowiedzialnym podejściem do wyników opracowywanych pomiarów i ich precyzji. Wydawać by się mogło, że nie ma nic szczególnego w (nudnej) analizie pomiarów pola magnetycznego wewnątrz magnesu. Nic podobnego. Specyfika pomiaru nEDM wymaga ponadprzeciętnej precyzji pomiaru pola z uwzględnieniem i kontrolą wszystkich potencjalnych źródeł niepewności systematycznych. Wymaga też odpowiednich ludzi - perfekcjonistów. Autor przedstawia w tej części pracy swój 7-parametrowy model pozwalający wyliczyć rzeczywiste wartości pola na podstawie wartości zmierzonych. Tutaj do warsztatu autora należy dodać opanowanie algebry macierzowej, FFT, następnej metody statystycznej, jaką jest metoda bootstrapu, zastosowana przez autora do oszacowania niepewności parametrów map oraz opanowanie arsenału harmonik kartezyjskich. Zastosowanie tych ostatnich do parametryzacji map pola czyni je bardziej uniwersalnymi, uniezależniając wyniki od pozycji robota wykonującego pomiary. Wyniki tej części pracy mają bardzo praktyczny wymiar, dostarczając kolaboracji precyzyjnych map pola, pozwalających na oszacowanie efektów systematycznych wpływających na zafałszowanie nEDM oraz na realistyczne symulacje układu pomiarowego.

Parę uwag korektorskich. W drugim składniku rozwinięcia multipolowego 1.1 zamiast r w liczniku powinien być $\vec{r}$. We wzorze 1.10 można uprościć $\hbar$, zwłaszcza, że jest mowa o częstotliwości kołowej. We wzorze 4.3 brakuje kwadratu normy. W zdaniu powyżej wzoru 4.4 powinno być prawdopodobnie $m \times 3n$. We wzorze 4.19 brakuje nawiasów. We wzorze 4.31 brakuje $4\pi/c$. We wzorach 4.45, 4.46, 4.55, 4.56 nastąpiła zmiana oznaczeń z J^0 na $J^{(2)}$. We wzorach 4.48 i 4.58 powinien być $+$ pomiędzy składnikami sumy.

Praca jest napisana dobrym, zrozumiałym angielskim. Nieliczne, mało istotne, poprawki dotyczą: na str. 6 equal to 346 zamiast equal 346, na str. 16 zamiast though it leads miało być prawdopodobnie thus it leads, na str. 25 neutron zamiast neuron, na str. 44 zdanie „During operation...” jest zbyt skrótowe i przez to niezbyt zrozumiałe, w natępnym zdaniu: this zamiast these, na str. 113 at the same point zamiast in the same point.

Podsumowując, rozprawa doktorska mgra Grzegorza Wyszyńskiego zawiera:

- oryginalne opracowanie modelowe różnych wariantów układów do kompensacji zewnętrznych zakłóceń pola magnetycznego ze wskazaniem optymalnego rozwiązania z systemem cewek sferycznych, generujących składowe pola odpowiadające kolejnym wyrazom rozwinięcia w bazie wektorowych harmonik sferycznych oraz opracowanie bardziej praktycznej realizacji w formie cewek na powierzchni dwudziestościanu,
- wyniki testów i porównawczej analizy danych skuteczności istniejącego 6-cewkowego systemu SFC i 12-cewkowego prototypu systemu Merritt oraz propozycję dodatkowego układu cewek polepszających efektywność prototypu,
- autorski model pola magnetycznego uwzględniający najistotniejsze poprawki związane z niepewnościami systematycznymi jego pomiaru, opracowanie zmierzonych map pola i ich parametryzację w bazie harmonik kartezjańskich umożliwiającą precyzyjne sterowanie cewkami korekcyjnymi oraz przeprowadzanie symulacji.

Praca stanowi zarazem cenny wkład w przygotowanie i powodzenie przyszłych pomiarów nEDM w PSI w ramach międzynarodowej kolaboracji.

Grzegorz Wyszyński jest współautorem 7 prac (wg bazy Web of Science), w tym dwóch cytowanych w rozprawie. Nie ma wątpliwości, że będzie on nieocenionym współpracownikiem przy analizie przyszłych danych eksperymentalnych, a następne, bardziej autorskie, publikacje będą tylko kwestią czasu.

Biorąc pod uwagę nakład pracy autora, wszechstronność jego zainteresowań i umiejętności, dbałość o poprawność i precyzję wyników oraz jakość i oryginalność prezentowanych osiągnięć uważam, że zawarty w rozprawie materiał i forma prezentacji spełniają wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie mgra Grzegorza Wyszyńskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

J. Luleśiński