



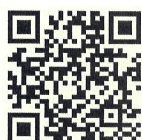
Toruń, 19.12.2025

dr hab. Piotr Maślowski, prof. UMK  
Instytut Fizyki,  
Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej,  
Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu  
ul. Grudziądzka 5,  
87-100 Toruń  
Email: [pima@fizyka.umk.pl](mailto:pima@fizyka.umk.pl)

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Jakuba Dobosza zatytułowanej:  
„Development of a toolbox for high-precision spectroscopy of ultracold molecules”.

Recenzja została przygotowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Nauki Fizyczne Uniwersytetu Warszawskiego dr hab. Jacka Szczytko, prof. uczelni, na podstawie dostarczonego manuskryptu pracy doktorskiej.

Przedstawiona przez mgr Jakuba Dobosza praca doktorska oparta jest na wkładzie autora w budowę na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego układu pomiarowego pozwalającego na badanie fizyki ultra-zimnych atomów i molekuł. Badania te, wykorzystujące laserowe chłodzenie i pułapkowanie atomów, aby były możliwe do przeprowadzenia i dostarczyły precyzyjnych i dokładnych wyników, wymagają precyzyjnej kontroli warunków eksperymentalnych, w tym m.in. częstotliwości użytych laserów czy stabilności pola magnetycznego, na najwyższym możliwym poziomie. Osiągnięcie wymaganych parametrów tych warunków nie jest sprawą trywialną, ponieważ wymagają one dedykowanych, oryginalnych rozwiązań technicznych zazwyczaj nieosiągalnych komercyjnie. Pan mgr Jakub Dobosz z sukcesem stworzył zestaw narzędzi niezbędnych pozwalający na precyzyjną i szybką kontrolę pól magnetycznych, precyzyjną i dokładną kontrolę częstotliwości laserów przy wykorzystaniu grzebienia częstotliwości optycznych oraz koherentny transfer częstotliwości przez sieć światłowodową. Jako naturalny sprawdzian, zademonstrował ich działanie w praktyce, osiągając temperaturę w pułapce na poziomie 8  $\mu$ K, porównywalną z najlepszymi układami doświadczalnymi oraz wyznaczył przekroje czynne na fotojonizację atomów Cs i K w stanach wzbudzonych, co jest oryginalnym wynikiem naukowym szczególnie ważnym dla zagadnienia tworzenia ultra-zimnych molekuł z dużym momentem dipolowym takich jak dimery atomy alkaliczne-srebro.



Przedstawiona praca była wykonana pod opieką Prof. dr hab. Pawła Kowalczyka oraz dr Mariusza Semczuka, czerpiąc także z naturalnej współpracy z prof. Michałem Tomzą w zakresie stworzenia ultra-zimnych dimerów o dużych momentach dipolowych. Badania realizowane były na wymienionym wcześniej Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Dysertacja została napisana w języku angielskim w formie tradycyjnej rozprawy, liczącej 161 stron wraz z załącznikami i bibliografią i składa się z wprowadzenia, 5 rozdziałów opisujących budowany układ pomiarowy wraz z założeniami teoretycznymi i uzyskanymi parametrami działania układu, rozdziału przedstawiającego uzyskane wyniki pomiarów fotojonizacji atomów cezu i potasu przy wykorzystaniu światła o długości fali 328 nm oraz Konkluzji, będących podsumowaniem uzyskanych wyników. Zaproponowany układ pracy jest w moim odczuciu odpowiedni, część teoretyczna i przedstawiona motywacja prowadzonych prac pozwalają czytelnikowi na zaznajomienie się z tematyką poszczególnych rozdziałów i zrozumienie problemów rozwiązywanych przez doktoranta. Praca uzupełniona jest bibliografią liczącą 157 angielskojęzycznych pozycji, które są odpowiednio dobrane i pozwalają czytelnikowi zapoznać się z dostępną i aktualną literaturą na temat przedstawionych zagadnień.

Pozwolę sobie nie omawiać szczegółowo każdego z rozdziałów pracy, skupiając się jedynie na najważniejszych osiągnięciach oraz moich uwagach do przedstawionego materiału. I tak w rozdziale 2 przedstawione zostały podstawy teoretyczne chłodzenia i pułapkowania atomów (dopplerowskiego i subdopplerowskiego) oraz zasady działania pułapki magneto optycznej i optycznej pułapki dipolowej. Przedstawiono tam także krzywe ładowania do zbudowanej pułapki magneto optycznej dla atomów Cs i K. W podrozdziale 2.5 dyskutowane są także wybór długości fali lasera w pułapce dipolowej (rys. 2.7). Autor stwierdza w tym miejscu, że częstym wyborem jest użycie lasera o dł. fali 1064nm, ze względu na dostępność tego typu źródeł o wysokiej mocy. Tutaj mam pytanie, czy jeśli nie byłoby ograniczeń technicznych, tzn. lasery o podobnych parametrach byłyby dostępne dla dowolnej długości fali, czy długość fali 1064 nm nadal by była optymalnym wyborem pod kątem zastosowania w pułapce dipolowej? Jeśli nie to jaka długość fali byłaby optymalna?

Rozdział 3 opisuje układ pomiarowy dedykowany dla badań cząsteczek K-Cs, ze szczególnym uwzględnieniem wkładu autora w zbudowany układ, tzn. układów generowania i kontroli pól magnetycznych, dołączenie do siebie laserów odstrojonych o 9.193 GHz w układzie uproszczonym w porównaniu do układu opartego na modulatorach AOM oraz poprawienie wydajności pułapkowania poprzez wykorzystanie zjawiska dysorpcji atomów poprzez światło UV (ligh-induced atomic desorption -LIAD). W tym ostatnim przypadku pozwoliło to na trzykrotne zwiększenie szybkości ładowania pułapki. Szczególnie wartym podkreślenia osiągnięciem jest zaprojektowanie układu cewek kompensacyjnych dla pola magnetycznego, które pozwoliły zmniejszyć temperaturę w pułapce prawie 10-krotnie, do 8 uK, co jest porównywalne do najlepszych wyników uzyskiwanych na świecie w najlepszych grupach badawczych.

W części poświęconej układowi dołączania laserów dla atomów Cs, autor stwierdza, że użycie modulatorów elektro optycznych (EOMs) łączy się z wytworzeniem pasm bocznych, których obecność może zakłócić działanie procedury pomiarowej i z tego powodu nie jest rozwiązaniem optymalnym.

Czy autor rozważał użycie urządzenia znanego jako *single sideband modulator*? Czy nie byłoby to prostsze rozwiązanie? Czy byłyby jakieś minusy takiego podejścia w porównaniu do zaprezentowanego rozwiązania?

Rysunek 3.17 pokazuje widmo częstotliwościowe dookoła częstotliwości 40 MHz. Na stronie 49 autor stwierdza, że rysunek „shows an acquired phase lock of the frequency with respect to the local oscillator (LO) provided by the internal RedPitaya clock”. Mam tutaj pytanie, czy rzeczywiście zegar układu RedPitaya był lokalnym oscylatorem i czy miał on referencję do jakiegoś innego wzorca częstotliwości, zwłaszcza do źródeł 123 MHz i 60 MHz w przedstawionym układzie pomiarowym. Dokładny rysunek układu pomiarowego w którym zmierzono sygnał przedstawiony na rys. 3.7 wraz z oznaczeniem potencjalnych dowiązań fazowych między sygnałami RF byłby bardzo pomocny. Jeśli zegar układu RedPitaya nie był dowiązany do fazowo stabilnego sygnału wzorcowego, czy to nie może być przyczyna braku zawężenia spektralnego dowiązanego lasera?

Rozdział 4 zawiera opis zbudowanego układu laserowego, pozwalającego na fazowe dowiązanie częstotliwości laserów do grzebienia częstotliwości optycznych i ich precyzyjną kontrolę. Stworzono także zestaw oprogramowania łączącego szereg urządzeń pomiarowych i pozwalającego na zautomatyzowaną, niezawodną pracę całego układu. Narzucającą się kwestią w przypadku dowiązania lasera SolsTiS do grzebienia częstotliwości optycznych jest pytanie o czynnik ograniczający osiąganą szerokość linii lasera czy rozdzielczość spektralną. Czy zostały zmierzone funkcje przenoszenia poszczególnych aktuatorów lasera? Dodatkowo, w tekście odnoszącym się do Rys. 4.7. autor pisze: *the averaging time of 1 s, which is a typical time range at which the atomic sample is illuminated with the laser, the uncertainties of the comb frequencies are around 10–12 for  $f_{REP}$  and 10–9 for  $f_{CEO}$ . Due to typical frequency values  $f_{REP} \approx 110\text{MHz}$  and  $f_{CEO} \approx 30\text{MHz}$  this translates to  $\approx 0.22\text{ mHz}$  and  $\approx 60\text{ mHz}$ , respectively. These are state-of-the-art values and are suitable for high-precision spectroscopy applications.* Przedstawione liczby przekładają się na szerokość linii ok. 60 kHz w domenie optycznej. Chciałbym usłyszeć tutaj małą dyskusję czy jest to wystarczająco wąski spektralnie źródło dla wszystkich zastosowań w spektroskopii? W jakich przypadkach to nie będzie wystarczające?

Na stronie 102 autor stwierdza, że: *„Due to changes on a daily basis in environmental conditions such as temperature and humidity which affect the electronics, it may be sometimes more beneficial to lock to positive or negative loops.”*. Czy mógłbym prosić o szersze wyjaśnienie w jaki sposób taka zmiana znaku sygnału błędu na skutek zmian środowiskowych wpływających na elektronikę byłaby możliwa?

Uwaga techniczna - w przypadku paneli na rys. 4.7 pokazujących odchyłkę mierzonej wartości (*Deviation*) powinien być jeszcze jeden panel ze zmienioną skalą pozwalający oszacować odchylenia dla przypadku dowiązania częstotliwości  $f_{rep}$  i  $f_{ceo}$ . Podobna uwaga dotyczy rys. 5.5, chętnie zobaczyłbym te rysunki podczas obrony.

W rozdziale 6 opisany jest hybrydowy układ transferu wzorcowej częstotliwości poprzez sieć światłowodową. Unikalność prezentowanego układu polega na połączeniu układu stabilizującego fazę podczas transmisji w zakresie niskich częstotliwości z wnęką optyczną, pozwalającą usunąć szum na wysokich składowych fourierowskich. Układ pozwolił na uzyskanie stabilności sygnału na poziomie  $8 \times 10^{-17}$  w domenie optycznej w czasie 10s. Wartość ta pozwala na transfer sygnałów generowanych

przez układy optycznych zegarów atomowych bez degradacji ich stabilności. Moja uwaga w przypadku tego rozdziału to niejasne stwierdzenie dotyczące na stronie 110: *servo has subhertz transfer function so it can filter super-Hertz noise spectrum*. Prosiłbym o bardziej precyzyjne opisanie tego aspektu, co do zasady każdy filtr dolnoprzepustowy- filtr z częścią *Integral* ma jakąś funkcję w zakresie częstotliwości poniżej Hz. Jaka cecha sprawia że zbudowany układ jest odpowiedni do przedstawionego zastosowania (wzmocnienie powyżej 1 jedynie w jakimś zakresie częstotliwości? Brak odpowiedzi na częstotliwościach powyżej określonej częstotliwości?)

W ostatnim rozdziale zaprezentowane są wyniki pomiarów przekrojów czynnych na fotojonizację atomów Cs i K pod wpływem oświetlenia wiązką laserową z zakresu ultrafioletu o długości fali 328 nm. Otrzymane wyniki bazują na symulacjach ewolucji populacji pułapki magneto optycznej oraz uwzględniają wpływ zjawiska LIAD na szybkość ładowania pułapki. Otrzymane wyniki dla Cs z dobrą dokładnością zgadzają się z przewidywaniami teoretycznymi, w przypadku 39K różnią się o czynnik dwa, co przypisywane jest, moim zdaniem trafnie obecności wiązki lasera repompującego, nieuwzględnionej w modelu. Dodatkowo zweryfikowano także doświadczalnie w pułapce dipolowej możliwość fotojonizacji atomów ze stanu podstawowego, potwierdzając brak tego efektu dla wybranej długości fali. W przypadku tej części pracy zwracam uwagę na brak definicji parametru Gamma we wzorze (6.6) jak również błędny podpis pod rysunkiem Fig. 6.7, który jest podpisany błędnie jako *Photoassociation cross-section* zamiast *photoionization cross-section*.

Przedstawione powyżej uwagi wynikają przede wszystkim z roli jako recenzenta oraz wrodzonej ciekawości. Nie umniejszają one wysokiej jakości pracy i przedstawionych w niej wyników i rozwiązań. Podsumowując uważam, że opracowany przez doktoranta zestaw narzędzi do spektroskopii ultra-zimnych molekuł zawiera ciekawe, a jednocześnie praktyczne rozwiązania techniczne, które są ważne zarówno dla badań podstawowych jak w zastosowaniach szeroko rozumianych technologii kwantowych. Jakość zaproponowanych rozwiązań jest potwierdzona poprzez wyniki pomiarów, ze szczególnym wskazaniem na osiągniętą temperaturę 8  $\mu$ K w pułapce magneto optycznej oraz wyznaczenie eksperymentalne przekrojów na fotojonizację wiązką o długości fali 328nm dla atomów Cs i K a także zbadanie wpływu efektu LIAD na wydajność pułapki. W tych ostatnich przypadkach ma to szczególne znaczenie dla badań podstawowych oddziaływań dla zimnych molekuł typu atom alkaliczny-Ag. Trochę szkoda, że z uwagi na awarie układów laserowych nie udało się przeprowadzić większej liczby pomiarów dla możliwych do badania systemów atomowych i molekularnych. Tym niemniej stwierdzam, że przedstawione w pracy rozwiązania i wyniki stanowią istotny wkład do dyscypliny Nauki Fizyczne.

**Jednocześnie stwierdzam, że recenzowana przeze mnie praca doktorska w pełni spełnia zwyczajowe i formalne warunki i wymagania stawiane pracom doktorskim, zgodnie z art. 187 ust. 1 i 2 Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 roku z późniejszymi zmianami. Wobec czego wnioskuję do Rady Dyscypliny Nauki Fizyczne o dopuszczenie pana mgr. Jakuba Dobosza do dalszych etapów postępowania w sprawie o nadanie stopnia doktora.**

Dokument podpisany  
przez Piotr Masłowski;  
UMK w Toruniu  
Data: 2025.12.20  
15:50:06 CET