

dr hab. inż. Grzegorz Soboń, prof. uczelni
Politechnika Wrocławska
Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław
grzegorz.sobon@pwr.edu.pl

Wrocław, dn. 17.12.2025 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Jakuba Dobosza

zatytułowanej:

„Development of a toolbox for high-precision spectroscopy of ultracold molecules”

Recenzję wykonano na podstawie pisma Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne Uniwersytetu Warszawskiego, nr BRN-XII/531/90/2025, z dnia 17.10.2025.

1. Wprowadzenie

Badania nad spektroskopią zimnych atomów i molekuł stanowią dziś jeden z kluczowych kierunków rozwoju współczesnej fizyki, o fundamentalnym znaczeniu zarówno dla badań podstawowych, jak i zastosowań, np. w technologiach kwantowych. Tematyka ta jest intensywnie eksplorowana przez liczne grupy badawcze na świecie, co podkreśla jej aktualność i strategiczny charakter. Przedłożona do oceny praca doktorska poświęcona jest rozwojowi narzędzi eksperymentalnych umożliwiających badanie ultrazimnych atomów i cząsteczek. W tym kontekście, praca mgr. Jakuba Dobosza bardzo dobrze wpisuje się w bieżący nurt badań światowych, podejmując zagadnienia o wysokiej wartości poznawczej i aplikacyjnej. Praca została zrealizowana na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, pod opieką naukową prof. dr. hab. Pawła Kowalczyka oraz dr. Mariusza Semczuka.

2. Zawartość pracy

Praca liczy łącznie 161 stron i podzielona jest na 7 głównych rozdziałów merytorycznych. Struktura jest poprawna, logiczna i nie rozdrobniona. Zdecydowanie większy ciężar położony jest na część praktyczną niż wprowadzenie przedstawiające bieżący stan wiedzy. Bibliografia liczy 157 pozycji. W dużej mierze są to odnośniki do artykułów naukowych, zarówno relatywnie nowych (opublikowanych w ostatnich kilku latach), jak i prac stanowiących „klasykę gatunku” (z lat 70 ubiegłego wieku). Należy więc podkreślić, że autor przeprowadził bardzo dogłębną i szczegółową analizę źródeł i niewątpliwie ma duże rozeznanie w aktualnym stanie wiedzy.

Rozdział 1 stanowi bardzo krótki wstęp zawierający rys historyczny oraz motywację do podjęcia badań, a także przedstawienie zawartości kolejnych rozdziałów pracy.

Rozdział 2 zawiera przegląd metod chłodzenia i pułapkowania atomów. Znajdziemy opis chłodzenia Dopplerowskiego oraz pułapek magneto-optycznych.

Rozdział 3 zawiera opis i charakterystykę aparatury badawczej do chłodzenia i pułapkowania atomów, używanej przez autora, dostępnej w laboratoriach Uniwersytetu Warszawskiego. Część z aparatury została skonstruowana przez Autora.

W rozdziale 4 zawarto opis systemu laserowego zestawionego przez autora, który umożliwia precyzyjną spektroskopię atomów. System oparty jest na laserze tytanowo-szafirowym oraz optycznym grzebieniu częstotliwości. Szczególny nacisk położono na opis metod stabilizacji laserów oraz całej architektury oprogramowania, służącego do kontroli parametrów systemu (stworzonego przez autora).

Tematyka rozdziału 5 nieco odbiega od głównego nurtu pracy. Dotyczy transferu częstotliwości optycznej przez długi link światłowodowy. Opisano układ eksperymentalny oraz pomiar parametrów szumowych układu transmisji nośnej optycznej. Rozdział jest bardzo krótki i zawiera jedynie wyniki eksperymentu. Czytelnik nie ma okazji zapoznać się z szerszym kontekstem, wstępem teoretycznym, aktualnym stanem wiedzy, itd.

Rozdział 6 wieńczy część eksperymentalną pracy. Poświęcony jest pomiarowi przekroju czynnego fotojonizacji stanów wzbudzonych cezu i potasu przy użyciu światła laserowego o długości fali 328 nm.

Pracę kończy rozdział 7 stanowiący dość obszerne podsumowanie pracy, przeprowadzonych badań oraz dyskusję na temat potencjalnych przyszłych kierunków.

3. Wartość naukowa prezentowanych rezultatów

Przedstawiona do oceny praca ma charakter wyjątkowo doświadczałny. Autor w swoich badaniach koncentrował się na konstrukcji układów eksperymentalnych umożliwiających precyzyjne badania ultrazimnych atomów i cząsteczek, co sam określa mianem „skrzynki narzędziowej”. Po lekturze pracy wyłania się obraz autora jako wybitnego praktyka i konstruktora, ale o znakomitych podstawach teoretycznych. Na ogromne uznanie zasługują umiejętności konstrukcji układów elektronicznych i programowania. Ową „skrzynkę narzędziową” można podzielić na dwie części: związaną z kontrolą pól magnetycznych oraz poświęconą warstwie optycznej. Do oryginalnych osiągnięć autora w pierwszej części należy zaliczyć:

- opracowanie dwóch układów elektronicznych do kontroli pola magnetycznego zapewniających precyzyjne sterowanie i synchronizację sekwencji eksperymentalnych,
- uzyskanie wyłączenia prądu w głównych cewkach w czasie < 1 ms, co zapewnia szybki zanik pola i eliminuje problem pola resztkowego niezależnie od prądu początkowego,
- zaprojektowanie i zbudowanie dwukierunkowego źródła prądowego do precyzyjnej regulacji prądu w cewkach kompensacyjnych,

Wyżej wymienione osiągnięcia miały kluczowe znaczenie dla możliwości przeprowadzenia eksperymentów, m.in. badania wpływu pola magnetycznego na temperatury osiągane w chłodzeniu metodą *gray molasses cooling* (GMC).

W „warstwie optycznej” eksperymentu doktorant był odpowiedzialny za stworzenie systemu laserowego, którego zadaniem będzie dostarczanie światła odpowiedniego do potrzeb precyzyjnej spektroskopii ultrazimnych cząsteczek. Do najważniejszych osiągnięć należy zaliczyć:

- opracowanie w pełni zautomatyzowanego układu laserów odniesionego do grzebienia częstotliwości, zapewniającego bezwzględną stabilność wszystkich laserów w systemie,
- implementacja serwerowej architektury zapewniającej autonomiczne strojenie częstotliwości laserów, ich stabilizację, detekcję odchyłek od nastawy oraz wykonywanie korekt. Zaproponowana architektura jest skalowalna i przenaszalna na inne lasery, co czyni ten system wyjątkowo interesującym również dla innych grup badawczych,
- stabilizacja częstotliwości grzebienia i uzyskanie odchylenia Allana na poziomie sub-mHz (dla 1 s uśredniania), co przełożyło się na wysoką stabilność laserów dowiązanych do grzebienia i precyzyjne wyznaczanie częstotliwości,
- rozwój układu do obserwacji zdudnienia, m.in. automatyzacja obrotu siatki dyfrakcyjnej, co daje możliwość uzyskania szerokiej przestrajalności lasera w zakresie widma grzebienia

W ostatnim rozdziale autor przedstawia badania fotojonizacji stanów wzbudzonych cezu oraz potasu-39 wywołanej promieniowaniem UV o długości fali 328 nm. Wyniki są o tyle istotne, że stanowią krok stronę wytwarzania silnie polarnych cząsteczek CsAg oraz KAg. Jest to póki co obszar jeszcze niezbadany przez grupy eksperymentalne.

Niejako „przy okazji” autor również pracował przy projekcie poświęconym transferowi nośnej optycznej na długie odległości. W pracy doktorant przedstawił opracowany przez siebie system do odzyskiwania optycznej fali nośnej (stabilizowanej do optycznego zegara atomowego) po transmisji na odległość aż 650 km. Przeprowadzony pomiar odchylenia Allana zdudnienia częstotliwości między terminalem lokalnym a zdalnym wskazał, że w domenie optycznej można spodziewać się wartości rzędu $8 \cdot 10^{-17}$ dla 10 s uśredniania oraz $2,5 \cdot 10^{-19}$ dla 1000 s uśredniania. Jest to wynik porównywalny z osiągnięciami literaturowymi. Doświadczenie to jest istotne dla metrologii optycznej, jak i dla badań fundamentalnych (np. porównywanie optycznych zegarów atomowych). Ma znaczenie praktyczne dla Polski, np. w kontekście rozwoju sieci NLPQT (Narodowego Laboratorium Fotoniki i Technologii Kwantowych) łączącej kilka uczelni i instytutów światłowodami w celu transmisji sygnału nośnego odniesionego do zegara optyczno-atomowego.

Praca pozostawia pewien niedosyt związany z faktem, iż nie zaprezentowano żadnych konkretnych wyników eksperymentu spektroskopowego z ultrazimnymi cząsteczkami Cs₂. A to należałoby uznać za jednoznaczny cel rozprawy doktorskiej. W obecnym kształcie praca kończy się na przygotowaniu układu pomiarowego.

Na dorobek naukowy Autora składają się dwie prace w czasopismach z Listy Filadelfijskiej: [1] M. Bocheński, J. Dobosz, M. Semczuk, “Magnetic trapping of an ultracold 39K-40K mixture with a versatile potassium laser system”, Opt. Express 32, 48463-48478 (2024). [2] J. Dobosz, M. Bocheński, M. Semczuk, “Bidirectional, Analog Current Source Benchmarked with Gray Molasses-Assisted Stray Magnetic Field Compensation”, Appl. Sci. 11, 10474 (2021).

W artykule [1] doktorant jest drugim autorem, co sugeruje, że nie pełnił w tej pracy roli wiodącej. Artykuł ten nie zawiera także bezpośrednio wyników pomiarów znajdujących się w pracy doktorskiej. Dorobek publikacyjny zatem należy uznać za wystarczający (spełniający wymagania ustawowe).

4. Uwagi i pytania do pracy

Podczas lektury pracy narodziły się następujące pytania i uwagi merytoryczne:

1. W całej pracy, a w szczególności w rozdziale 3, zawarto sporo wyników pomiarów wykonanych przez inne osoby z zespołu, w którym pracował doktorant. Na początku rozdziału znajduje się informacja na temat wkładu poszczególnych osób w te badania. Niemniej jednak, umieszczanie tak dużej liczby cudzych wyników w pracy doktorskiej jest dyskusyjne, gdyż niekoniecznie mają one duże znaczenie dla ocenianej pracy, Mowa tu np. o pomiarach wartości rezystancji czy indukcyjności w tabelach 3.1 i 3.2, czy o opisie części układu związanej z obrazowaniem (strony 51-56). W dalszej części pracy autor nie wykorzystuje technik obrazowania, a ta część nie była skonstruowana przez niego.
2. Czytanie pracy i jej zrozumienie byłoby dużo łatwiejsze, gdyby autor umieścił w pracy schemat (całościowy) eksperymentu: ukazujący wszystkie lasery, modulatory, pułapki, itd. W pracy brak jest takiego schematu. Autor raczej skupia się na fragmentach – brak jest całościowego obrazu. Rozdział zatytułowany „K-Cs apparatus” byłby zdecydowanie prostszy do czytania, gdyby znalazł się tam schemat tej aparatury.
3. W rozdziale 3, na Rys. 3.2 przedstawiona jest fotografia układu cewek. Na zdjęciu umieszczone są strzałki oznaczające elementy (wraz z numeracją). Numeracja ta nie jest wyjaśniona w tekście ani w podpisie rysunku, nie wiadomo więc, co jest czym na zdjęciu.

4. Autor w swoich badaniach używał bardzo wielu laserów (CW, przestrajalnych, grzebienia częstotliwości), jednak w pracy nie znajdziemy żadnego rysunku przedstawiającego widmo optyczne. W przeprowadzanych eksperymentach (np. w zilustrowanym na Rys. 4.8) wykorzystywana jest filtracja spektralna z użyciem elementów dyfrakcyjnych (aby uzyskać zdudnienie grzebienia z laserem CW). Bardzo pomocne dla oceny poprawności wykonania eksperymentów byłoby pokazanie jak wyglądały widma optyczne.
5. W pracy szczegółowo opisano parametry używanych laserów (dla lasera tytanowo-szafirowego nawet przedstawiono charakterystykę mocy wyjściowej vs. moc pompującą), natomiast nie podano zupełnie żadnego parametru optycznego grzebienia częstotliwości. Jedynie przewija się „mimoходом” wartość częstotliwości repetycji 110 MHz. Co z pozostałymi parametrami ważnymi w kontekście eksperymentu?
6. Z rys. 4.7 wynika, że odchylenie Allana (ADEV) grzebienia stabilizowanego jest wyższe niż niestabilizowanego. Czy to prawidłowe rozumowanie? Czy to jest normalne zachowanie stabilizowanego grzebienia częstotliwości? Dla porównania, np. na rysunku 5.5 ADEV dla lasera stabilizowanego jest niższe niż dla niestabilizowanego.
7. Czy lasery użyte w eksperymencie z rys. 6.3 (1120 nm i 1584 nm) są stabilizowane? Czy wykorzystano do tego całą infrastrukturę rozwiniętą przez autora i opisaną w rozdziale 4?
8. Do kontroli częstotliwości repetycji grzebienia poprzez aktuator PZT użyto wzmacniacza wysokonapięciowego PDU150 firmy PiezoDrive. Prosiłbym o komentarz dlaczego użyto akurat tego układu, czy posiada on wystarczająco niskie szumy i wysokie pasmo, aby zapewnić stabilizację grzebienia?

Pracy niestety nie czyta się lekko i swobodnie. Zawiera dużo uproszczeń i „żargonu”, nieostrożnego dla dysertacji naukowej. Trudność w ocenie sprawia również szczegółowe opisywanie fragmentów układu, za które autor nie był bezpośrednio odpowiedzialny (zostały wykonane przez kogoś innego). Niemniej jednak, należy zwrócić uwagę na fakt, iż praca jest przygotowana wyjątkowo starannie pod względem edytorskim i graficznym. Na szczególne uznanie zasługuje jakość i czytelność rysunków, brak większych błędów redakcyjnych czy typograficznych. Mimo usilnych starań, znalazłem jedynie kilka drobnych błędów w całej pracy, np.:

1. Strona 47, podrozdział „Offset locking of Cs lasers”: powtórzenie “(...) which serves which serves (...)”
2. Strona 75: rysunek 4.2 przedstawiający schemat lasera tytanowo-szafirowego (oraz jego charakterystykę mocową) znajduje się w rozdziale 4.1 poświęconym wariacji Allana.

5. Podsumowanie

Podsumowując, praca mgr. Jakuba Dobosza przedstawia oryginalne wyniki naukowe, wnoszące nową wiedzę do dyscypliny Nauki Fizyczne. Istotny wkład autora zawiera się w obszarze konstrukcji układów eksperymentalnych dla potrzeb precyzyjnej spektroskopii ultrazimnych cząsteczek. Oprócz tego, przedstawiono kilka oryginalnych wyników pomiarowych (transmisja nośnej optycznej oraz badania fotojonizacji cezu oraz potasu). Badania zostały zrealizowane rzetelnie, a praca pozbawiona jest błędów merytorycznych czy większych uchybień. Moja ogólna ocena przedstawionej do recenzji pracy jest **pozytywna**. Rozprawa doktorska niewątpliwie prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie Nauki Fizyczne, oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. W mojej opinii, praca spełnia zwyczajowe oraz ustawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim, może być zatem podstawą do ubiegania się o stopień doktora. W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie autora do kolejnych etapów przewodu doktorskiego.

Grzegorz Dobos 4