

**Recenzja pracy doktorskiej Pana mgr Grzegorza Wyszyńskiego
pt. „Development of Magnetic Field Control Systems in the nEDM
Experiment”**

Rozprawa doktorska pana mgr Grzegorz Wyszyńskiego powstała podczas Studiów Doktoranckich w Zakładzie Fizyki Jądrowej, Wydziału Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie pod kierunkiem prof. dr hab. Kazimierza Bodka.

Zespół naukowców z ZFJ UJ, pod kierunkiem prof. K. Bodka od wielu lat realizuje badania najważniejszych symetrii w przyrodzie. Pomiar elektrycznego momentu dipolowego neutronu powinien pozwolić na weryfikację różnych teorii oddziaływań fundamentalnych i wytłumaczyć niezrozumiałe własności i zjawiska fizyczne. Wyznaczenie limitu wartości elektrycznego momentu dipolowego neutronu w eksperymencie nEDM może potwierdzić naruszenie zachowania symetrii CP, niezależnie od możliwości Modelu Standardowego.

Pan mgr Grzegorz Wyszyński uczestniczy w dużym międzynarodowym zespole (ok. 60 badaczy) realizującym projekt „nEDM experiment at PSI”, którego celem jest precyzyjny pomiar elektrycznego momentu dipolowego neutronu. W proponowanym projekcie pomiar elektrycznego momentu dipolowego jest wykonywany tzw. metodą Ramsey’a z wykorzystaniem spolaryzowanych, ultra zimnych neutronów, które precesują w jednorodnym polu magnetycznym.

Kluczowym warunkiem powodzenia precyzyjnych pomiarów jest zapewnienie stałości w przestrzeni i czasie magnetycznego pola precesji neutronów, poprzez skuteczną izolację obszaru pomiarowego od zewnętrznych zaburzeń elektro-magnetycznych. Zaburzenia pola magnetycznego precesji oraz jego kontrola w zasadniczy sposób wpływają na efekty błędów systematycznych elektrycznego momentu dipolowego neutronu.

Część ważnych pomiarów i badań stanowiących podstawę dysertacji, doktorant wykonał podczas 2-letniego pobytu w Instytucie Paula Scherrera (PSI) w Villigen w Szwajcarii.

Celem pracy doktorskiej mgr Grzegorza Wyszyńskiego było właśnie opracowanie skutecznej metody zapewniającej podczas pomiarów, utrzymanie wysokiej jakości pola magnetycznego precesji z jednoczesną precyzyjną kontrolą tego pola.

Przedstawiona do oceny praca doktorska mgr G. Wyszyńskiego napisana jest w języku angielskim i składa się z trzech obszernych zasadniczych części:

- I. nEDM experiment at PSI,
- II. Active magnetic shielding system,
- III. Magnetic field mapping.

Praca zaczyna się krótkim, streszczeniem, a kończy się dobrze opracowanym podsumowaniem i trzema appendixami. Praca zawarta jest na 157 stronach, wraz z obszernym i aktualnym spisem literatury (78), spisem rysunków (90) i spisem tabel (9).

Swoją rozprawę doktorską Pan mgr Grzegorz Wyszyński rozpoczyna od definicji elektrycznego momentu dipolowego neutronu i omówienia problemu antysymetrii baryonów i antybaryonów w kontekście łamania symetrii CP. Znaczenie pomiaru elektrycznego momentu dipolowego neutronu autor uzasadnia znakomicie wybranym cytatem z pracy Y. Nagashima (2010). Podkreśla również że, jedynym dotychczas znanym przypadkiem łamania symetrii CP jest rozpad neutralnych mezonów K, zaobserwowany w 1964 roku i potwierdzony w bezpośrednich eksperymentach KTeV i Na48 w 1999 roku.

Dalsza dyskusja koncentruje się na historycznym rozwoju bezpośrednich metod pomiarów elektrycznego momentu dipolowego neutronu. Sytuację rozwoju pomiarów oraz modeli i teorii znakomicie przedstawiono na rys. 1.1. Najnowsze pomiary elektrycznego momentu dipolowego neutronu bazują na oddziaływaniu ultra-zimnych neutronów (UCN) z polem elektrycznym i magnetycznym.

W drugim obszernym rozdziale pierwszej części dysertacji autor przedstawił ideę pomiaru elektrycznego momentu dipolowego neutronu w eksperymencie nEDM realizowanym z wykorzystaniem pulsacyjnego, spalacyjnego źródła ultra zimnych neutronów (UCN) z selekcją spinu, w Instytucie Paula Scherrera (PSI) w Szwajcarii. W pomiarach nEDM w PSI wykorzystuje się częściowo stanowisko pomiarowe zespołu RAL-Sussex-ILL z Instytutu Laue-Langevin w Grenoble, który uzyskał w 2007 roku najwyższy limit elektrycznego momentu dipolowego neutronu $d_n < 2.9 \times 10^{-26} \text{ e} \cdot \text{cm}$. Zarówno metoda pomiarów, jak i zastosowane elementy aparatury stanowiska pomiarowego zostały szczegółowo opisane i przedstawione na czytelnych schematach i rysunkach.

Niezwykle ważnym, wymagającym precyzyjnych badań są systematyczne efekty (Tabela 2,1) wpływające w zasadniczy sposób na ostateczną wartość elektrycznego momentu dipolowego neutronu. Autor omawia kolejno najważniejsze czynniki wpływające na efekty systematyczne. Szczególnie

zwraca uwagę na zaburzenia pola magnetycznego w czasie i przestrzeni pomiarowej. Utrzymanie stałego w czasie magnetycznego pola precesji polega na izolacji obszaru pomiarowego od zewnętrznych zaburzeń. W celu izolacji eksperymentu nEDM od zewnętrznych zaburzeń pola magnetycznego pochodzącego od innych urządzeń pracujących w pobliżu stosuje się dwa typy osłon magnetycznych: pasywne i aktywne. W eksperymencie nEDM w PSI zastosowano 4-warstwową osłonę pasywną wykonaną z μ metal o wysokim współczynniku podatności magnetycznej. Znalezienie optymalnej metody aktywnych osłon kompensujących magnetyczne zaburzenia zewnętrzne w czasie rzeczywistym oraz opracowanie metody kontroli aktywnego pola magnetycznego są zasadniczym celem dysertacji pana mgr Grzegorz Wyszyńskiego. W tym miejscu muszę stwierdzić, że tytuł pracy „Development of magnetic field control systems in the nEDM experiment „ jest adekwatny do przedstawionych badań i wyników jako niezwykle ważnych w powodzeniu eksperymentu nEDM w PSI. Pierwsze szczegółowe obliczenia czynników wpływających na zafałszowanie wyników EDM zostały wykonane w ramach eksperymentu nEDM przeprowadzonego przez grupę RAL-Sussex-ILL w Grenoble. Schematyczny rysunek systemu cewek i osłon magnetycznych wpływających na pole magnetyczne wewnątrz komory precesji oraz systemy monitorujące pole magnetyczne zostały jasno przedstawiony na rys. 2.5 . W celu badania wpływu osłon pola magnetycznego zarówno pasywnego jak i aktywnego wprowadzono tzw. „Shielding Factor” (SF) .

Obecnie wprowadzane są zmiany w eksperymencie nEDM w PSI, głównie poprzez zastosowanie podwójnej komory precesji oraz lepsze osłony magnetyczne i trzy typy atomowych magnetometrów pola magnetycznego. Schemat komory precesji i aparatury eksperymentu 2nEDM został przedstawiony na rys. 2.10 i 2.12.

W kolejnych rozdziałach części II autor szczegółowo przedstawia i analizuje wyniki obliczeń i symulacji dla czterech różnych aktywnych magnetycznych systemów kompensacyjnych w kontrolowanej przestrzeni eksperymentu nEDM. Są to następujące systemy:

1. SFC-surrounding field compensation system,
2. Merritt coil system,
3. Cellular coil system,
4. Spherical coils system.

Na system SFC składa się 6 prostokątnych cewek , zgrupowanych w 3 tzw. pary Hemholtza. System tzw. „Merritt coil system” składa się z 12-tu prostokątnych cewek. Następny z rozważanych systemów kompensacji pola magnetycznego składa się z dużej liczby małych prostokątnych cewek umieszczonych na powierzchni kontrolowanej objętości z czujnikiem pola magnetycznego wewnątrz każdej z nich. Czwarty z badanych systemów składa się z 8 lub 15 sferycznych cewek i bazuje na opisie rozkładu pola magnetycznego przy użyciu wektorowych harmonik sferycznych (VHS) . System SFC jest konfiguracją

stosowaną obecnie w eksperymencie nEDM w PSI i jego możliwości są testowane przez obliczenia symulacyjne.

Systemy „Merritt” i „Cellular” są obecnie budowane i intensywnie testowane z wykorzystaniem obliczeń symulacyjnych przeprowadzonych w ramach recenzowanej pracy. System sferycznych cewek jest jedynie w fazie symulacji i mimo dobrych wyników, może być bardzo trudny w praktycznym zastosowaniu.

Wszystkie obliczenia symulacyjne zostały przeprowadzone z wykorzystaniem zaadoptowanych algorytmów Biblioteki Naukowej GNU z 2012 roku. Tego typu obliczenia są zawansowane teoretycznie a symulacje bardzo skomplikowane, wymagające dużych pamięci rzędu 5 GB oraz długich ponad miesięcznych czasów CPU. Aby przyspieszyć obliczenia kody obliczeniowe zostały zaimplementowane na systemie GPU złożonym z 3 kart nVIDIA TESLA C2050.

W celu porównania wydajności wszystkich systemów cewek kompensacyjnych opracowano metodę pomiaru pola magnetycznego przy pomocy logicznych idealnych magnetometrów zlokalizowanych w przypadkowej pozycji (x,y,z) względem centrum systemu cewek korekcyjnych w objętości sześcianu o boku 2m. W celu przedstawienia wyników wydajności kompensacji różnych systemów cewek na odpowiednich rysunkach wprowadzono względną różnicę $\Delta(x,y,z)$ między zaburzeniem pola $\vec{B}_{per}$ i korekcją pola $\vec{B}_{cor}$ generowaną przez badany system kompensacji: $\Delta = |\vec{B}_{per} - \vec{B}_{cor}| / |\vec{B}_{per}|$. W celu ujednolicenia porównań uwzględniono wszystkie możliwe orientacje i pozycje dla określonych odległości. Współczynnik osłony Δ jest średnią wartością z 100 przypadkowych pozycji i 100 różnych orientacji.

Obecnie stosowany system osłony magnetycznej w eksperymencie nEDM w PSI przedstawiono na fotografii (rys. 4.1). Dodatkowo trzema kolorami zaznaczono trzy pary prostokątnych cewek aktywnego systemu SFC, a rozmiary cewek zestawiono w Tabeli 4.1. Każda z cewek posiada niezależne zasilanie, zapewniając 6 stopni swobody systemu kompensacyjnego.

W tym miejscu autor przeprowadza dość skomplikowaną dyskusję teoretyczną dla ogólnego przypadku cewek korekcyjnych. Widać, że monitorowanie i kompensacja dynamiczna zmiennego pola zaburzeń magnetycznych jest zadaniem niezwykle skomplikowanym nie tylko w symulacjach, a także w rzeczywistych rozwiązaniach technicznych. W cewkach korekcyjnych generowane jest pole magnetyczne poprzez prąd, jako odpowiedź na pomiar przez wiele czujników, zmieniającego się pola zaburzającego. Prowadzi to do utworzenia układu liniowych równań ($\vec{B} = G \cdot \vec{I}$) odpowiednio wiążących pole korekcyjne $\vec{B}$ z zmierzonymi elementami pola zaburzającego G generującego prądy cewek korekcyjnych $\vec{I}$. W ogólności taki układ równań nie posiada jednoznacznego rozwiązania, ale Autor przeprowadza szczegółowe rozumowanie powołując się na oryginalne prace Goluba i Khana (1965) oraz

Thikhonova (1963) prowadzące do rozwiązania równoważnego problemu zastępczego. Autor wykazał się w tej części pracy głęboką znajomością omawianego zagadnienia.

Wyniki symulacji w metodzie korekcyjnej SFC przedstawiono na mapach (rys.4.2) rozkładu współczynnika Δ dla źródła zaburzającego pole magnetyczne w odległości 20 m i 200 m z przypadkowego kierunku. Współczynnik ten w centralnej części nie jest mniejszy niż 10^{-2} , a obszar ten wzrasta ze wzrostem odległości źródła magnetycznego pola zaburzającego. Następny problem to zdolność na zmiany pola zaburzającego w funkcji czasu. Wprowadzono tzw. czynnik „Allan standard deviation” (4.9), poprzez który definiuje się dynamiczny współczynnik ekranowania DSF jako stosunek standardowego odchylenia Allana dla pola bez kompensacji i dla pola po kompensacji. Czynnik DSF jest oczywiście funkcją całkowania w określonym przedziale czasu.

Kolejno mgr Grzegorz Wyszyński omawia wyniki symulacji dla systemu Merritt złożonego z 12 aktywnych prostokątnych cewek korekcyjnych ułożonych w 3 systemy, każdy po 4 równoległe cewki. Mapy symulacji średniego współczynnika osłony Δ wskazują, że jest on wyraźnie mniejszy niż 10^{-2} . System ten jest intensywnie badany w Institute for Particle Physics, ETH Zurich na prototypowym modelu przedstawionym wraz z widocznym systemem cewek na fotografii (rys. 4.8). Rozmiary prototypu 12-tu cewek systemu typu Merritt przedstawiono w Tabeli 4.2, a orientację i pozycję magnetometrów typu 3D zestawiono w Tabeli 4.3. Wykonano testy kalibracyjne i cały szereg interesujących pomiarów, których wyniki przedstawiono na licznych wykresach i schematach.

Następnym badanym układem korekcyjnym jest system „Cellular” złożony z większej liczby kwadratowych cewek zlokalizowanych na powierzchni kontrolowanego obszaru. Autor poddał analizie dwa układy złożone z 6 x 9 cewek i 6 x 64 cewek oraz odpowiednio 54 i 384 czujników pola ze zwrotnym sprzężeniem, umieszczonych w środku każdej z cewek. Poddano analizie trzy możliwości sprzężeń zwrotnych: lokalne skalarne sprzężenie, jedno wymiarowe globalne skalarne sprzężenie i trój wymiarowe globalne sprzężenie. Symulowane mapy średnich współczynników osłony Δ zostały porównane i przedstawiono na rys. 4.25-4.28.

Wiele miejsca i wysiłku poświęcił Autor tzw. systemowi sferycznych cewek, wykonując zawansowane teoretycznie obliczenia analityczne i symulacje w cel matematycznej dedukcji optymalnych kształtów i powierzchni cewek korekcyjnych. Metoda ta oparta jest na opisie pola magnetycznego przy pomocy wektorowych harmonik sferycznych. Mapy średnich współczynników osłony Δ dla sferycznych systemów kompensacyjnych pole magnetyczne zastawiono na rys. 4.43 dla 8 sferycznych cewek i 15 sferycznych cewek przy zaburzeniu pola z przypadkowych kierunków i w odległości 20m i 200m od środka systemu. Widać wyraźnie, że system sferycznych cewek ma najwyższą z badanych systemów wydajność osłony magnetycznej Δ , równą około 10^{-3} . Badania

systemów kompensacji pola magnetycznego zostały podsumowane w oddzielnym, ostatnim rozdziale części II pracy doktorskiej. Autor jeszcze raz podkreśla znakomitą wydajność systemu sferycznych cewek i optymalne możliwości w wielu przyszłych zastosowaniach aktywnych osłon magnetycznych.

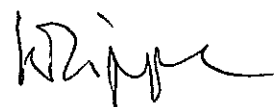
Trzecia zasadnicza część pracy doktorskiej mgr Grzegorza Wyszyńskiego poświęcona jest drugiemu głównemu celowi i dotyczy analizy map pola magnetycznego przeprowadzonej przy pomocy specjalnego robota tzw. „mapper’a” wyposażonego w magnetometr umożliwiający pomiar wektorowego pola magnetycznego. W eksperymencie nEDM w PSI poza systemem osłon magnetycznych zastosowano dodatkowo 33 cewki w celu zredukowania ewentualnego gradientu pola magnetycznego w komorze precesji. Urządzenie do badania niedoskonałości pola magnetycznego zostało zaprojektowane i zbudowane w warsztatach Laboratorium Fizyki Ciała Stałego w CAEN. Urządzenie to, zainstalowane wewnątrz próżniowej komory jest pokazane na rys. 6.1 i pozwala na użycie magnetometru do pomiaru strumienia pola magnetycznego oraz magnetometru cezowego do pomiaru wektorowego pola magnetycznego. Konstrukcja „mapper’a” pozwala na precyzyjny pomiar pola magnetycznego i określenie przestrzennej pozycji pomiaru. W Appendixie A omówiono transformację wyników tzw. „mapper’a” do układu Kartezjańskiego, niezbędnych przy obliczeniach systematycznych efektów pochodzących od niedoskonałości pola magnetycznego i obliczeniach symulacyjnych.

Cała rozprawa napisana jest bardzo starannie, zrozumiałym językiem z małą ilością naleciałości żargonowych. Czasami interpretacja pewnych wyników i zamierzeń Autora jest zbyt uboga i wymaga zwiększonego wysiłku w zrozumieniu wielu niuansów np. rozdział 6.10 części III pracy, związanych z optymalizacją prądów cewek na podstawie wyników z „field mapping”. Proszę o krótkie wyjaśnienie tego kluczowego zagadnienia. Brak także dyskusji związanej z błędami pomiarów i symulacji. Układ pracy jest bardzo dobry, a rysunki, wykresy i tabele są czytelne, bardzo staranne i dobrze przemyślane. Nie wymieniam drobnych usterek, które znalazłem w pracy, gdyż nie mają one wpływu na moją bardzo wysoką ocenę pracy.

Praca jest bardzo obszerna i rozwiązuje kompleksowo, na wysokim poziomie zaawansowania, wiele niezwykle ważnych zagadnień teoretycznych i eksperymentalnych związanych z dynamicznymi osłonami magnetycznymi. Autor korzysta z zaawansowanych modeli i rozważań teoretycznych oraz pracochłonnych symulacji. Zdaję sobie sprawę z udziału Pana mgr Grzegorza Wyszyńskiego w dużym zespole i chciałbym dowiedzieć się jak wielki jest wkład doktoranta w rozwiązanie zasadniczych celów przedstawionych w recenzowanej, znakomitej dysertacji. Pewnie Autor przez skromność swego udziału w badaniach nie podkreślał.

Stwierdzam z pełnym przekonaniem, że recenzowana rozprawa spełnia ustawowe wymagania stawiane pracom doktorskim w Polsce i wnoszę do Rady Wydziału Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie o dopuszczenie Pana mgr Grzegorza Wszyńskiego do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia naukowego doktora nauk fizycznych.

Ponadto stawiam wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pana mgr Grzegorza Wszyńskiego za nowatorskie, szczegółowe opracowanie metod dynamicznego ekranowania i monitorowania pola magnetycznego w eksperymencie nEDM w PSI.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'K. Zieliński' or similar, written in a cursive style.