



dr hab. inż. Przemysław Głowacki

adiunkt, kierownik zakładu Z1, e-mail: przemyslaw.glowacki@put.poznan.pl

Web of Science: [ResearcherID F-1511-2013](#), ORCID: [0000-0003-0899-9106](#)

Z1 - ZAKŁAD INŻYNIERII I METROLOGII KWANTOWEJ,

INSTYTUT BADAŃ MATERIAŁOWYCH I INŻYNIERII KWANTOWEJ,

WYDZIAŁ INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ I FIZYKI TECHNICZNEJ

ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, phone: +48 (61) 665 3200, e-mail: office_dtpf@put.poznan.pl

www.phys.put.poznan.pl

dr hab. inż. Przemysław Głowacki

Instytut Badań Materiałowych i Inżynierii Kwantowej

Wydział Inżynierii Materiałowej i Fizyki Technicznej

Politechnika Poznańska

ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań

e-mail: przemyslaw.glowacki@put.poznan.pl, tel. +48 61 665 3222

Poznań 2.I.2026 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Jakuba Dobosza

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

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska Pana mgr. Jakuba Dobosza została zrealizowana w Laboratorium Spektroskopii Molekularnej i Ultrazimnych Częsteczek (QGL) Zakładu Optyki Instytutu Fizyki Doświadczalnej na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego pod opieką naukową prof. dr. hab. Pawła Kowalczyka, przy wsparciu dr. Mariusza Semczuka – promotora pomocniczego w przewodzie doktorskim Kandydata.

Rozprawa, przygotowana w języku angielskim, składa się z siedmiu rozdziałów oraz trzech dodatków oznaczonych literami od A do C. Rozpoczyna ją krótki wstęp (rozdział 1), a następnie rozdział drugi wprowadzający podstawowe informacje związane z technikami chłodzenia laserowego i pułapkowania swobodnych atomów, stanowiące podstawę badań i rozbudowy niezwykle skomplikowanego układu eksperymentalnego do precyzyjnych pomiarów ultrazimnych atomów i cząstek, przedstawionych w niniejszej pracy.

Główną część rozprawy stanowią rozdziały od 3 do 6. W rozdziale 3 zaprezentowano konstrukcję unikatowej aparatury do pułapkowania i chłodzenia atomów potasu i cezu (w skrócie nazywanej *K-Cs apparatus*) oraz wkład autora w jej rozwój. W rozdziale 4 przedstawiono system laserowy do precyzyjnej spektroskopii, który stanowi laser tytanowo-szafirowy stabilizowany do grzebienia częstotliwości optycznych, z możliwością automatycznego przestrajania w szerokim zakresie częstotliwości. W rozdziale 5 opisano dalekozasięgowy transfer częstotliwości optycznych z tłumieniem szumów resztkowych. Natomiast w rozdziale 6 przedstawiono najnowsze wyniki pomiarów przekroju czynnego fotojonizacji stanów wzbudzonych cezu i potasu za pomocą światła laserowego o długości fali 328 nm. Rozprawę kończy rozdział 7, w którym zaprezentowano wnioski końcowe i perspektywy.

Rozdziały od 3 do 6 prezentują w jasny i klarowny sposób proces opracowania zestawu narzędzi do precyzyjnej spektroskopii ultrazimnych cząsteczek zrealizowany przez Pana mgr. Jakuba Dobosza. W pracy zaznaczono, że układ eksperymentalny ma docelowo służyć do produkcji i badań właściwości ultrazimnych dimerów KAg oraz CsAg, jednakże w obecnej fazie rozbudowy układu skupiono się na automatyzacji i otrzymywaniu zimnych atomów K i Cs oraz zmierzono i przeanalizowano przekroje czynne fotojonizacji stanów wzbudzonych obu pierwiastków. Bardzo pozytywnie oceniam rzetelność Autora w sporządzeniu drobiazgowego wykazu prac wykonanych przez niego osobiście oraz prac wykonanych przez pozostałych członków grupy badawczej.

W rozdziale 3 opisano układ eksperymentalny aparatury K-Cs ze szczególnym uwzględnieniem wybranych tych elementów, za których wdrożenie odpowiedzialny był Autor rozprawy. Przedstawiono między innymi kontrolę i procedurę szybkiego (submilisekundowego) wyłączania pól magnetycznych, synchronizację offsetu laserów z różnicą częstotliwości około 9 GHz (na potrzeby atomów Cs), układ detekcji fluorescencji czy zwiększenie szybkości ładowania pułapki atomami poprzez desorpcję atomową indukowaną światłem (ang. *light-induced atomic desorption* – LIAD). Bardzo spodobał mi się detaliczny sposób przedstawienia zasad działania oraz schematy i parametry każdego ze zbudowanych układów. Autor oszacował teoretyczne parametry układów oraz zmierzył je bezpośrednio i przedstawił graficznie efekt ich działania. Mam tutaj na myśli np. kontrolę pól magnetycznych (cewki MOT i rezonansów Feshbacha) i odpowiednio rysunek 3.4 oraz tabelę 3.3. Podobnym przykładem jest system optycznej pętli synchronizacji fazowej laserów dedykowanych do atomów Cs i graficzna prezentacja działania układu na rysunku 3.7.

Rozdział 4 przedstawia wkład Autora rozprawy w budowę autonomicznego i w pełni zautomatyzowanego układu lasera tytanowo-szafirowego o pracy ciągłej, który generuje światło o pożądanej częstotliwości (z odpowiednią szerokością linii) w odniesieniu do grzebienia częstotliwości optycznej w czasie rzeczywistym. W tym celu zastosowano między innymi interfejs programowania aplikacji (API) oparty na protokole HTTP, co stanowi ciekawe rozwiązanie ze względu na elastyczność pod względem skalowania i modułowości tworzenia system kontroli i akwizycji danych w skomplikowanych układach eksperymentalnych. Wykorzystując miernik długości fali oraz grzebień optyczny wraz z odpowiednim hardwarem (ICE-BLOC, AOM, DDS, komparator fazy MLT, system LaseLock TEM Messtechnik oraz STEMLab Red Pitaya i wiele innych) i wspomnianym oprogramowaniem zgodnym z protokołem HTTP, Autor uzyskał system do generacji promieniowania laserowego o żądanej częstotliwości, który automatycznie stabilizuje się do grzebienia częstotliwości. Na szczególne uznanie zasługuje system do selekcji spektrum grzebienia optycznego, zaprojektowany i zbudowany przez Autora pracy, oparty na siatce dyfrakcyjnej umieszczonej na dedykowanym uchwycie (bazującym na obrotowym uchwycie ELL14 firmy Thorlabs) z możliwością automatycznej rotacji kontrolowanej sterownikiem ESP8266. Pozwala to w praktyce skutecznie zwiększyć stosunek sygnału do szumu (SNR) zdudnienia badanego lasera z grzebieniem częstotliwości. Jest to istotny element zwłaszcza w eksperymentach, które wymagają wykorzystania stabilnego lasera w szerokim zakresie długości fal. Przeprowadzone testy (wyniki prezentowane między innymi na rysunku 4.17) potwierdziły, że system jest gotowy do precyzyjnych, najnowocześniejszych pomiarów spektroskopowych.

Tematyka poruszana w rozdziale 5 na pierwszy rzut oka wydaje się być nieco odległa od głównego wątku pracy. Autor przedstawia tutaj zagadnienia związane z dalekozasięgowym (rzędu kilkuset km) transferem częstotliwości optycznych z tłumieniem szumów resztkowych. Jednak celem prowadzenia ultraprecyzyjnych pomiarów w macierzystym laboratorium należy mieć możliwość odniesienia się do najdokładniejszych, absolutnych wzorców czasu, jakim są obecnie optyczne zegary atomowe. Dlatego opanowanie techniki bezszumowego transferu częstotliwości optycznego zegara atomowego wydaje się być konieczne dla przyszłych badań nad ultrazimnymi cząsteczkami KAg i CsAg.

Istotnym wynikiem z punktu widzenia dyscypliny *nauki fizyczne* są prezentowane w rozdziale 6 wyznaczone teoretycznie i eksperymentalnie wartości przekroju czynnego fotojonizacji stanów $P_{3/2}$ dla atomów cezu i potasu, wywołanej światłem laserowym o długości fali 328 nm, dedykowanym do otrzymywania spułapkowanych atomów srebra w pułapce magneto-optycznej. Jest to wielce istotny krok, aby poprawnie oszacować straty populacji zimnych atomów K i Cs powodowane procesem fotojonizacji w docelowym tworzeniu ultrazimnych molekuł KAg oraz CsAg. Dzięki badaniom eksperymentalnym i teoretycznym Autorowi udało się wyznaczyć wartość przekroju czynnego fotojonizacji dla atomów cezu ^{133}Cs ($\sigma_{PI} = 1.14(15) \times 10^{-17} \text{ cm}^2$) oraz potasu ^{39}K ($\sigma_{PI} = 9.7(12) \times 10^{-18} \text{ cm}^2$). Ponadto Autor udowodnił,

wykonując pomiary fotojonizacji atomów w pułapce dipolowej, że stany podstawowe atomów Cs i ^{39}K nie ulegają fotojonizacji pod wpływem światła o długości fali 328 nm. Można też zgodzić się ze stwierdzeniem Autora, że jego badania wykazały brak pośredniej jonizacji dla atomów cezu i potasu w stanie podstawowym (na przykład poprzez wzbudzenie poza rezonansem stanu Rydberga). Jest to bardzo ważny wniosek dla sekwencji eksperymentalnych tworzenia molekuł KAg oraz CsAg. Wyniki w rozdziale 6 pokazują, że można najpierw przenieść zimne pierwiastki K i Cs do pułapki dipolowej i dopiero wtedy rozpocząć ładowanie pułapki MOT atomami srebra.

Rozprawę doktorską przeczytałem z dużym zainteresowaniem. Zaimponował mi stopień zaawansowania technik pomiarowych oraz umiejętność wykorzystania teoretycznych modeli do analizy otrzymywanych wyników bądź też oszacowania spodziewanych wartości wielkości fizycznych w badanym systemie. Pan mgr Jakub Dobosz wykonał w ciągu sześciu lat swojego doktoratu tytaniczną pracę, która wymagała od niego nie tylko znajomości fizyki, ale również elektroniki czy programowania. Wykazywał się ogromną wytrwałością w dążeniu do opracowania zestawu narzędzi do precyzyjnej spektroskopii ultrazimnych cząsteczek, nie zniechęcając się przy tym przeciwnościami losu, takimi jak choćby wspomniana w rozprawie awaria 15 watowego lasera G-Sprout 532 nm firmy Lighthouse Photonics, pompującego laser tytanowo-szafirowy MSquared SolsTiS, będący głównym źródłem światła do precyzyjnych pomiarów spektroskopowych.

Praca skłania do wielu przemyśleń i refleksji, w trakcie których nasuwa się szereg uwag i pytań. Chciałbym poprosić Autora rozprawy o odpowiedź na kilka moich pytań dotyczących pracy.

- 1) Które ze stworzonych przez Pana narzędzi eksperymentalnych do precyzyjnej spektroskopii ultrazimnych cząsteczek było dla Pana najbardziej czasochłonne i wymagające po względem złożoności konstrukcji i przysporzyło Panu najwięcej problemów?
- 2) Brakuje mi w Pana pracy jasnego schematu sekwencji ładowania pułapki i etapów chłodzenia atomów Cs i K w Państwa aparaturze K-Cs. Powołuje się Pan w tej kwestii na publikację, której jest Pan współautorem, dotyczącej pułapkowania mieszanin izotopów potasu ([78] Bocheński M., et al., Optics Express 32(27), (2024)), oraz wcześniejszy doktorat Pana Kolegi ([79] Dincer K.), myślę jednak, że warto by podać w formie graficznej lub tabeli odpowiednie etapy sekwencji pułapkowania i chłodzenia atomów wspomnianych pierwiastków. Bardzo chętnie zapoznałbym się z dokładniejszym omówieniem procesu chłodzenia od MOT, poprzez CMOT i GMC po pułapkę dipolową /sieć optyczną. Chciałbym poznać podstawowe parametry – temperatury, gęstości i przestrzenną geometrię chmury pułapkowanych atomów na kolejnych etapach chłodzenia. Ile wynosi odstrojenie laserów chodzących (Δ_C) i repompujących (Δ_R) dla atomów ^{133}Cs i ^{39}K (również ^{40}K i ^{41}K) przedstawionych na rysunku 3.5?
- 3) W rozdziale 3.2 opisuje Pan implementację metody LIAD, podając w tekście, że dla maksymalnego prądu zasilającego diody UV LED (370 nm) rzędu 700 mA uzyskał Pan współczynnik wzrostu liczby spułapkowanych atomów MOT rzędu 3,96, przy czym aby uniknąć nadmiernego nagrzewania i wydłużyć żywotność diod LED użytych w metodzie LIAD, zdecydował się Pan zasilac je prądem 300 mA – w takich warunkach ładowanie pułapki jest wzmocnione o czynnik 3,55. Szkoda tylko, że rysunek 3.13, ilustrujący względny współczynnik wzrostu szybkości ładowania pułapki MOT dla różnych prądów diod UV LED kończy się dla prądów rzędu 150 mA. Czy może Pan zaprezentować przykładowe wyniki pomiarów potwierdzające uzyskanie występujących w tekście rozdziału 3.2 parametrów?

- 4) Mam jeszcze jedną uwagę dotyczącą rozdziału 3.2, w którym opisuje Pan proces kompensacji rozproszonego pola magnetycznego w procesie chłodzenia w szarej melasie optycznej (*ang. gray molasses cooling* – GMC) atomów ^{39}K . Rysunek 3.20 w Pana pracy wygląda znacznie gorzej aniżeli ten sam rysunek reprezentowany w Pana artykule cytowanym w pracy jako [96]. Czasami forma przekazu tych samych danych ma znaczenie. Rozciągnięcie wykresu w osi odciętych w moim przekonaniu gorzej wizualizuje, kiedy chmura atomów ^{39}K osiąga minimum szerokości.
- 5) Czym podyktowany jest fakt, że rozdziały 3, 4 w Pana rozprawie mają swoje krótkie podsumowania na końcu (nie wymienione w spisie treści), a w rozdziałach 5 i 6 takich podsumowań brakuje?
- 6) Niezwykle imponująco wygląda system laserowy przedstawiony w rozdziale 4. Połączenie sterowania laserem MSquared SolsTiS (Ti:Sapphire) z miernikiem częstotliwości, miernikiem długości fali oraz grzebieniem częstotliwości optycznej w celu stabilizacji głównego lasera do precyzyjnych pomiarów spektroskopowych, a wszystko to w odniesieniu do atomowego zegara rubidowego (a w przyszłości zapewne do sygnału optycznego zegara atomowego – za pomocą narzędzia z rozdziału 5), wywarło na mnie ogromne wrażenie. Mam czysto techniczne pytanie od strony potencjalnego użytkownika takiego systemu: Ile czasu potrzeba by przestroić laser SolsTiS z jednego skrajnego położenia, np. 775 nm, w drugie skrajne położenie, ok. 900 nm, i go wystabilizować do grzebienia optycznego? Czy system pozwala na wykorzystanie lasera MSquared SolsTiS na skrzydłach jego zakresu generacji światła? Czy jednak przez pewne ograniczenia (jakie?) zakres generacji nie może być aż tak szeroki? Oczywiście pytam w kontekście możliwości przeprowadzania w przyszłości ultraprecyzyjnych pomiarów na zimnych molekułach CsAg lub KAg.

Rozprawa obejmuje swoją treścią bardzo szeroki zakres materiału, od podstaw teoretycznych pułapowania i chłodzenia swobodnych atomów, poprzez opis skomplikowanego układu eksperymentalnego do prezentacji oryginalnych wyników osiągniętych w pracy. Objętość 161 stron mieści się w kanonach typowych wielkości rozpraw doktorskich z fizyki. Praca od strony językowej i estetycznej została napisana poprawnie (nieliczne uwagi dotyczące rysunków, schematów lub wprowadzeń skrótów czy niemal zerowa liczba błędów językowych w mojej ocenie nie są warte by wspominać je w niniejszej recenzji).

Na duże uznanie zasługuje wspomniany już na wstępie fakt, iż rozprawa została przygotowana w języku angielskim, co może znacząco zwiększyć liczbę jej odbiorców. Bardzo pozytywnie oceniam obszerną i właściwie dobraną bibliografię, w dużej mierze obejmującą pozycje współczesnej, najnowszej literatury naukowej, co tylko pokazuje, że Pan mgr Jakub Dobosz posiada szerokie rozeznanie w dziedzinie, którą się zajmuje.

Nieco słabszą stroną dorobku naukowego Pana mgr. Jakuba Dobosza są publikacje naukowe. Jak do tej pory są to dwa artykuły naukowe opublikowane w recenzowanych czasopismach, które Autor rozprawy uwzględnił również w spisie bibliografii. Pocieszającym jest fakt, że w jednym z nich Doktorant jest pierwszym i korespondencyjnym autorem. Pokazuje to, że nabył umiejętność samodzielnego napisania publikacji naukowej oraz przeprowadzenia jej przez niełatwy proces recenzji, a to bardzo ważna kompetencja na obecnym etapie rozwoju naukowego. Zabrakło mi jednak w rozprawie dodatkowego załącznika przedstawiającego sylwetkę naukową Doktoranta. Po krótkiej analizie baz danych udało mi się uzyskać informacje, że oprócz wspomnianych artykułów Pan mgr Jakub Dobosz posiada w swoim naukowym portfolio 3 artykuły konferencyjne. Chcę jednak zaznaczyć, że Doktorant podczas sześciu lat przygotowywania doktoratu intensywnie pracował w grupie prof. dr. hab. Pawła Kowalczyka oraz dr. Mariusza Semczuka nad budową nowego, bardzo skomplikowanego układu eksperymentalnego w zakresie fizyki ultrazimnych atomów i molekuł, który stwarza potencjał,

aby nawiązać równorzędną naukową rywalizację z najlepszymi grupami badawczymi na świecie. Zapewne wkład pracy Doktoranta włożony w budowę układu eksperymentalnego zaowocuje kolejnymi publikacjami w przyszłości.

Konkluzja pozytywna

Niniejsza recenzja jednoznacznie stwierdza, że przedłożona rozprawa doktorska Pana Jakub Dobosza pt. *„Development of a toolbox for high-precision spectroscopy of ultracold molecules”* prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata w dyscyplinie nauk fizycznych oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Wiedza teoretyczna została w rozprawie zaprezentowana zarówno w odniesieniu do fizyki atomowej, fizyki molekularnej, optyki, fizyki laserów, ale również w zakresie mechaniki, elektroniki oraz informatyki i programowania. Doktorant wykazał się ogromną samodzielnością przy budowie zestawu narzędzi do precyzyjnej spektroskopii ultrazimnych cząsteczek oraz przy prowadzeniu pomiarów i analizie otrzymanych danych eksperymentalnych. Przedmiotem przedłożonej rozprawy jest oryginalne rozwiązanie kilku problemów, między innymi takich jak: kontrola pola magnetycznego w procesach chłodzenia atomów i rezonansów Feshbacha, stabilizowany system laserowy do pułapkowania i chłodzenia atomów cezu, desorpcja atomów indukowana za pomocą światła UV z diod LED stosowana w układach eksperymentalnych z jedną komorą próżniową, czy automatyczny system laserowy do ultra precyzyjnej spektroskopii zimnych atomów i molekuł, przestrajalny w szerokim zakresie spektralnym, stabilizowany do grzebienia częstotliwości optycznych.

Podsumowując, stwierdzam, że przedłożona do recenzji **rozprawa doktorska Pana mgr. Jakuba Dobosza jednoznacznie spełnia wszystkie wymagania** określone w Art. 187 ust. 1 i 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668). **Wnoszę o dopuszczenie rozprawy doktorskiej do publicznej obrony** oraz dopuszczenie Doktoranta mgr. Jakuba Dobosza do dalszych etapów postępowania doktorskiego.

Pan mgr Jakub Dobosz w ramach swojej pracy doktorskiej udowodnił, że jest dobrze przygotowany do prowadzenia samodzielnej pracy naukowej. Przedstawiona przez niego rozprawa jest bardzo dobrze zredagowana pod względem naukowym. Jest przykładem pracy interdyscyplinarnej, łączącej aspekt naukowy w obszarze fizyki atomowej, molekularnej i fizyki ultrazimnej materii z aspektami technicznymi (elektroniki układów analogowych i cyfrowych, automatyki i robotyki) i informatycznymi (interfejs programowania aplikacji (API) oparty na protokole HTTP). Autor skutecznie połączył swoją wiedzę, umiejętności i wiele technologii, by stworzyć zestaw narzędzi do precyzyjnej spektroskopii ultrazimnych cząsteczek. Taki układ eksperymentalny bez wątpienia stwarza możliwości prowadzenia badań naukowych na najwyższym światowym poziomie. **Wnioskuje zatem o wyróżnienie rozprawy.**

Z wyrazami szacunku,



dr hab. inż. Przemysław Głowacki

