

Toruń, 15.07.2024

**Recenzja rozprawy doktorskiej pana Mikhaila Padniuka
pt. „Wide-frequency-range atomic comagnetometry for
long-term continuous observations of exotic spin couplings”**

W dniu 22 maja 2024 r. przedłożono mi do recenzji rozprawę doktorską pana Mikhaila Padniuka pt. „Wide-frequency-range atomic comagnetometry for long-term continuous observations of exotic spin couplings”. Głównym celem pracy jest rozwój metodologii i technologii optycznej komagnetometrii. Ośrodkiem aktywnym jest mieszanina dwóch gazów, atomów rubidu i atomów gazu szlachetnego z niezerowym spinem jądrowym (w niniejszej pracy ^3He). Optyczne wzbudzenie (optyczne polaryzowanie ośrodka) jest realizowane na przejściu w atomach rubidu, po czym na skutek oddziaływania między spinem elektronowym w atomach rubidu a spinem jądrowym helu polaryzacja przenoszona jest na atomy helu (niesamowite jest w tym podejściu jest to, że hel jest polaryzowany zderzeniowo bez konieczności bezpośredniego oddziaływania atomów helu ze światłem lasera). Praca ta nie koncentruje się na samej magnetometrii jako takiej tylko na wykorzystaniu tych technologii do poszukiwania egzotycznych oddziaływań spinu elektronowego/jądrowego z nowymi hipotetycznymi formami materii nie mieszczącymi się w obecnym modelu standardowym. W szczególności praca ta skupia się na sprzężeniach tego typu, które są zmienne w czasie. Scharakteryzowanie czułości tak skonstruowanego urządzenia na tego typu egzotyczne efekty wymagało od pana Mikhaila Padniuka nie tylko głębokiego zrozumienia fizyki atomowej (na której zasada się funkcjonowanie optycznych magnetometrów) i wykorzystania jej do odpowiedniego modelowania dynamiki badanego układu ale też bardziej ogólnego odniesienia teoretycznego obejmującego opis hipotetycznych rozszerzeń modelu standardowego.

Rozprawa składa się z siedmiu rozdziałów. Otwiera ją krótki wstęp (rozdział 1) oraz obszerne wprowadzenie teoretyczne (rozdział 2). W rozdziale 3 omówiono budowę magnetometru od strony technicznej i eksperymentalnej (zarówno układ w laboratorium w Krakowie jak i w partnerskiej grupie w Moguncji). Kolejne rozdziały, 4 i 5, poświęcone są szczegółowej charakteryzacji, optymalizacji i kalibracji magnetometrów. W rozdziale 6, wyznaczono czułość magnetometrów na hipotetyczne sprzężenia spinowe. Rozprawę kończy rozdział 7 przedstawiający podsumowanie pracy i perspektywy.

Silną stroną rozprawy jest już pierwszy rozdział w którym autor omawia szeroki kontekst fizyczny prowadzonych przez niego prac. Pozytywnie oceniam to, że nie ograniczył się tylko do rozszerzeń modelu standardowego bezpośrednio związanych z tą pracą, ale w sposób ogólny zarysował obecny stan wiedzy, wymienił trudności związane z modelem standardowym oraz wskazał te które motywują rozszerzenia modelu standardowego związane z jego badaniami. W kolejnych częściach tej dyskusji wprowadził przykłady możliwych rozszerzeń modelu standardowego, które potencjalnie mogą wpływać na dynamikę spinową badaną przy użyciu optycznych magnetometrów (wprowadził hipotetyczne pole aksjonowe i przedyskutował przykłady możliwych jego sprzężeń ze spinem elektronowym i jądrowym). Wstęp ten zakończony jest przeglądem hipotetycznych makroskopowych obiektów które mogą formować postulowane pola. W rozdziale 2 dyskusja teoretyczna koncentruje się na modelowaniu dynamiki atomów tworzących ośrodki aktywne



magnetometru. W celu opisanego dekoherencji w układzie użyto formalizmu macierzy gęstości, a do opisu samej ewolucji czasowej równania Liouvillea von Neumanna. Poza samym oddziaływaniem nadsubtelnym i oddziaływaniem spinów elektronowych i jądrowych w hamiltonianie wzięto też pod uwagę sprzężenia obu spinów z postulowanymi polami aksjonowymi. Najbardziej nietrywialną częścią opisu są efekty zderzeniowe – w opisie nie tylko uwzględniono relaksację zderzeniową (w tym też dyfuzję), ale też sprzężenie spinu elektronowego w rubidzie ze spinem jądrowym w ^3He . W rozdziale tym przeanalizowano dynamikę układu w sytuacji stałego, oscylującego oraz przejściowego efektywnego pola magnetycznego (które może mieć interpretację zarówno prawdziwego pola magnetycznego jak i egzotycznego sprzężenia z polami aksjonowymi). Rozdziały 1 i 2 pokazują nie tylko głębokie zrozumienie przez pana Mikhaïla Padniuka podstaw teoretycznych i umiejętność wykorzystania ich do modelowania badanego układu, ale też szeroką znajomość literatury zarówno bezpośrednio odnoszącą się do działania różnych typów magnetometrów optycznych jak i tę związaną z szerszym kontekstem fizycznym.

Rozdział 3 poświęcony jest opisowi układu eksperymentalnego. W mojej ocenie opis jest jasny a poziom jego szczegółowości odpowiedni dla rozprawy doktorskiej. Zaczyna się on od komórki z próbką atomową, wraz z układem kontroli temperatury i pola magnetycznego. Następnie przedstawiono szczegółowy opis układu laserowego wraz z układem detekcji i umiejscowieniem w całym układzie eksperymentalny. Rozdział zakończony jest opisem układu kalibracji pola magnetycznego. Silną stroną tej części jest to, że opisuje nie tylko układ w laboratorium w Krakowie, ale odnosi się też układu partnerskiej grupy w Moguncji.

Najważniejszą częścią rozprawy są rozdziały 4 i 5, które referują prace przeprowadzone przez pana Mikhaïla Padniuka w ramach jego doktoratu. Rozdziały te przedstawiają eksperymentalne testy magnetometru, dokładnie charakteryzują jego działanie w praktyce oraz przedstawiają metody kalibracji. Silną stroną tej części jest to, że autor stara się odnosić mierzone zależności eksperymentalne do przewidywań teoretycznych przedstawionych wcześniej w rozdziale 2. Np. na samym już początku (Fig. 4.1) autor przedstawia jakościową zgodność zmierzonej odpowiedzi układu (na pierwszej i drugiej harmonicznej) w funkcji pola magnetycznego z przewidywaniami teoretycznymi przedstawionymi w rozdziale 2 (Fig. 2.14). Innym przykładem jest zmierzony rezonans magnetyczno-optyczny (Fig. 4.6), którego kształt i położenie interpretowane są przy użyciu wyników teoretycznych z rozdziału 2.1.6.

Najważniejsze wyniki rozprawy, tj. czułość magnetometrów na hipotetyczne sprzężenia spinowe, przedstawiono w rozdziale 6. W części tej wykorzystano układ/metody opisane w rozdziałach 3-5 do pomiaru widma szumu pomiarowego, który w kolejnych częściach rozdziału 6 przetłumaczono na czułość krakowskiego magnetometru na potencjalne egzotyczne sprzężenia spinowe. Następnie scharakteryzowano charakter szumów i stabilność sygnału magnetometru (w tym wyznaczono wariancję Allana dla skal czasowych obejmujących 6 rzędów wielkości). W kontekście badania stabilności układu dużo radości sprawił mi opis wpływu dobowej aktywności ruchu tramwajów.

Rozprawę tę przeczytałem z dużym zainteresowaniem i sprawiło mi to dużo satysfakcji. Stopień zaawansowania opisu teoretycznego i metodologii eksperymentalnej jest imponujący. Praca skłania do wielu przemyśleń i refleksji w trakcie których nasuwał się szereg pytań i uwag dotyczących pracy. Autor w kolejnych rozdziałach już zamieścił odpowiedź na wiele z nich. Chciałbym jednak prosić doktoranta o odpowiedź lub ustosunkowanie się do kilku przykładowych pytań i uwag.

- Czy mogę prosić doktoranta o omówienie w trakcie obrony jakie jest jego zrozumienie pojęcia „axion” w porównaniu do cząstek które znamy z modelu standardowego? Co to znaczy, że „The thickness of the wall depends on the axion mass”? (str. 15 w doktoracie) Co to znaczy „ a_0 is a constant proportional to the spontaneous symmetry-breaking scale?” (ta sama strona) Co to znaczy „coherent emission of axions”? (str. 17)

- Co to jest H_0 ? (w opisie pod Eq. (2.10)) Nie jest dla mnie jasne dlaczego w Eq. (2.10) jest ρ_0 , ale H_g , a nie H_0 .

- W tabelach 2.1 i 2.2 zestawiono eksperymentalne wartości przekrojów na wymianę i relaksację spinu. Czy istnieją w literaturze obliczenia ab initio tych przekrojów?

- Pod Eq. (2.60) jest mowa o tym, że jednym z przyczynków do szerokości krzywej Lorentza jest poszerzenie Dopplera. Dlaczego poszerzenia Dopplera jest opisane krzywą Lorentza? (a nie Gaussa?)

- Czy dobrze rozumiem, że skala czasowa relaksacji polaryzacji ^3He to kilka godzin? Co jest głównym mechanizmem odpowiedzialnym za tę relaksację? Czy w innych atomach lub molekułach można uzyskać podobnie długie czasy? Czy np. można by spolaryzować zderzeniami spin-exchange z Rb molekułą orto H_2 ?

Praca doktorska obejmuje podstawy teoretyczne, opis układu eksperymentalnego oraz wiele oryginalnych wyników pomiarowych i ich analizę i interpretację. Objętość ponad 170 stron jest w mojej ocenie właściwym rozmiarem dla rozprawy doktorskiej z fizyki. Praca od strony językowej i formalnej została napisana poprawnie. Pozytywnie oceniam fakt, że rozprawa została napisana w języku angielskim co istotnie zwiększa liczbę odbiorców. Podpis osi wielu wykresów jest trudny do odczytania. Wysoko oceniam bardzo obszerny i właściwie dobrany zbiór odniesień do współczesnej literatury naukowej (to pokazuje, że pan Mikhail Padniuk posiada szerokie rozeznanie i wiedzę w dziedzinie którą się zajmuję).

Pozytywnie oceniam dwie niedawne pierwszoautorskie publikacje pana Mikhaila Padniuka - umiejętność samodzielnego napisania publikacji naukowej oraz przeprowadzenie jej przez proces recenzji to bardzo ważna kompetencja na tym etapie rozwoju naukowego. Pozytywnie oceniam szeroki kontekst przeprowadzonych prac. Wyniki te stanowią fragment dużo większego programu badawczego automatycznie lokując doktoranta w strukturze szerokiej współpracy międzynarodowej z najlepszymi grupami w tej dziedzinie na świecie. W mojej ocenie doktorat ten jest bardzo dobrym punktem wyjściowym dla pana Mikhaila Padniuka do dalszego rozwoju naukowego na międzynarodowym poziomie.

Konkluzja

Niniejsza recenzja jednoznacznie uzasadnia stwierdzenie, że przedłożona rozprawa doktorska pana Mikhaila Padniuka pt. „Wide-frequency-range atomic comagnetometry for long-term continuous observations of exotic spin couplings” **prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie nauk fizycznych oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.** Ogólna wiedza teoretyczna została zaprezentowana na wielu płaszczyznach, zarówno w odniesieniu do podstaw modelu standardowego jak i samej fizyki atomowej i opisu dynamiki atomów rubidu i helu. Pan Mikhail Padniuk wykazał się ogromną samodzielnością w prowadzeniu pomiarów i analizie danych eksperymentalnych (w szczególności w poprawnym interpretowaniu pomiarów bazując na wcześniejszych analizach teoretycznych). **Przedmiotem przedłożonej rozprawy jest oryginalne rozwiązanie kilku wyżej wymienionych problemów naukowych.** Rozprawa ta spełnia wszelkie wymagania odnośnie oryginalności i jakości badań stawiane rozprawom doktorskim. **Oceniam ją jednoznacznie pozytywnie i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.**

Signature Not Verified

Dokument podpisany przez Piotr Wcisło;
UMK w Toruniu

Data: 2024.07.20 23:53:17 CEST

dr hab. Piotr Wcisło, prof. UMK
Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej
Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu