

dr hab. Emilia Witkowska
Instytut Fizyki PAN
Oddział Fizyki Teoretycznej
Aleja Lotników 32/46
Warszawa

Warszawa, dn. 26 lipca 2024 roku

**Recenzja doktoratu Mikhaila Padniuka pt. „Wide-frequency-range atomic
comagnetometry to search for spin-dependent interactions beyond the standard model”**

Rozprawa Pana Mikhaila Padniuka dotyczy rozwoju i budowy zaawansowanego komagnetometru atomowego w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie. Bazuje ona na wynikach doktoranta otrzymanych w ramach współpracy globalnej sieci optycznych magnetometrów do poszukiwań fizyki egzotycznej GNOME. Celem GNOME jest ultraprecyzyjny pomiar zależnych od czasu sprzężeń spinowych hipotetycznie wytworzonych przez obiekty astronomiczne składające się z ciemnej (w szczególności aksjonowej) materii. Nie da się zaprzeczyć, że rozwój i udoskonalanie technik magnetometrii atomowej jest wartościowe samo w sobie, niezależnie od specyficznego zagadnienia. Tematyka doktoratu jest unikatowa w skali kraju i wpisuje się w główny nurt badań nad ultraprecyzyjną magnetometrią atomową rozwijaną w wiodących ośrodkach na świecie.

Rozprawa liczy 173 strony, składa się z 6 rozdziałów i podsumowania. Jest starannie napisana, czyta się ją długo, niemniej jednak względnie łatwo i przyjemnie. Ma duży walor pedagogiczny, stanowi doskonale wprowadzenie do teorii magnetometrów atomowych typu SERF oraz komagnetometrów. Ekspozuje bardzo istotne, a często pomijane niuanse związane z procesami depolaryzacji i relaksacji oraz innymi czynnikami mającymi wpływ na wydajność magnetometrów atomowych. Sposób omawiania stanu badań zdradza, że autor rozumie podstawy działania magnetometrów atomowych oraz ograniczenia ich wydajności.

Walorem pracy doktorskiej są wyniki prac autora dotyczące technicznych zagadnień spełniających wymagania zaawansowanej stacji GNOME do precyzyjnego pomiaru sprzężeń spinowych. W naiwnym podejściu, pomiarowi podlegają zmiany kąta polaryzacji wiązki próbkującej proporcjonalna do przyłożonego pola magnetycznego i polaryzacje. Głębsza analiza zagadnienia uwidacznia szereg procesów wpływających na zmianę kąta polaryzacji oraz relacji względem polaryzacji i polem magnetycznym. Dodatkowo, dostosowanie urządzenia do wymogów GNOME wymusza spełnienie specjalnych warunków technicznych umożliwiających rzetelne porównanie pomiarów pochodzących z różnych stacji. Powstaje więc szereg zasadniczych problemów – z jednej strony teoretycznych, rozwinięcia rygorystycznej teorii opisu odpowiedzi czujnika na magnetyczne i niemagnetyczne zaburzenia, z drugiej strony opracowania

technik eksperymentalnych pozwalających na optymalną i efektywną pracę sensora. W rozprawie autor przedstawia szereg ważnych rezultatów na ten temat.

W szczególności, autor prezentuje wyniki szeregu testów doświadczalnych wykonanych do optymalizacji zakresu parametrów pracy komagnetometru, które zapewnią stabilność jego działania (przykładowo optymalizacja częstości światła próbkującego). Pomiary te sprawdzają jednocześnie zakres przewidywania teorii opisującej działanie urządzenia (przykładowo na ile zmiana amplitudy sygnału pierwszej i drugiej harmonicznej względem amplitudy modulacji jest liniowa). Wyniki przeprowadzonych pomiarów potwierdzają słuszność teorii opisującej komagnetometr w rozważanym zakresie parametrów. Jednym z ważniejszych rezultatów zaprezentowanych w tej części jest technika oparta na pętli sprzężenia zwrotnego do śledzenia i stabilizacji punktu kompensacji z zależną od czasu polaryzacją gazu szlachetnego. Rozprawa zawiera obszerną analizę tej techniki pomiarowej opartej na pomiarze odpowiedzi komagnetometru na harmonicznie modulowane pole magnetyczne dla różnych poziomów odstrojenia od punktu kompensacji. Odpowiedź przecina punkt zero, gdy zewnętrzne pole kompensacyjne znosi efektywne pole generowane przez polaryzację gazu szlachetnego. Zmierzony punkt zerowy dostarcza przybliżoną wartość pola kompensacji będącą punktem odniesienia dla pętli sprzężenia zwrotnego do blokady układu w punkcie kompensacji. Autor dokonał uzupełniającej analizy teoretycznej tego efektu otrzymując zwarte wzory analityczne. Teoria, a w szczególności zastosowane przybliżenia, zostały pozytywnie zweryfikowane przez wyniki pomiarów eksperymentalnych wykonanych na krakowskim komagnetometrze, umożliwiając jego działanie w tzw. trybie samo-kompensacji.

Podobnie, szczegółowo przeanalizowane zostało zagadnienie kalibracji urządzenia. Standardowa metoda stosowana w magnetometrach atomowych została uznana za zbyt ograniczoną do zastosowań w systemie GNOME. Autor zaproponował alternatywną metodę kalibracji, opartą na pomiarze odpowiedzi komagnetometru na harmoniczne zaburzenia (magnetyczne lub rotacyjne) o różnych częstotliwościach. Otrzymany sygnał w domenie częstości jest następnie porównywany z przewidywaniami teoretycznymi, a parametry dopasowania służą do kalibracji urządzenia. Dodatkowo, zaproponowana metoda w pobliżu punktu kompensacji znacznie skraca czas potrzebny na wykonanie kalibracji. Metoda ta umożliwia pełną charakterystykę odpowiedzi układu na różne rodzaje zaburzeń, nie wpływając przy tym na stabilność urządzenia w dłuższym zakresie czasu jego działania.

Kolejne rezultaty dotyczą oceny czułości i stabilności krakowskiego komagnetometru. Autor prezentuje wyniki pomiarów przeprowadzonych w oknie czasowym wynoszącym dwadzieścia cztery godziny, z czego ostatnie dwieście pięćdziesiąt sekund wykorzystano do kalibracji urządzenia. Rozważane są różne źródła perturbacji, które prowadzą do zmiany amplitudy odpowiedzi urządzenia, a tym samym wpływają na jego czułość. W przypadku egzotycznych sprzężeń spinu analiza jest dość szczegółowa, pokazujące minimum dla częstości zaburzenia około 2 Hz, gdzie czułość urządzenia jest najlepsza. Autor zaznacza, że w ogólności

czułość krakowskiego komagnetometru jest o rząd wielkości niższa niż czułość innych standardowych urządzeń. Jednakże, w przypadku egzotycznego sprzężenia spinowego z protonem, czułość ta przewyższa o rząd wielkości średnią czułość sieci GNOME pierwszej generacji oraz typowy poziom czułości magnetometru SERF. Istotnym ograniczeniem działania krakowskiego komagnetometru oraz jego czułości, są wibracje budynku, w którym znajduje się układ eksperymentalny. Doświadczenia wykazują zmiany w poziomie szumów, które są skorelowane z rozkładem przejazdów tramwajów zatrzymujących się najbliżej układu eksperymentalnego.

Rezultaty zaprezentowane w rozprawie znacząco rozszerzają naszą wiedzę na temat ograniczeń i zalet komagnetometrów, oraz rozwój umiejętności i technik eksperymentalnych pozostających w krajowych zasobach. Autor systematycznie testuje poszczególne źródła ograniczeń i optymalizacji urządzenia. Zwłaszcza podoba mi się nowa metoda kalibracji, wynikająca z zaufania do opisu teoretycznego podpartego wynikami eksperymentalnymi.

Jeśli chodzi o stronę redakcyjną, można znaleźć pewne literówki. Niemniej jednak, takie drobne niedociągnięcia zdarzają się nawet w wysokiej jakości czasopismach po profesjonalnej korekcie, więc moim zdaniem nie warto przywiązywać do nich zbyt dużej wagi.

Poniżej chciałabym przedstawić nieco niejasności i nieścisłości w sformułowaniach:

-- Działanie komagnetometru GNOME w pewnej mierze opiera się na wynikach teoretycznych. Autor poświęca znaczną uwagę teoretycznemu opisowi stosując szereg przybliżeń, takich jak linearyzacja dość złożonych zależności. Choć takie podejście ułatwia analizę, rzeczywistość jest zazwyczaj bardziej skomplikowana. Czy zatem zaufanie do modeli teoretycznych może wprowadzić niechciany błąd w działaniu urządzenia?

-- Brakuje mi w tej rozprawie krótkiej dyskusji na temat aktualnego stanu wiedzy dotyczącego spodziewanego sygnału pochodzącego od ciemnej (egzotycznej) materii oraz przewidywań dotyczących tego, czy mieści się on w zakresie działania urządzenia. Nie zostało w sposób przekonujący wyjaśnione, dlaczego zakres działania urządzenia będzie odpowiedni do wykrycia egzotycznej materii.

-- Kwestia kalibracji i dopasowania w wysokich częstotliwościach, gdzie sygnał jest zdominowany przez szумы techniczne jest niejasna. Czy dopasowanie w tym zakresie częstotliwości wiąże się z dużym błędem, i jak bardzo ma to wpływ na kalibrację oraz prawidłowe działanie urządzenia?

-- Matematyczne pojęcie czułości (sensitivity) jest niewystarczająco sformułowane. Krótka dyskusja na temat tego, czym jest czułość i przykładowo, tego co dokładnie przedstawia oś pionowa na rysunku 6.2, byłaby pomocna dla potencjalnego czytelnika.

-- Odniesienie do wyników dotyczących optymalizacji lub czułości uzyskanych przez inne urządzenia GNOME byłoby użyteczne dla ogólnego zrozumienia i orientacji czytelnika w możliwościach obecnych komagnetometrów, pomogłoby również w interpretacji i docenieniu wyników uzyskanych z przeprowadzonych przez autora eksperymentów.

-- Brakuje mi również w rozprawie wyraźnego określenia, co stanowi oryginalny wkład autora. Za wyjątkiem jednej, cytowanej i umieszczonej w bibliografii pozycji, nie wiadomo z lektury rozprawy czy autor opublikował prezentowane wyniki w publikacjach naukowych oraz czy jest autorem jakichkolwiek innych prac naukowych. Nie jest również jasne z tekstu rozprawy, czy i które elementy konstrukcji komagnetometru są efektem prac autora.

Podsumowując stwierdzam, że niniejsza praca doktorska stanowi istotny wkład do rozwoju komagnetometru budowanego w Instytucie Fizyki UJ. Autor otrzymał szereg nietrywialnych oraz użytecznych wyników poszerzających zrozumienie i zakres działania komagnetometrów atomowych. Omawiane powyżej drobne usterki w niczym nie wpływają na moją wysoką ocenę tejże pracy doktorskiej. Z przyjemnością stwierdzam, że rozprawa spełnia wymogi ustawowe i zwyczajowe stawiane pracom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie mgr Mikhaila Padniuka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Emilia Wilewska