



UNIwersytet Jagielloński
w Krakowie

Szymon Pustelny

Zakład Fotoniki

Instytut Fizyki

Uniwersytet Jagielloński

Łojasiewicza 11, 30-348 Kraków

Tel: +48 12 663 4691

E-mail: pustelny@uj.edu.pl

Kraków, 29 grudnia 2025

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana Mateusza Bocheńskiego zatytułowanej „Feshbach spectroscopy of potassium-cesium mixtures”

Rozprawa doktorska Pana mgr. Mateusza Bocheńskiego poświęcona jest eksperymentalnym badaniom ultrazimnych mieszanin atomów potasu i cezu oraz spektroskopii rezonansów Feshbacha w takich układach. Tematyka ta stanowi jeden z dynamicznie rozwijających się obszarów współczesnej fizyki atomowej. Ultrazimne mieszaniny, a w szczególności te mieszaniny, w których możliwe jest precyzyjne sterowanie oddziaływaniami międzyatomowymi, otwierają drogę do realizacji symulatorów kwantowych, badania nowych faz materii czy wreszcie tworzenia ultrazimnych, polarnych cząsteczek w ich stanie podstawowym. W tym kontekście wybór tematyki jest nieprzypadkowy i obiecujący, a podjęte przez Doktoranta wyzwanie badawcze zasługuje na uznanie.

Praca przedstawia kompletną realizację eksperymentu obejmującego chłodzenie atomów alkalicznych do temperatur rzędu mikrokKelwinów, wytwarzanie mieszanin izotopowych oraz badanie ich dynamiki związanej ze zderzeniami. Autor opisuje konstrukcję układu doświadczalnego, w którym wykorzystywana jest tylko jedna komora próżniowa do pułapkowania atomów. Choć skonstruowany układ cechuje się mniejszą złożonością techniczną od szeregu innych eksperymentów, wciąż umożliwia on chłodzenie atomów potasu (^{39}K , ^{40}K oraz ^{41}K) lub cezu (^{133}Cs) oraz wytwarzanie mieszanin takich ultrazimnych gazów. Chłodzenie realizowane jest metodami magnetooptrycznymi, a następnie tak schłodzone atomy pułapkowane są w pułapce magnetycznej lub optycznej pułapce dipolowej. Szczególnie istotnym osiągnięciem Autora jest zademonstrowanie możliwości pułapkowania fermionowego izotopu potasu (^{40}K) oraz uzyskanie w takich warunkach mieszanin dwóch gazów: (1) mieszaniny izotopów potasu cechujących się różnymi statystykami kwantowymi (^{39}K - ^{40}K) oraz (2) mieszaniny potasu i cezu (^{39}K - ^{133}Cs oraz ^{41}K - ^{133}Cs). Warto podkreślić, że wytworzenie mieszaniny ^{41}K - ^{133}Cs i przeprowadzenie w niej badań rezonansów Feshbacha było pierwszą w historii realizacją badań w takim ośrodku.

Rozprawa składa się z siedmiu zasadniczych rozdziałów, poprzedzonych Wstępem i zakończonych Podsumowaniem, które można podzielić na dwie zasadnicze części. Część pierwsza (rozdziały 2-4) stanowi wprowadzenie do tematu i opis aparatury. Autor wprowadza tu podstawy teoretyczne dotyczące chłodzenia laserowego, pułapkowania atomów oraz zderzeń w niskich temperaturach, a także opisuje kluczowe elementy układu: system próżniowy, cewki magnetyczne oraz systemy laserowe. Na uwagę zasługuje fakt, że zdecydowana większość opisywanych układów została zaprojektowana, zbudowana i uruchomiona przez Doktoranta (lub przy jego kluczowym udziale), co świadczy o bardzo wysokim poziomie jego kompetencji eksperymentalnych. Druga część (rozdziały 5-8) to opis prac badawczych, w dużej mierze oparty na cyklu publikacji. Dotyczy ona chłodzenia fermionowego potasu (^{40}K), badania mieszaniny dwóch izotopów potasu oraz badań nad mieszaninami potas-cez.



UNIwersytet JAGIELLOŃSKI
W KRAKOWIE

Szymon Pustelny
Zakład Fotoniki
Instytut Fizyki
Uniwersytet Jagielloński
Łojasiewicza 11, 30-348 Kraków
Tel: +48 12 663 4691
E-mail: pustelny@uj.edu.pl

W kontekście badań doświadczalnych, szczególnie wartościowa jest część poświęcona realizacji chłodzenia fermionowego izotopu ^{40}K . Autor demonstruje bardzo efektywne chłodzenie sub-dopplerowskie tego izotopu, wykorzystując jedynie dyspensery o naturalnym składzie izotopowym (zawierające zaledwie 0,012% ^{40}K). Jest to ważny wynik, pokazujący, że przy odpowiedniej optymalizacji procesów chłodzenia (MOT, kompresja, szara melasa) można uniknąć stosowania kosztownych wzbogaconych źródeł czy skomplikowanych spowalniaczy Zeemana.

Opisując swoje wyniki Doktorant kilkakrotnie podkreśla, że zostały one uzyskane „in a single-chamber apparatus without using an enriched source of potassium”. Stwierdzenie to z jednej strony podkreśla większą prostotę układu doświadczalnego, ale także naturalnie nasuwa pytanie o to **jak przeprowadzone badania i uzyskane wyniki mają się do innych badań nad fermionowym potasem ^{40}K** . Przykładowo, czy uzyskiwane gęstości są znacząco mniejsze, a czasy życia krótsze, **czego można by się spodziewać w kontekście ciśnienia pozostałych izotopów potasu?** Niestety nie znalazłem tego odwołania do danych literaturowych i dlatego **proszę o przedyskutowanie ich podczas obrony rozprawy doktorskiej**.

Kolejnym istotnym, tym razem technicznym, elementem pracy jest opis modułowego systemu laserowego wykorzystywanego w badaniach. Układ ten, choć skomplikowany, oferuje szereg ważnych zalet z punktu widzenia prowadzenia eksperymentów. Należą do nich m.in. szybkość przełączania układu pomiędzy różnymi izotopami, co dzieje się w skali jednej mikrosekundy. W sposób oczywisty otwiera to nowe możliwości badawcze, poprzez pełniejszą kontrolę układu czy możliwość bardziej precyzyjnej optymalizacji procedur przygotowania, manipulowania czy badania układu. To, czego jednak zabrakło mi w opisie tego systemu, to dyskusja jego stabilności długoczasowej. W szczególności chciałbym się dowiedzieć **jakie były zakresy dryfu parametrów układu (np. długości fali czy natężenia) w czasie prowadzenia wielogodzinnych pomiarów spektroskopowych?** Drugie pytanie, które nasunęło mi się podczas lektury tego rozdziału dotyczy wykorzystania układów MOPA do wzmacniania sygnałów o dwóch częstotliwościach jednocześnie. **Czy Doktorant zaobserwował, czy zmiana natężenia wiązki o jednej częstotliwości ma wpływ na efektywność wzmacniania wiązki o drugiej częstotliwości?** W swej naturze pytanie dotyczy tego **czy w opracowanym rozwiązaniu występuje forma konkurencji modów, która mogłaby wpływać na stabilność pracy całego układu, a co za tym idzie miałyby wpływ na prowadzone pomiary?**

W swojej pracy doktorskiej, Pan Bocheński wykorzystywał stabilizację długości fali emitowanego światła bazującą na spektroskopii nasyceniowej. Choć jest to znana i często wykorzystywana metoda, chciałbym zwrócić jego uwagę na możliwość wykorzystania techniki stabilizacji dichroicznej (*Dichroic Atomic Vapor Laser Lock* – DAVLL). Ten typ stabilizacji pozwala uniknąć konieczności modulacji światła laserowego, co mogłoby mieć pozytywny wpływ na realizowane badania i uniknąć błędów lub trudności doświadczalnych.

Podczas lektury tego rozdziału nasunęło mi się jeszcze jedno pytanie techniczne. Ciekawi mnie **jakiego typu światłowód utrzymujący polaryzację (*polarization maintaining* – PM) został wykorzystany w systemie?** Moje doświadczenia z pracy ze światłowodami PM sugerują, że polaryzacja w takich układach potrafi „płynąć” z czasem (zmiany dwójtomności w funkcji temperatury czy naprężeń mechanicznych). Dlatego chciałbym się dowiedzieć **czy cały układ posiadał aktywną stabilizację natężeniową (np. przez pętlę sprzężenia zwrotnego sterującą mocą**



UNIwersytet Jagielloński
w Krakowie

Szymon Pustelny

Zakład Fotoniki

Instytut Fizyki

Uniwersytet Jagielloński

Łojasiewicza 11, 30-348 Kraków

Tel: +48 12 663 4691

E-mail: pustelny@uj.edu.pl

na AOM) czy też Doktorant nie musiał mierzyć się z tego typu wyzwaniem? Jeśli rzeczywiście ten problem nie istniał czy Doktorant ma jakieś przemyślenia na ten temat?

Rozdział 6 rozpoczyna fragment, który stanowi opis wyników naukowych uzyskanych podczas realizacji doktoratu. Jako pierwsze jest w tej części opisane pułapkowanie mieszaniny dwóch izotopów potasu (^{39}K oraz ^{40}K), które charakteryzują się różnymi statystykami kwantowymi (bozony vs fermiony). Zgodnie z informacją zamieszczoną w pracy, zrealizowane chłodzenie takiej mieszaniny gazów jest pierwszym tego typu eksperymentem na świecie. Jest to o tyle ważne, że układ taki jest unikalną platformą do badań nad nadciekłością oraz do weryfikacji szeregu modeli chemii kwantowej. W ramach prac na tym zagadnieniu Doktorantowi udało się zademonstrować sub-dopplerowskie chłodzenie tych gazów oraz przeanalizować skrócenie czasu życia fermionowego ^{40}K na skutek zderzeń z bozonowym ^{39}K .

Oprócz swoich walorów poznawczych, mieszaniny gazów są często wykorzystywane do chłodzenia sympatycznego atomów. Dlatego zaskakującym jest dla mnie, że raportowane w pracy temperatury obu izotopów są różne. Motywowany tą różnicą chciałem zapytać, **dlaczego w mieszaninie dwóch izotopów potasu nie dochodzi do efektywnej termalizacji? Czy jest to kwestia zbyt krótkiego czasu życia próbki, czy może w grę wchodzi inne efekty, np. specyficzne własności zderzeniowe w obecności pól pułapkujących?** Przy okazji chciałem zapytać o pojawiający się na str. 124 fragment: „In other applications, the availability of six possible combinations of isotopes makes potassium...”. **Dlaczego autor pisze o sześciu kombinacjach trzech izotopów potasu?** Wydaje mi się, że ze zbioru trójelementowego (^{39}K , ^{40}K oraz ^{41}K) mogą wybrać tylko trzy różne pary izotopów. **Czy coś mi zatem tutaj umknęło? Czy Autor wlicza w to również pary homoizotopowe?**

Kluczowa część pracy (rozdziały 7 i 8) dotyczy spektroskopii Feshbacha oraz analizy strat w mieszaninach potas-cez. Autor opisuje zderzenia trójciałowe jako jeden z podstawowych mechanizmów strat, co jest zgodne z obecną wiedzą. Prezentowana metoda transferu do pułapki dipolowej oferuje efektywność rzędu kilku procent. Może nie jest to wartość rekordowa, ale, co istotne, efektywność ta jest osiągnięta bez znaczącego podgrzewania układu, co jest kluczowe dla dalszych etapów. Przy okazji, na stronie 155 pojawia się skrót TO-GMC, który Autor rozszyfrowuje jako (*Transfer-Optimized Gray Optical Molasses*). **Czy litera „C” pochodzi od słowa *Cooling*, którego zabrakło w rozwinięciu skrótu w tekście czy może od czegoś innego?**

Ważnym wynikiem doktoratu Pana Bocheńskiego jest obserwacja rezonansów Feshbacha w mieszaninie ^{39}K - ^{133}Cs , co rozszerza wcześniejsze wyniki grupy z Innsbrucka, oraz w nowej mieszaninie ^{41}K - ^{133}Cs . W pracy doktorskiej Autor opisuje jak bezskutecznie poszukiwał rezonansu Feshbacha w tym drugim układzie. Trzeba podkreślić, że w tym przypadku swoistym „pocałunkiem śmierci” był wkład teoretyczny, który sugerował istnienie rezonansów dla określonego przedziału wartości pola magnetycznego. Jak się później okazało zakres ten był kompletnie różny od pól, w których ostatecznie udało się takie rezonanse zaobserwować. Sukces Pana Bocheńskiego w tym zakresie jest więc tym większy. Szkoda może jednak tego ogromnego wysiłku eksperymentalnego. Z drugiej jednak strony tak duża niepoprawność przewidywań modeli teoretycznych dla mieszaniny ^{41}K - ^{133}Cs , przy jednoczesnej ogromnej zgodności przewidywań teoretycznych



UNIwersytet Jagielloński
w Krakowie

Szymon Pustelny
Zakład Fotoniki
Instytut Fizyki
Uniwersytet Jagielloński
Łojasiewicza 11, 30-348 Kraków
Tel: +48 12 663 4691
E-mail: pustelny@uj.edu.pl

i doświadczalnych dla ^{39}K - ^{133}Cs każde postawić ważne pytanie czym te, pozornie bardzo zbliżone układy, się od siebie tak silnie różnią.

Rezonanse Feshbacha przedstawione w rozdziale 8 są bardzo wyraźne i niebudzące wątpliwości. Mam jednak pytanie, które związane jest z wynikami przedstawionymi na Rys. 8.7. **Czy Autor mógłby pospekulować, dlaczego rezonanse te mają tak różne szerokości, a w niektórych przypadkach wykazują podwójną strukturę? Co może być fizycznym źródłem tego typu różnic w rozważanym układzie?**

Obok tych zasadniczych pytań mam jeszcze kilka mniejszych uwag techniczno-merytorycznych:

- Przy opisie układu próżniowego (str. 112) pojawia się informacja o obecności cezu w eksperymencie potasowym. **Czy to, że cez pojawia się w tle, jest skutkiem grzania radiacyjnego dyspensera cezowego przez gorący dyspenser potasowy, czy może atomy cezu są wybijane przez atomy potasu uderzające w powierzchnię dyspensera?**
- Na str. 70 znajduje się stwierdzenie: „In our experimental setup the signal acquisition time or exposure time was restricted to a maximum of 20 milliseconds.” Tymczasem na Rysunku 3.19 (prawa część) podpis głosi, że czas ekspozycji wynosił 2500 ms. **Czy Doktorant mógłby wyjaśnić tę rozbieżność?**
- Na str. 157 napisane jest, że AOM przesuwą częstotliwość o -72 MHz, co skwitowane jest stwierdzeniem, że wiązka jest przesunięta „ku błękitowi” (*blue-detuned*). Problem polega na tym, że niższa częstotliwość sugeruje przesunięcie ku czerwieni. Proszę zatem o wyjaśnienie **czy chodzi o to, że wiązka przed AOM była już odstrojona na „niebiesko”, a AOM to odstrojenie tylko zmniejszył, czy może jest to pomyłka w opisie znaku odstrojenia?** Przy okazji warto podkreślić, że samo stwierdzenie „odstrojenie ku czerwieni” czy „odstrojenie ku błękitowi” w przypadku używania promieniowania podczerwonego może być problematyczne.
- Na przestrzeni pracy Doktorant przywołuje szereg wielkości fizycznych. Przykładem tutaj jest szerokość rezonansu Γ , która czasem mierzona jest w hercach a czasem w 2π Hz. W swoich pracach staram się dość konsekwentnie stosować zapis $\Gamma/2\pi = \text{liczba Hz}$, do czego chciałbym zachęcić też i Doktoranta. Samą jednostką Γ jest rad/s, a proponowane przeze mnie rozwiązanie pozwala uniknąć wątpliwości co do mnożenia przez 2π .
- Na Rysunku 3.14 czes pojawia się dwa razy w rzędach. **Jaka jest różnica między pierwszym a przedostatnim rzędem?** Podpis tego nie wyjaśnia, a jednocześnie obrazowany chmury mają inne kształty.

Oprócz tych drobnych uwag merytorycznych w pracy znalazłem też kilka problemów edytorskich:

- „wit” zamiast „with” na str. 85, „would” zamiast „woudl” na str. 167.
- Zaskakująca forma cytowań, w której każda cytowana praca ma osobny nawias kwadratowy.
- Cytowanie najpierw rysunku 2.2 a później 2.1.
- Pojawiające się w kilku miejscach łamanie linii pomiędzy wartością a jednostką.
- Brak jednostki cm^{-3} przy definicji gęstości chmury.
- Wielokrotne definiowanie tych samych skrótów (np. MOT, AOM), które często nie są w ogóle wykorzystywane.



UNIwersytet Jagielloński
w Krakowie

Szymon Pustelny

Zakład Fotoniki

Instytut Fizyki

Uniwersytet Jagielloński

Łojasiewicza 11, 30-348 Kraków

Tel: +48 12 663 4691

E-mail: pustelny@uj.edu.pl

- Niejednolita pisownia odwołań do rysunków i równań (Fig./Figure, Eq./Equation, mała/duża litera).

Generalnie jednak praca zawiera szczerą liczbę błędów edytorskich, jest dobrze zredagowana i napisana jest bardzo dobrym językiem angielskim.

Patrząc na całą pracę, narzucają mi się na koniec dwie uwagi subiektywne. Pierwszą rzeczą, którą zabrakło mi w rozprawie to jasne postawienie problemu. **Jaki był cel naukowy tego, co chciał zrobić Doktorant i dlaczego chciał to robić?** Oczywiście rozumiem, że czasem w prowadzonych badaniach ten cel nie jest jasny lub się zaciera, tym niemniej taki cel można sformułować nawet *a posteriori* (czy nie tak robimy często w naszych artykułach). Co prawda, pewna forma przedstawienia takiej wizji pojawia się na samym końcu pracy (rozdział 9), ale moim zdaniem dzieje się to zbyt późno. Czytelnik powinien wiedzieć dokąd zmierza naukowa podróż opisana w doktoracie, a tego mi w pracy Pana Bocheńskiego zabrakło. Ten brak jasnej wizji nie podważa jednak wkładu w proces budowy i rozwoju eksperymentu, który, co tu ukrywać, stanowi najbardziej czasochłonny etap badań doświadczalnych.

Druga uwaga dotyczy tego, że praca jest miejscami „przegadana”. Być może ze względu na strukturę opartą na publikacjach, opisy aparatury i procedur (MOT, chłodzenie sub-dopplerowskie) powtarzają się kilkakrotnie. Dla zgrabniejszej formy, można było tego uniknąć. Dodatkowo, zamiast pojawiających się długich opisów protokołów włączania i wyłączania wiązek laserowych czy włączania pola magnetycznego, bardzo pomogłyby diagramy (sekwencje czasowe), które zdecydowanie uprościłyby zrozumienie i skróciły tekst. Sprawiałoby to, że lektura byłaby szybsza.

Mimo tych uwag, należy stwierdzić, że **rozprawa stanowi wartościowy i oryginalny wkład w rozwój eksperymentalnej fizyki ultrazimnych atomów**. Autor wykazał się bardzo dużą samodzielnością badawczą, kompetencją techniczną oraz umiejętnością krytycznej analizy wyników. Zbudowanie od podstaw tak złożonego układu i doprowadzenie go do stanu, w którym możliwe jest obserwowanie subtelnych efektów w nowych mieszaninach izotopowych, jest osiągnięciem znaczącym.

Podsumowując, uważam, że rozprawa doktorska Pana Mateusza Bocheńskiego spełnia wszystkie formalne i zwyczajowe warunki stawiane przed tego typu pracami i wnoszę o dopuszczenie Pana Mateusza Bocheńskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Z wyrazami szacunku,

Podpisany elektronicznie przez
Szymon Pustelny
29.12.2025
18:37:03 +01'00'

Szymon Pustelny